

Э.Е.Хачиян

# СПИТАКСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

07.12.1988



Министерство образования и науки  
Республики Армения  
Национальный университет архитектуры  
и строительства Армении  
Союз строителей Армении

**Э.Е. Хачиян**

**СПИТАКСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ  
7 ДЕКАБРЯ 1988 ГОДА**

**(к тридцатилетию землетрясения)**

19620

**ЕРЕВАН**

**Издательство «НААПЕТ»**

**2018**



УДК 550.34 : 94 (479.25)

ББК 26.1+63.3(5 Арм)

X-292

Брошюра рекомендовано к опубликованию  
Ученым советом Национального университета  
архитектуры и строительства Армении

ХАЧИЯН ЭДУАРД

X-292 СПИТАКСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 7 ДЕКАБРЯ 1988 ГОДА: –

Ереван: Издательство Наапет, 2018. 160 с.

7 декабря 1988 года в северных районах республики Армения произошло сильное землетрясение, которое в дальнейшем стало именоваться Спитакским землетрясением. Оно стало причиной массового разрушений зданий и сооружений, причинило огромный материальный ущерб стране и унесло жизни тысяч людей. Спустя 30 лет уроки Спитакского землетрясением еще поучительны как для инженерного общества, так и для простого обывателя. Подробное научное изложения обо всех особенностях и последствиях Спитакского землетрясения, а также о международной помощи Армянскому народу в ликвидации последствий, и проявленный при этом подвиг тысяч врачей, спасателей, лётчиков, строителей и рабочих, приведены в настоящей брошюре.

Предназначено для научных работников и специалистов в области сейсмологии и сейсмостойкого строительства и широкого круга читателей.

EDUARD KHACHIYAN

THE SPITAK EARTHQUAKE OF DECEMBER 7, 1988.

(to the thirty years after the earthquake).

### **Abstract**

December 7, 1988 in the Northern regions of the Republic of Armenia there was a strong earthquake, which later became known as the Spitak earthquake. It caused massive destruction of buildings and structures, caused great material damage to the country and claimed the lives of thousands of people.

The article also discusses the socio-economic consequences of the Spitak earthquake, and describes the great assistance provided by the international community to the Armenian people in the aftermath of the devastating earthquake, the feats shown by thousands of doctors, rescuers, pilots, drivers, builders and workers.

ISBN 978-9939-856-53-7

© Хачиян Э. Е., 2018

## Charles Aznavour



### POUR TOI, ARMÉNIE

Tes printemps fleurirront encore,  
Tes beaux jours renaîtront encore,  
Après l'hiver, après l'enfer,  
Poussera l'arbre de vie,  
Pour toi, Arménie

### ДЛЯ ТЕБЯ, АРМЕНИЯ

Твои весны к тебе возвратятся еще,  
Твои светлые дни возродятся еще.  
После ада, зимы и невзгод  
Древо жизни еще зацветет  
Для тебя, Армения.

### ՔԵՋ ՀԱՄԱՐ, ՀԱՅԱՍՏԱՆ

Քոգարունները կրացվեն նորից,  
Քոլավօրերը ետ կգան նորից,  
Զմռանից հետո, դժոխքից հետո,  
Կվերընձյուղվի կենաց ծառը քո -  
Քեզ համար, Հայաստան...

Գալիք օրերդ նորից կերգեն,  
Զավակներդ ամուր տուն կկառուցեն,  
Սարսափից հետո ու վախիցից ետո,  
Աստված կբուժի լվկված հողը քո -  
Քեզ համար, Հայաստան...

Ամբողջ աշխարհը ոտքի է ելել,  
Ամբողջ աշխարհը քեզ հետ է հիմա,  
Եվ քեզ համար է, մոռացված իմ ազգ,  
Արար աշխարհը իր սիրտը բացել,  
Ու քեզ է մեկնել ձեռքերը ահա...

Եթե քո բախտն ես անգամ անիծում,  
Քո աչքերի մեջ, Հայաստան երկիր,  
Հույսի մի շող եմ ես ուզում տեսնել,  
Ուզում եմ տեսնել, ցանկություն, ձգտում,  
Ճակատագիրդ ձեռքդ առնելու,  
Ճակատագիրդ ամուր պահելու...



Человечество от крупных природных катаклизмов получает частичную отдачу в виде тех поучительных уроков, которые вытекают от их изучения.

*Уильяма Боуи*  
американский геофизик

Я поражен солидарностью людей. Армения стала нашей общей бедой, пепел ее руин стучит в моем сердце... Катастрофа, которая произошла в этой маленькой республике, словно пробудила лучшие человеческие чувства. И теперь мне кажется, что мир изменился, стал лучше. Люди больше думают о себе подобных, сопереживают и, я надеюсь, что такое ощущение общей причастности сохранится, не исчезнет, выкристаллизуется в нечто постоянное.

*Грем Грин*  
английский писатель

# СПИТАКСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 7 ДЕКАБРЯ 1988 ГОДА: ОСНОВНЫЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И АНАЛИЗ ЕГО РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Первое подробное научное изложение обо всех особенностях и последствиях Спитакского землетрясения было опубликовано в американском профессиональном журнале "Earthquake Spectra" Исследовательского института сейсмостойкого строительства. Спитакскому землетрясению был посвящен специальный августовский номер журнала (1989 г.) под названием "Армянское землетрясение – рекогносцировочный доклад" под редакцией Лоринга Уайла и Джона Филсона [1]. Следующий более объемистый труд, содержащий статьи о Спитакском землетрясении специалистов многих стран мира, был опубликован в 1995 г. Это были труды Международного семинара, посвященного землетрясению, организованного ЮНЕСКО в мае 1989 г. в г.Ереване [2]. Нижеизложенные данные, анализы и иллюстрации в основном исчерпаны из этих двух источников и из других публикаций приведенные в списке литературы.

## 1. Общая характеристика землетрясения

7 декабря 1988 года в северных районах Республики Армения произошло сильное землетрясение, которое в дальнейшем именовалось как Спитакское землетрясение. Оно стало причиной массовых разрушений зданий и сооружений, причинило огромный материальный ущерб стране и унесло жизни тысяч людей.

Землетрясение произошло на нагорье Малого Кавказа, примерно в 150км к югу от осевой части Главного Кавказского хребта. Тектонические и геологические структурные направления Малого Кавказа в основном параллельны оси Главного Кавказского хребта в его северо-западном и юго-восточном сегментах. Тектоническое расположение региона в основном сложное, но в целом характеризуется сжатием и укорочением коры из-за конвергенции Аравийской и Евразийской плит, как это показано на рис.1 [3]. Локальное тектоническое расположение Спитакского землетрясения показано на рис.2, заимствованное из [2].

Регион возникновения землетрясения входит в Альпийский сейсмический пояс Земли, протягивающийся от Средиземноморья на восток через южную Европу, северную Африку, Турцию, Кавказ, Иран и Индию. Сейсмическая активность Армении в этом поясе относительно низка как по максимальной магнитуде землетрясения (рис.4), так и по их повторяемости. С начала XX века в этом регионе Армении было зарегистрировано небольшое количество землетрясений с интенсивностью 6-7 баллов в эпицентре, в том числе самое сильное в 1926 году близ города Александрополь (Ленинакан) с магнитудой  $M = 5.6$ .

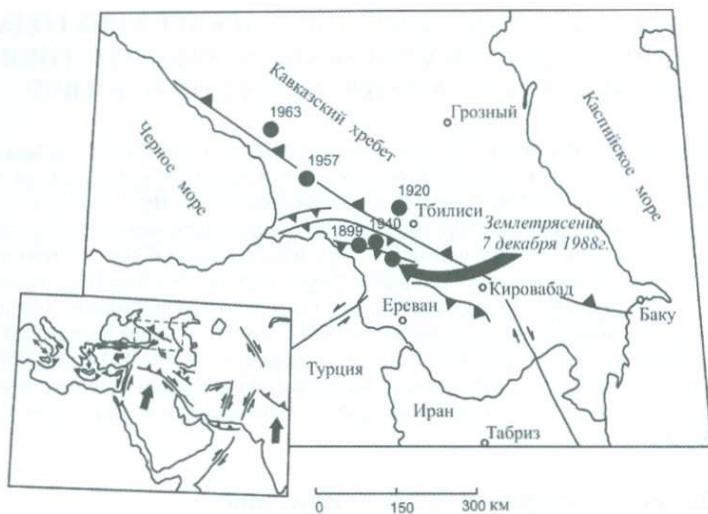


Рис. 1. Тектоническое положение Спитакского землетрясения [3].



Рис. 2. Расположение Спитакского землетрясения на региональной тектонической карте [2].

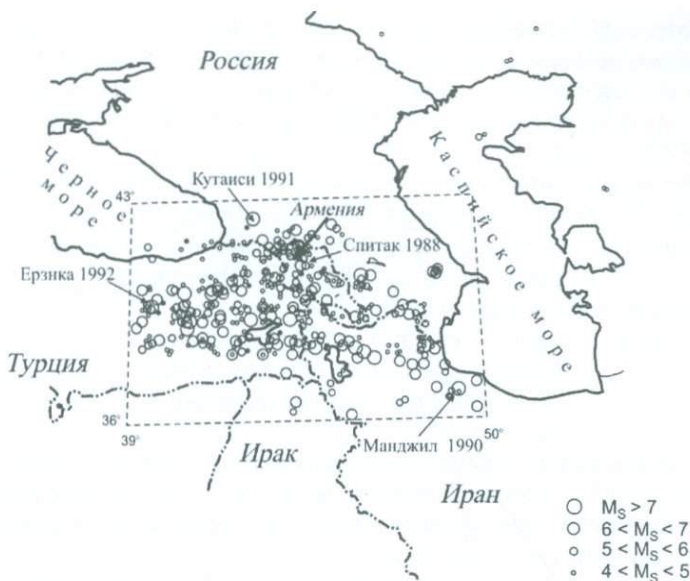


Рис. 3. Эпицентры исторических землетрясений на Армянском нагорье и прилегающих территориях с 139г. н.э. до 1992 года [4]

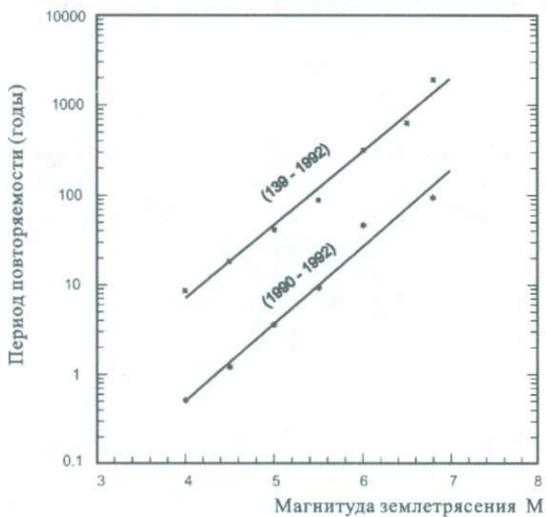


Рис. 4. Повторяемость землетрясений на территориях вокруг Спитака со 100км радиусом [4]



Спитакское землетрясение было зарегистрировано сейсмическими станциями по всему миру. Стандартные параметры землетрясения согласно сообщению Национального центра сейсмической информации (NEIC) Геологической службы США и Института Физики Земли (ИФЗ) АН СССР следующие:

**Время возникновения:** 7-го декабря 1988 года 07ч. 41мин. 24.96с. по UTC, 11ч. 41мин. 24.96с. по местному времени.

**Координаты эпицентра:** широта (градусы)  $40,996\text{С} \pm 2.9\text{км}$  (40,92) долгота (градусы)  $44,197\text{В} \pm 1.8\text{км}$  (44,20).

**Глубина очага:** 11км (уточненная)

**Магнитуды:**  $m_b=6.3$  – среднее по 87 наблюдениям,  
 $M_S=6.8$  – среднее по 17 наблюдениям,  
 $M_S=7.0$  по вертикальной компоненте (Беркли),  
 $M_S=7.0$  (ИФЗ).

**Механизм главного толчка** землетрясения, по данным Геологической службы США, которые основаны на наблюдениях региональных и телесеизмических станций, имеет вид, показанный на рис.5. Параметры этого механизма следующие:

	<u>азимут</u>	<u>погружение</u>
Ось сжатия (P)	$166.2^0$	$16.4^0$
Ось растяжения (T)	$265.5^0$	$28.7^0$
Нулевая ось (N)	$50.1^0$	$56.2^0$
Ось (X)	$212.8^0$	$32.6^0$
Ось (Y)	$308.0^0$	$8.0^0$

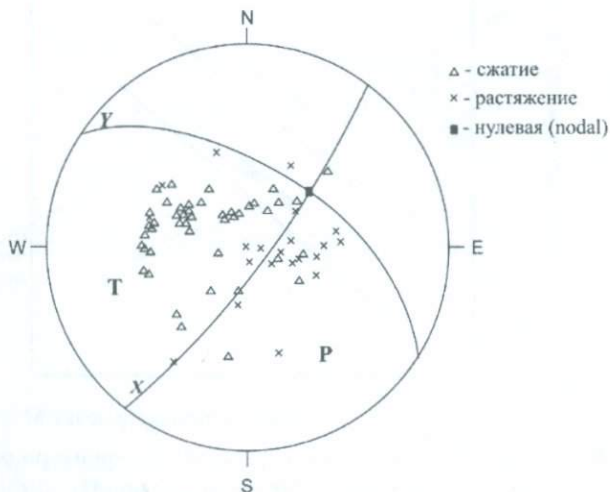


Рис. 5. Фокальный механизм очага Спитакского землетрясения [3].

Параметры плоскости разлома, по данным инверсии объемных и поверхностных волн [3] и геологических измерений на месте максимального смещения по поверхностному обнажению разлома, показаны на рис.6 [1, 5].

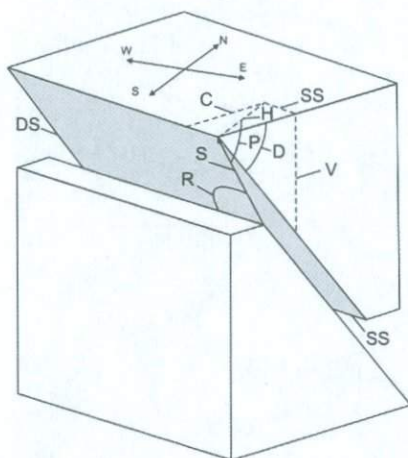


Рис. 6. Схема образования поверхностного трещинообразования во время Спитакского землетрясения [5].

Перед землетрясением несмещенный куб имел 3-метровые стороны; вертикальные грани были параллельны и нормальны к простиранию разлома. Стрелки, показанные на плоскости разлома – направление вектора перемещения. Обозначение размеров углов и направлений следующие: N север, азимут простирания разлома (не обозначен) равен  $292^{\circ}$ , падение разлома  $D=55^{\circ}$ , смещение (подвижка)  $S=2\text{м}$ , вертикальная компонента  $V=1.6\text{м}$ , сдвиговая компонента  $SS=0.5\text{м}$  (правосторонняя), компоненты сжатия  $C=1.1\text{м}$ , горизонтальная компонента  $H=1.2\text{м}$ , компонента смещения по падению  $DS=1.9\text{м}$ , угол погружения смещения  $P=53^{\circ}$ , наклон смещения  $R=109^{\circ}$ .

Простирание поверхностных разрывов (местами прерывист-белыми линиями) показано на рис.7 (Ландсат) [4,5]. Поверхностное трещинообразование, которое в большинстве мест проходит через обнаженные коренные породы, произошло от Спитака в северном, северо-западном и к югу от Спитака в южном и юго-восточном направлениях. Оно имело протяженность около 37 км. Горизонтальная подвижка в основном имела сдвиговый правосторонний характер. Вектор и величина вертикальной подвижки по длине разлома перемены и имеют сдвигово-правосторонний сбросовый характер. На рис. 8 показан уступ разлома в зоне максимального взброса на участке между Спитакком и Гехасаром высотой около 2 метров.



Рис. 7. Простирание поверхностного разрыва (разлома) во время Спитакского землетрясения [4].

По исследованию [5], коренная порода вне зоны сдвигового смещения (подвижки) проявила себя как жесткий блок с небольшой внутренней деформацией:



Рис. 8. Уступ, образованный в окрестностях села Гехасар во время Спитакского землетрясения [6].

По утверждению **Истейбрука, Паченко и Набелека** [1], используя большой объем данных в продолжении 30 секунд телесеismicической записи объемных сейсмических волн, им удалось идентифицировать, по крайней мере, *три подсобытия*. Согласно их интерпретации, первое подсобытие имело место близ города Спитак, второй – через 4 сек в 15 км к юго-востоку от первого, а третье произошло через 10сек в 30 км к западу от первого подсобытия, т.е. *в сторону Ленинанкана*. Эти результаты указывают на то, что главный толчок по своей природе был очень сложен и мог образовать разрыв, по крайней мере, на двух сегментах [1].

**Сейсмический момент и энергия землетрясения.** Согласно уточненным данным [7], принимая длину поверхностного разрыва  $L=38\text{км}$ , глубину очага  $h=1\text{км}$ , среднее значение относительной подвижки спаренных блоков составило  $\bar{u}=1,22\text{ м}$  и принимая для модуля сдвига  $G=3\cdot 10^{11}\text{дин/см}^2$  для *сейсмического момента* Спитакского землетрясения, получим

$$M_0 = FG\bar{u} = LhG\bar{u}. \quad (1)$$

Подставляя соответствующие значения  $F=Lh$ , получим:

$$M_0 = 38\cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{11} \cdot 1,22 \cdot 10^2 = 15,3 \cdot 10^{25}\text{дин}\cdot\text{см}.$$

Таким образом, *моментная магнитуда* землетрясения согласно [7] будет:



$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7 = 6.75, \quad (2)$$

которая отличается от средней Рихтерской магнитуды  $M_S=6.8$  (вычисленной по сейсмограмме) всего на 0.7%.

**Энергия** Спитакского землетрясения, составила:

$$\begin{aligned} \text{при } M=6.8 \quad \lg E &= 11.8 + 1.5M = 11.8 + 1.5 \cdot 6.8 = 22 \\ E &= 10^{22} \text{ эрг} = 10^{15} \text{ Дж.} \end{aligned}$$

**Энергетический класс** землетрясения –  $k=15$ . Кстати энергия атомной бомбы сброшенной американцами на Японский город Хиросима в 1945, составила  $8 \times 10^{20}$  эрг. Следовательно энергия Спитакского землетрясения равносильна симмарной энергии 13 атомных бомб, сброшенных на Хиросиму.

**Энергия** Спитакского землетрясения, составила:

$$\begin{aligned} \text{при } M=7.0 \quad \lg E &= 11.8 + 1.5M = 11.8 + 1.5 \cdot 7.0 = 22.3 \\ E &= 10^{22.3} \text{ эрг} = 2 \times 10^{15} \text{ Дж, Эн. класс} = 15.3. \end{aligned}$$

## 2. Форшок и афтершоки землетрясения

Последовательность процесса возникновения Спитакского землетрясения состояла из форшока 6 декабря, главного толчка, одного мощного афтершока сразу после главного толчка через 4 мин 21сек и сотен дополнительных афтершоков, некоторые из которых по магнитуде приближались к 5. Хронологическое перечисление форшока, главного толчка и афтершоков, локализованных NEIC, приводятся в табл.1 [3]. В таблице  $m_b$  – это магнитуда землетрясения, вычисленная по амплитуде объемных сейсмических волн, зарегистрированной на станциях, расположенных на расстоянии более чем 600км от эпицентра, а  $M_S$  – магнитуда, вычисленная по амплитуде поперечной S волны, зарегистрированной на станциях, расположенных менее чем за 600км от эпицентра. Как известно, для  $M_S > 6.75$ ,  $m_b < M_S$ , а для  $M_S < 6.75$ , наоборот -  $m_b > M_S$ .

Как видно из таблицы, основному толчку 7 декабря 11 часов 41мин (по местному времени) предшествовал изолированный и хорошо зарегистрированный форшок 6 декабря 19 часов 27 мин. Этот форшок ощутили жители Ленинакана и был зафиксирован в Ленинаканской сейсмической станции. По мнению местных сейсмологов, 6 декабря днем в Ленинакане ощутили влияние не только указанного форшока, но и еще одного более слабого. Однако, так как землетрясения такой силы, как форшок 6 декабря, не редки в этом регионе, он (форшок), к сожалению, не был принят в качестве предварительного форшока-предвестника ожидаемого сильного события 7 декабря 1988 года и не были приняты упреждающие меры по защите от наступающей трагедии. В пределах

пяти минут после главного толчка имел место сильный афтершок (редкое явление в сейсмологии), уступающий по магнитуде главному толчку всего на 0.4 единицы по магнитуде объемной волны и 0.75 – по магнитуде поверхностной волны. Этот афтершок причинил обширный дополнительный значительный ущерб зданиям и сооружениям, уже ослабленным или поврежденным главным толчком.

Таблица 1 Хронологическая последовательность форшока, главного толчка и афтершоковземлетрясения [3,8].

Дата	Время возникновения по UTC			Магнитуда, $m_b$	Источник	Магнитуда, $M_s$	Источник по $M_s$
	час	мин.	сек.				
06.12.1988	15	27	06.9	3.0	ИФЗ	-	ИФЗ
07.12.1988	07	41	25.0	6.3	NEIC	7.00	NEIC, [8]
07.12.1988	07	45	46.0	5.9	NEIC	6.25	[8]
07.12.1988	08	06	28.2	4.7	NEIC	5.00	- " -
07.12.1988	09	34	33.9	5.0	NEIC	4.50	- " -
07.12.1988	18	05	42.3	4.6	NEIC	4.25	- " -
07.12.1988	20	07	30.6	4.6	NEIC	4.25	- " -
08.12.1988	01	15	55.7	4.8	NEIC	4.25	- " -
08.12.1988	01	49	41.4	4.1	NEIC	4.00	- " -
08.12.1988	04	09	37.2	4.7	NEIC	4.25	- " -
08.12.1988	05	36	29.8	5.0	NEIC	4.00	- " -
08.12.1988	07	46	00.0	4.6	NEIC	4.50	- " -
08.12.1988	20	32	06.2	4.7	NEIC	4.50	- " -
10.12.1988	19	13	59.1	4.4	NEIC	4.00	- " -
12.12.1988	15	36	15.1	4.6	NEIC	4.25	- " -
31.12.1988	04	07	10.6	4.7	NEIC	4.50	- " -

Естественно, он и стал причиной смерти тысяч людей. Многие в ходе эвакуации из поврежденных, но все еще устоявших зданий, не успев покинуть их, были накрыты окончательными разрушениями от этого мощного афтершока. Кроме того, как видно из табл.1, в течение первых 24 часов с начала землетрясения произошли по крайней мере 10 форшоков с магнитудами 4.25-5.0, которые стали еще одной, дополнительной причиной роста повреждений и гибели людей. Это означает, что в течение одних суток произошли 10 землетрясений с интенсивностью VII-X баллов, что, по нашему мнению, является одной из основных причин большого объема разрушений и числа жертв при Спитакском землетрясении.

Схема географического расположения главного толчка и афтершоков, происходящих в первые часы и дни, показана на рис.9.

Географическое расположение всех ощутимых афтершоков и их проекции на плоскости разрыва главного толчка показаны на рис.10 [2,4,10].

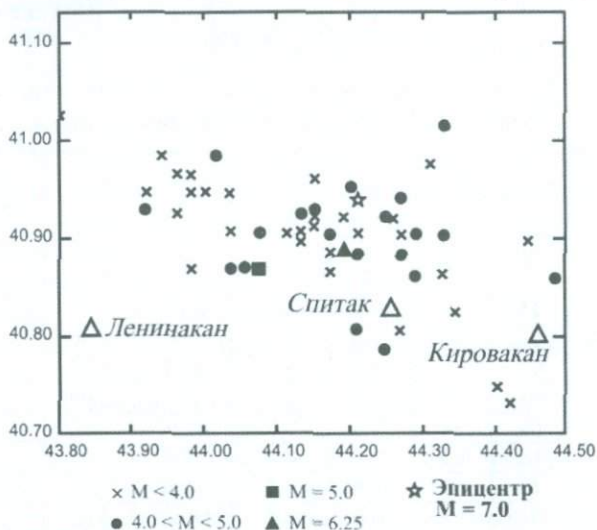


Рис. 9. Расположение эпицентров афтершоков, происходящих в течение первых 24 часов после главного толчка [8,9].

Афтершоки можно разделить на две зоны. Первая зона узкой шириной простирается от разрыва в окрестностях Спитака на 10-15км к юго-востоку. Глубина очагов этих афтершоков доходит до 8км.

Вторая зона простирается на северо-запад, на краю которой произошел самый сильный из афтершоков. Эта зона расположена в продолжении поверхностного разрыва и простирается на 30км; она более широкая, чем первая – юго-восточная.

Картина расположения афтершоков, приведенная на рис.10, свидетельствует о сложном характере телесейсмических объемных волн, отмеченных выше Истейбруком, Панченко и Набелеком и об их выводе и сложном характере главного толчка, состоящего по крайней мере из трех подсобытий. Два сильных афтершока расположены в их центральной части. Энергия первого мощного афтершока (через 4мин 21 сек) составила:

$$\lg E = 11.8 + 1.5 \cdot 6.25 = 21.175$$

$$E = 1.5 \cdot 10^{21} \text{ эрг} = 1.5 \cdot 10^{14} \text{ джоуль.}$$

Таким образом, энергетический класс этого афтершока ( $k=14.17$ ) не отличается от энергетического класса главного толчка ( $k=15$ ) даже на

одну единицу. А энергия афтершока всего в 6.6 раза уступает энергии основного толчка.

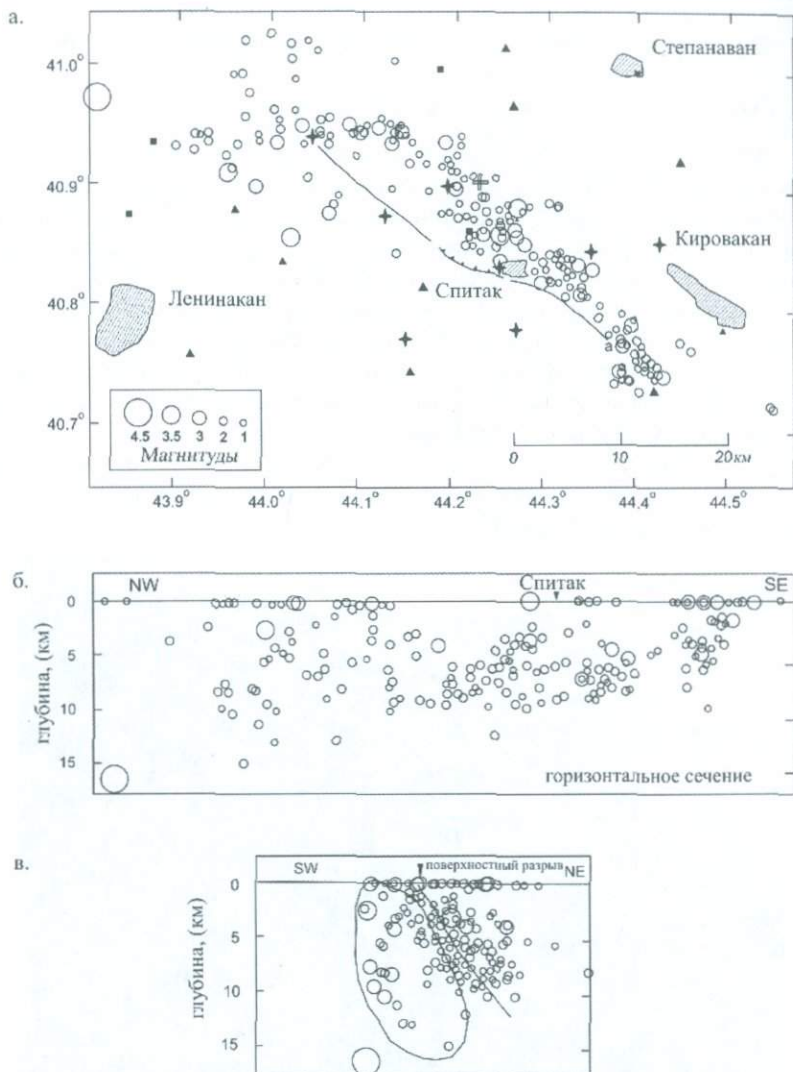


Рис. 10. Расположение афтершоков [3,4,10]а. географическое расположение эпицентров,б. проекция гипоцентров на плоскости разрыва,в. гипоцентры в зоне плоскости, перпендикулярной поверхностному разрыву.



Суммарная энергия остальных афтершоков, если их количество принимать примерно 200 со средней магнитудой  $M=3.0$ , составит:

$$E = 200 \cdot 10^{16.3} = 2 \cdot 10^{18.3} \text{ эрг} = 4 \cdot 10^{11} \text{ джоуль.}$$

Эта энергия составляет всего 0.04% от энергии главного толчка.

### 3. Геотехнические последствия землетрясения

Землетрясение в эпицентральной зоне вызвало значительные геотехнические изменения на поверхности Земли в виде дислокаций, оползней, обвалов, уступов, трещин, падением больших объемов скальных пород, разжижением грунтов, разрушением железнодорожного полотна. Наиболее характерное геологическое изменение из-за землетрясения – это 38-километровый новый разрыв на поверхности Земли (рис.7) с уступом более чем 2-метровой высоты (рис. 8) в окрестностях Гегасара.

Общая картина сейсмодислокаций в эпицентральной зоне около Спитака показана на рис. 11, а оползневые образования в окрестностях Ленинакана в результате землетрясения на рис.13 [2].

Геоморфологическое положение нового разрыва и геологические разрезы в перпендикулярном к разрыву направлении показаны на рис.12, заимствованные из [2].



Рис. 11. Общий вид сейсмодислокаций в эпицентральной зоне землетрясения [2].

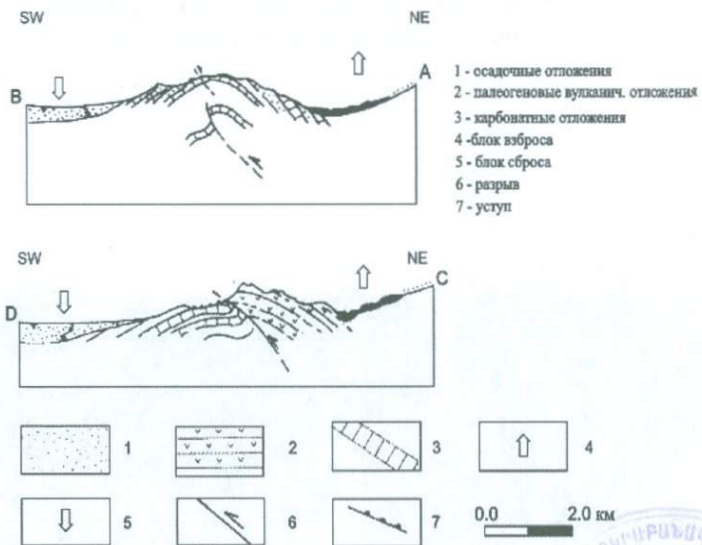
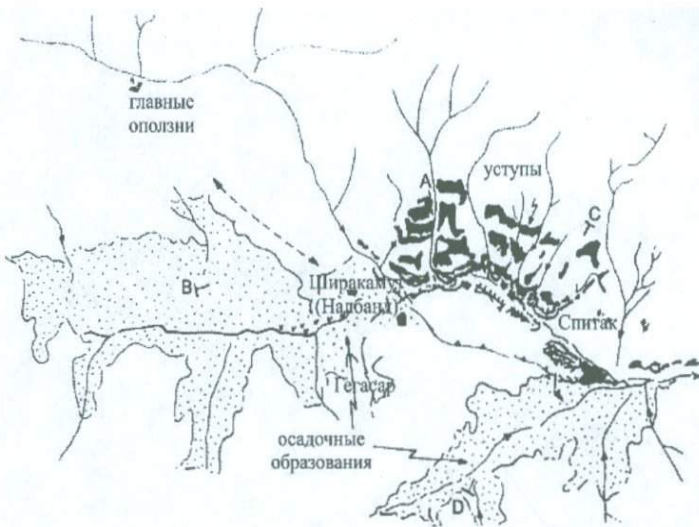


Рис. 12. Геоморфологическое положение поверхностного разрыва, образованного при Спитакском землетрясении и геологические разрезы в перпендикулярном к нему направлении [2].



Рис. 13. Оползни в западной части города Ленинанкана, образованные из-за землетрясения [2].



Рис. 14. Оползание туфовых пород около Спитака [1].



Рис. 15. Обвалы железобетонных подпорных стен около Спитака [1].



Рис. 16. Оползание-перемещение вулканических туфовых пород в западной части Спитака [1].



Рис. 17. Повреждения железной дороги около станции Налбанд [4].





Рис. 18. Трещины, образованные в проезжей части дорог [4].

На проезжих частях дорог образовалось большое количество продольных трещин шириной до 40-50 см, в горах камнепады, на склонах оползни. На протяжении 230 метров по полотне железной дороги произошло разжижение грунта, вследствие чего имело место искривление рельсов. Иллюстрации этих явлений показаны на рисунках 12-18.

О всех этих явлениях более подробные сведения можно найти во многих научных сборниках, посвященных Спитакскому землетрясению [1,2,4,6,11]. Такими материалами очень богат объемный сборник (530 стр.) докладов, участников Международной научной конференции, посвященной годовщине Спитакского землетрясения, состоявшейся 23-26 мая 1989 года в городе Ереване, организованной UNESCO [2].

#### **4. Регистрация колебания грунта**

К сожалению, имеется очень малое количество инструментальных записей Спитакского землетрясения. Вследствие ряда причин, в том числе низкого уровня обслуживания сети сейсмических станций и качества записывающей аппаратуры, при основном толчке и последующем мощном афтершоке в эпицентральной зоне ни одной записи землетрясения не получено. Пять станций из девяти инженерно-сейсмометрических служб (ИСС) в городе Ленинакане Института геофизики и инженерной сейсмологии (ИГИС) АН остались под развалинами и после расчистки из них не удалось получить необходимой полезной информации. Единственная качественная запись ускорения грунта (акселерограмма) ближе к эпицентральной зоне получена сотрудниками ИСС ИГИС под рук. канд. техн. наук Л.А. Мхитарян в райцентре Гукасяна (Ашоцк) на

расстоянии около 33 км от эпицентра главного толчка трехкомпонентным акселерографом ССРЗ с собственным периодом колебаний 0.05 сек (СССР). Акселерограф регистрировал как все три компонента главного толчка, так и афтершока (рис.19) [1.14,15].

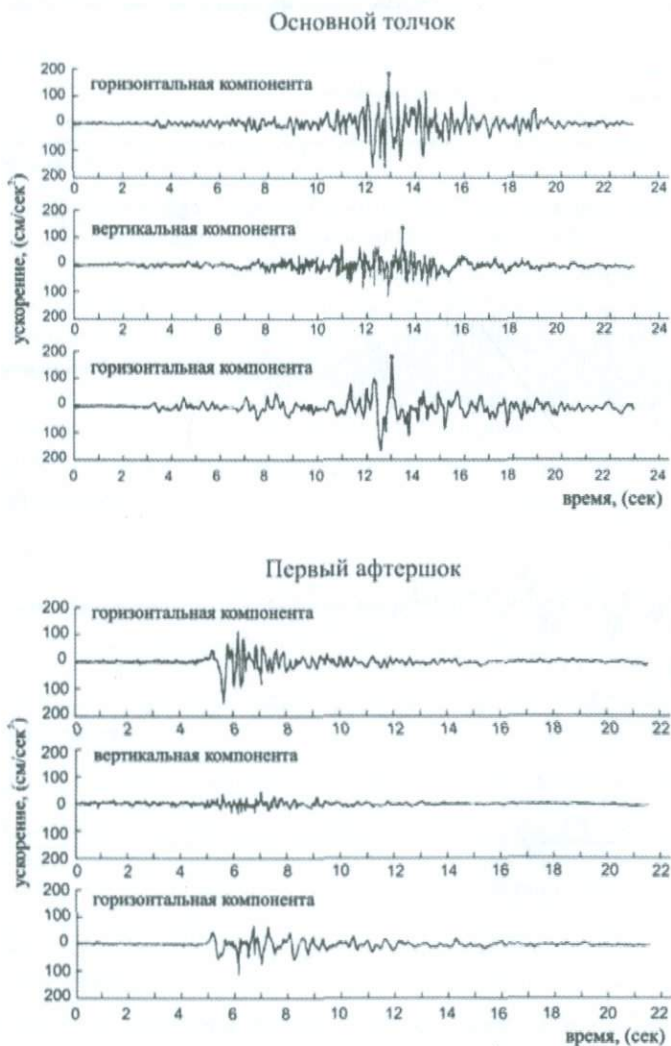


Рис. 19. Акселерограммы основного толчка и первого афтершока Спитакского землетрясения, записанные в Гукасяне (Ашоцк).

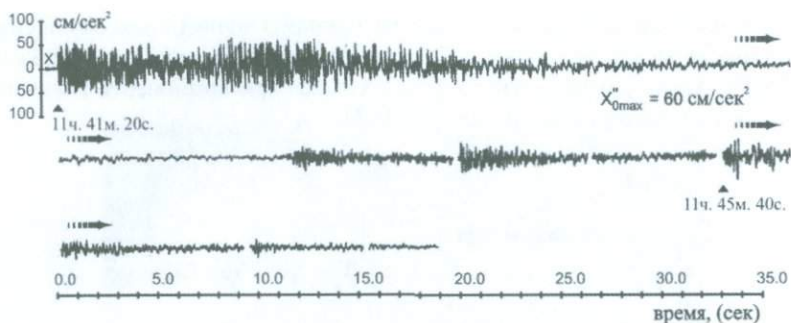


Рис. 20. Запись ускорения грунта в Ереване (коренные базальты) при главном толчке и последующих афтершоках [15].

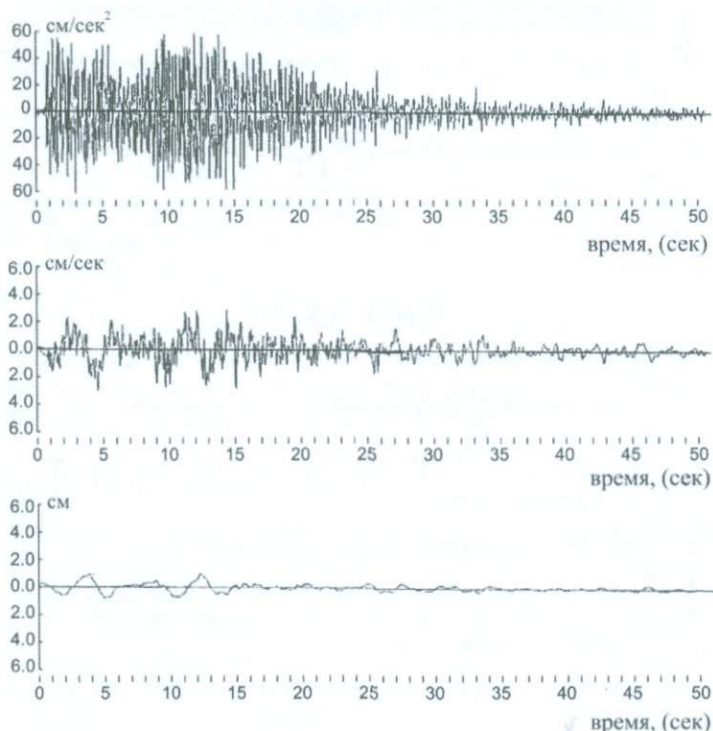


Рис. 21. Акселерограмма Спитакского землетрясения, записанная в Ереване (главным толчок) и соответствующие велесограммы и акселерограммы, полученные путем двойного интегрирования (Kazuhiko Kawashima, PWRI, Japan).

Максимальное горизонтальное ускорение грунта в Гукасяне при главном толчке достигло 0.21 g, а вертикальное – 0.15 g, при первом афтершоке – соответственно 0.15 g и 0.05 g. Ускорение колебания грунта было записано также в Ереване на расстоянии около 100 км на ИСС №3 АрмНИИСА (ул.А. Аветисяна, 1, андезиты-базальты).

Запись осуществлялась сейсмоприемником ОСП (с собственным периодом колебания 0.15 сек), настроенным на автоматическое включение и запись в течение 40-50 сек. Как показали результаты обработки общей кассеты, снятой через 30 минут после основного толчка землетрясения, на ней между записями главного толчка и первого афтершока оказались записи еще двух толчков. Общий вид записи (всех четырех толчков) показан на рис. 20. Максимальное ускорение грунта при главном толчке составило около 60 см/сек<sup>2</sup>.

Методом интегрирования этой акселерограммы были получены также велесограмма и сейсмограмма грунта в Ереване при главном толчке (рис. 21). Их максимальные значения составили соответственно 3 см/сек и 0.9 см. В Ереване на ИСС №2 (аллювий) и ИСС №5 (валуно-галечник) АрмНИИСА сейсмоприемником СМ-3 непосредственно были записаны также смещения грунта. Они показаны на рис.21.

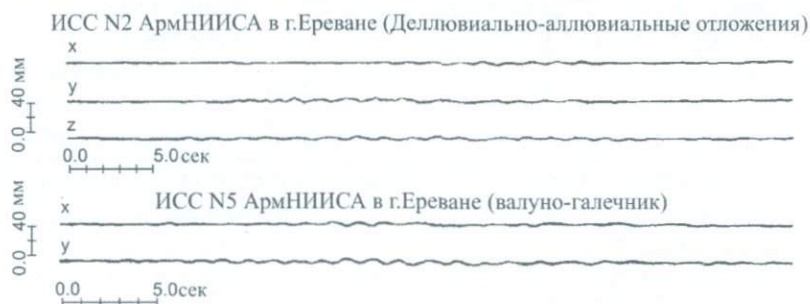


Рис. 22. Сейсмограммы Спитакского землетрясения, записанные в Ереване.

Максимальное смещение грунта достигло 3.5 мм (ИСС №5). Кстати, пользуясь определением магнитуды Рыхтера, как значения десятичного логарифма от перемещения грунта на расстоянии 100 км (Спитак-Ереван), получим [18]:

Спектры реакции по записям акселерограмм, зарегистрированные в Гукасяне, Ереване и на территории АЭС показаны на рис.24.

$$M = \log 2800 \cdot 3.5 \cdot 1000 = \lg 10^{6.99} = 6.99.$$

Спитакское землетрясение было записано также сейсмометром СБМ (сейсмометр бальности, период свободных колебаний – 0,25, декремент затухания – 0,5).



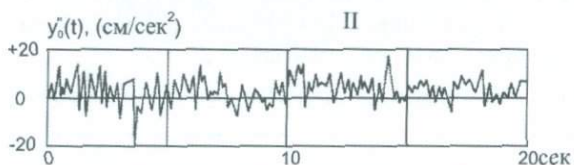
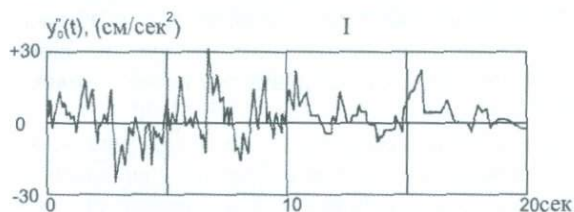
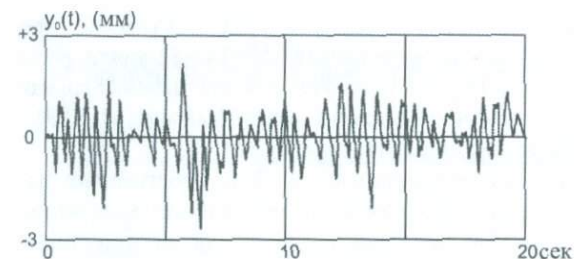


Рис. 23.  
Сейсмограмма и акселерограмма Спитакского землетрясения, записанные на территории Армянской АЭС [16].

Таблица 2. Шкала интенсивности по показаниям сейсмометра СБМ.

Отклонения маятника сейсмометра СБМ в мм	Интенсивность землетрясения по MSK-64 в баллах
0.5 – 1.0	V
1.1 – 2.0	VI
2.1 – 4.0	VII
4.1 – 8.0	VIII
8.1 – 16.0	IX
16.1 – 32.0	X

Показания сейсмометра СБМ являются основанием для установления интенсивности землетрясения по шкале MSK-64, согласно табл. 2. Итоговые результаты по оценке интенсивности землетрясения в разных городах Армении приведены в табл. 3. [15,18,19].

Таблица 3. Зарегистрированные показатели сейсмометра СБМ при Спитакском землетрясении.

Место установки сейсмометра СБМ	Наибольшее зарегистрированное отклонение маятника (мм)	Интенсивность по MSK-64 (баллах)
<i>г. Ленинакан</i>		
- ул. Ленинградян, 5 (ИГИС)	18.00	X
- ул. Спандаряна, 24	15.00	IX
- ул. Саркисяна, 1 (Сейсмостанция)	15.50	IX
- ул. Калинина, 16	10.40	IX
<i>г. Степанаван</i>	12.0	IX
<i>г. Ереван</i>		
- ул. Д.Сасунского, 3 (АрмНИИСА)	1.59	VI
- ул. Лео, 9 (Центр)	0.82	V
- ул. Молдовакан, 3а (Норк. массив)	1.14	VI
- ул. Фрунзе, 6/8 (III участок)	0.77	V
- ул. Аветисяна, 1	0.91	V
<i>г. Арарат</i>	0.90	V

На рис.25 показаны записи сейсмометра СБМ, полученные на двух станциях г. Ленинакана. На инженерно-сейсмометрических станциях Ленинакана и Еревана были установлены также маятниковые сейсмометры конструкции А.Г. Назарова. Результаты их обработки и анализа приведены в [13,18,19]. Из этих записей наибольший интерес, по нашему мнению, представляет запись маятника с периодом свободных колебаний  $T=0.8$  сек сейсмометра, установленного на грунте у здания ИГИС в Ленинакане. Эта запись показана на рис.26.

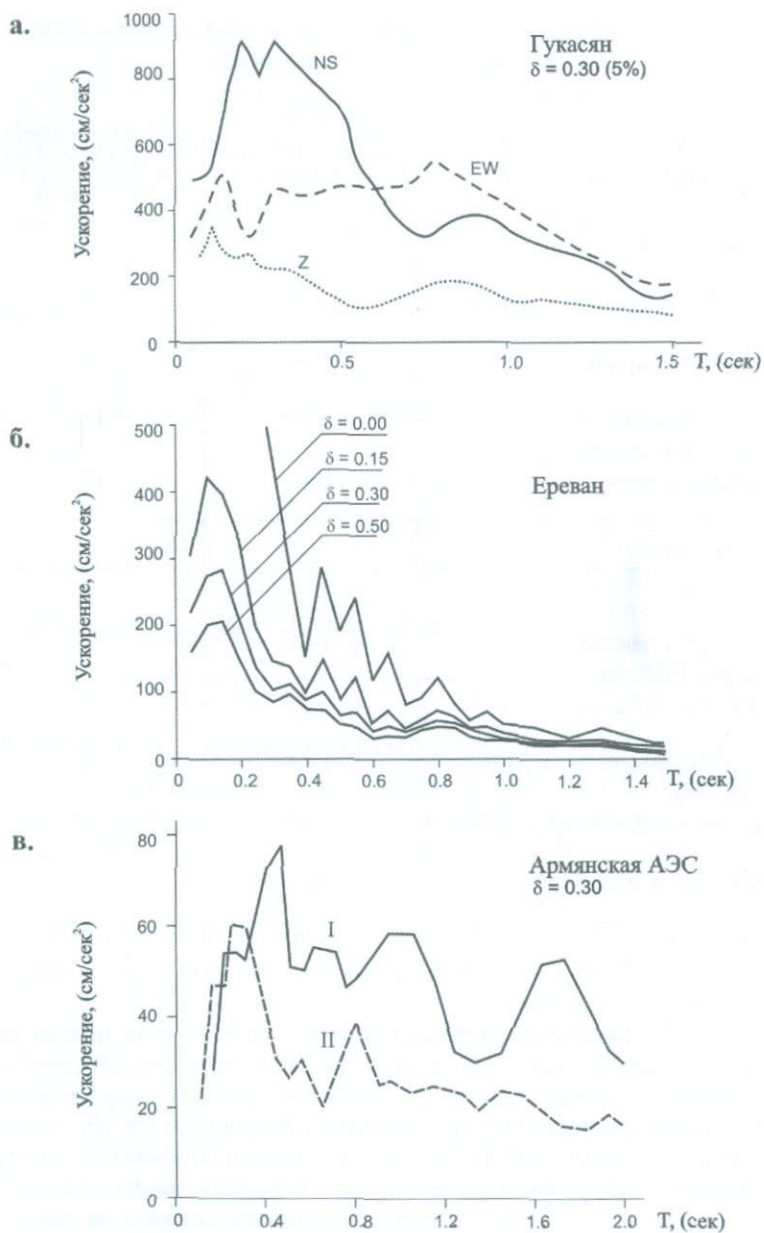


Рис. 24. Спектры реакции Спитакского землетрясения. [18]

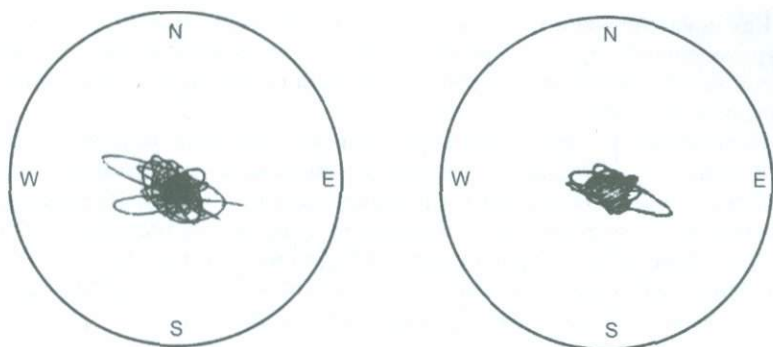


Рис. 25. Записи сейсмометра бальности СБМ, (период 0.25 сек) полученные в Ленинакане.

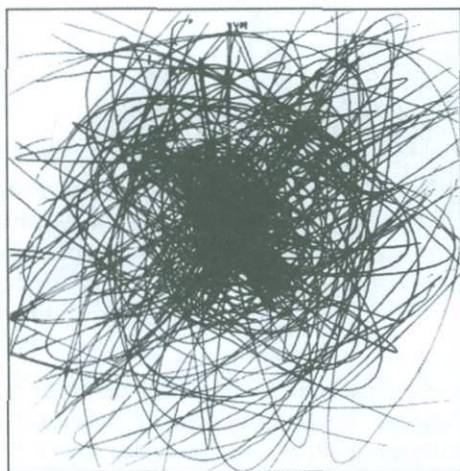


Рис. 26. Запись маятника с периодом 0.8сек многоярнтикового сейсмометра ИГИС, полученная в Ленинакане.

Как видно из записи, во время землетрясения маятник сейсмометра совершил по крайней мере 20-30 колебаний с одинаковой максимальной амплитудой. Это в принципе возможно при большой длительности землетрясения и близости величины периода маятника (0.8 с) к величине преобладающего периода колебания грунта во время землетрясения. Об этом свидетельствует также запись (рис. 25) сейсмометра СБМ, установленного рядом в том же месте, маятник которого с периодом 0.25 сек совершил всего 1-2 колебания с максимальной амплитудой.



Как показали аналитические расчеты и анализ записей автершоков и микроколебаний преобладающие периоды колебаний грунта в этой старой части Ленинакана при землетрясении на самом деле находились в пределах 0.6-0.8сек.

Спитакское землетрясение было записано многими сейсмическими станциями мира. На рис. 27 показана типичная сейсмограмма землетрясения, зарегистрированная на сейсмической станции Графенберг (Германия), из которого четко видно как величина промежутка между главным толчком и первым мощным афтершоком (4 мин. 21 сек), так и отношения максимальных амплитуд около 0.8. Причем сейсмические волны достигли Графенберга с 4-минутным опозданием.

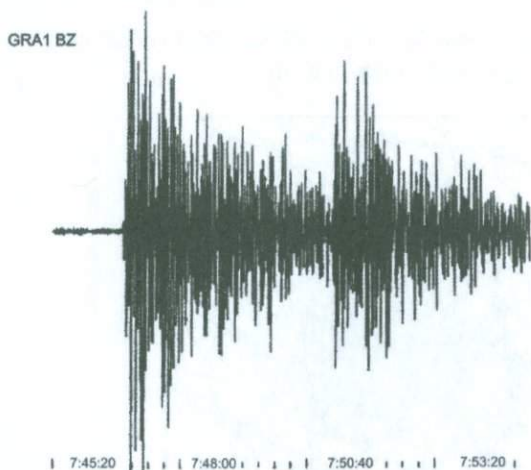


Рис. 27.  
Сейсмограммы  
Спитакского  
землетрясения,  
записанные на  
станции  
Графенберг (ФРГ).

В Спитаке до землетрясения приборы для регистрации землетрясения не были установлены. Косвенные оценки максимального ускорения грунта в Спитаке по различным эмпирическим формулам и по расчетам по опрокидыванию надгробных памятников были даны различными специалистами [1,2,4,20,21,22]. Они показывают, что величина ускорения грунта в Спитаке могла быть от 0.8 g до 1.0 g. Аналогичные оценки для Ленинакана – 0.47-0.53 g, Степанавана – 0.46 g, Кировакана – 0.40 g. Значения нормативных ускорений грунта до землетрясения были приняты: для Спитака – 0.1 g, Ленинакана – 0.2 g, Степанавана и Кировакана – 0.1 g [23]. Если даже предположить, что при проектировании строительстве зданий и сооружений в зоне бедствий не было никаких нарушений норм проектирования и строительные работы выполнялись безукоризненно, все равно здания и сооружения не могли выдержать сейсмические нагрузки, которые возникают в них при вышеуказанных значениях ускорения грунта. По новым нормам Армении ускорение грунта для всех 4-х городов принято равным 0.4 g [24].

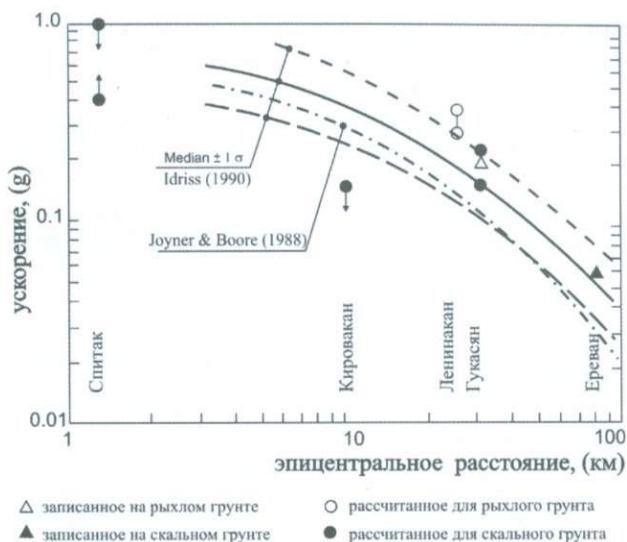


Рис. 28. Зависимость величин ускорения грунта от эпицентрального расстояния при Спитакском землетрясении [4].

На рис. 28 показан график затухания ускорений по результатам зарегистрированных и вычисленных значений ускорений для различных городов на расстояниях до 100 км. Там же для сравнения приведены известные кривые затухания Джорнера и Бура и Идрис, заимствованные из [4].

## 5. Исследование влияния местных грунтовых условий

Прибывшие в зону землетрясения большие группы специалистов из США, Франции и СССР в первые же дни после землетрясения провели большой объем исследований по регистрации последующих афтершоков, выявлению особенностей образовавшегося поверхностного разрыва, влиянию причин усиления или ослабления колебаний грунтов в зависимости от локальных грунтовых условий и др. Последнее обстоятельство имело большое морально-психологическое значение в свете тех факторов, что в Ленинакане разрушения оказались значительно больше, чем в Кировакане, несмотря на то, что Кировакан расположен ближе к очаговой зоне землетрясения, чем Ленинакан. Были организованы сети портативных временных сейсмических станций для регистрации афтершоков. Зарегистрированы сотни афтершоков, результаты анализа которых представляют большой научный интерес и в какой-то мере заполняют пробел, имеющий место при регистрации главного толчка землетрясения.

Расстановка аппаратуры специалистами США началась с 23 декабря. Временные станции изначально были установлены на разных грунтовых условиях. Грунтовые условия станций в Кети, Гогаране и Джрашене соответствовали скальным основаниям, а в старой части Ленинанкана – слабым аллювиальным грунтам. Схема их расстановки показана на рис. 29.

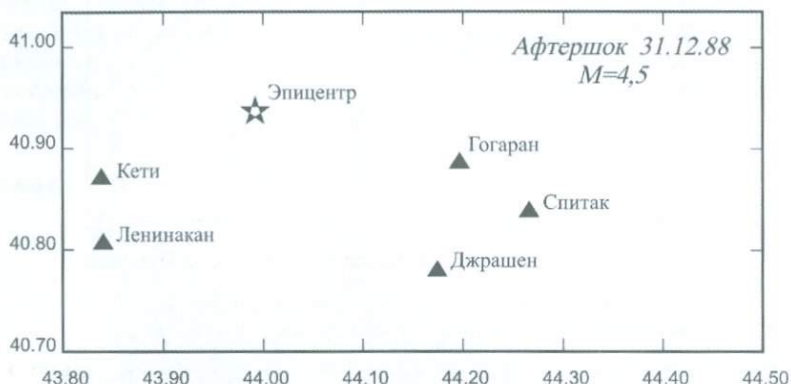


Рис. 29. Расположение временных сейсмических станций во время афтершока 31.12.1988 года.

На рис. 30, 31 и 32 показаны трехкомпонентные акселерограммы, велесограммы и сейсмограммы, записанные на четырех пунктах регистрации – Ленинанкана, Джрашена, Гогарана и Кети при афтершоке с магнитудой 4.5 ( $m_b=4.7$ ), имевшем место 31 декабря 1988 года с координатами эпицентра  $40^{\circ}58'С$  и  $43^{\circ}58'В$  (велесограммы и сейсмограммы получены путем интегрирования акселерограммы). От эпицентра эти станции имеют почти одинаковое расстояние. В табл. 4 приведены результаты регистрации и интегрирования [9].

Данные табл. 4 показывают, что перемещения грунта в Ленинанкане в среднем в 8 раз оказалось больше, чем на других участках, подстилаемых скальным грунтом и расположенных на сравнимых расстояниях от эпицентра. Что касается ускорения грунта, то оно в Ленинанкане с учетом гипоцентрального расстояния в 1.5 раза больше, чем в Гогаране и Джрашене и, наоборот, в два раза меньше, чем в селе Кети.

Аналогичные результаты, когда ускорение грунта на скальных участках было больше, чем на аллювиальных участках (при небольших эпицентральных расстояниях до 50 км), были зарегистрированы и при других землетрясениях [25,26].

Наиболее отличительным признаком приведенных записей является то, что продолжительность колебаний грунта (по акселерограмме,

великограмме и сейсмограмме) в Ленинакане в два раза больше, чем в Кети, Гогаране и Джрашене.

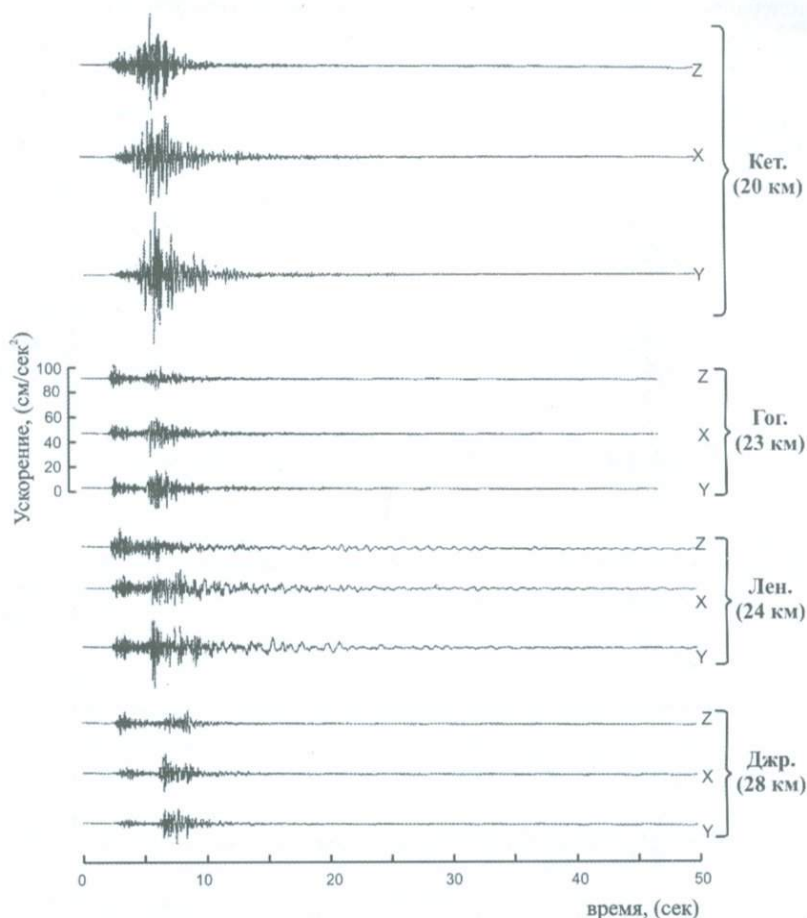


Рис. 30. Акселерограммы грунта, записанные в Кети, Гогаране, Ленинакане и Джрашене во время афтершока 31.12.1988 года [9].

Дополнительные сравнительные сведения о грунтовых условиях всех четырех участков регистраций можно исчерпать из спектрального анализа (разложение в ряд Фурье) записей. Результаты такого анализа на основании записанных акселерограмм (рис. 30) указанного афтершока показаны на рис. 33 [9], из которого видно, что в колебательном процессе грунта Ленинакана по сравнению с аналогичными в Кети, Гогаране и



Джрашене преобладают колебания с периодами от 0.5 до 2.5 сек (с частотами от 2 до 0.4 герц). Причем в этом диапазоне превалируют колебания с дискретными значениями периодов около 2.0 и 1.0 сек.

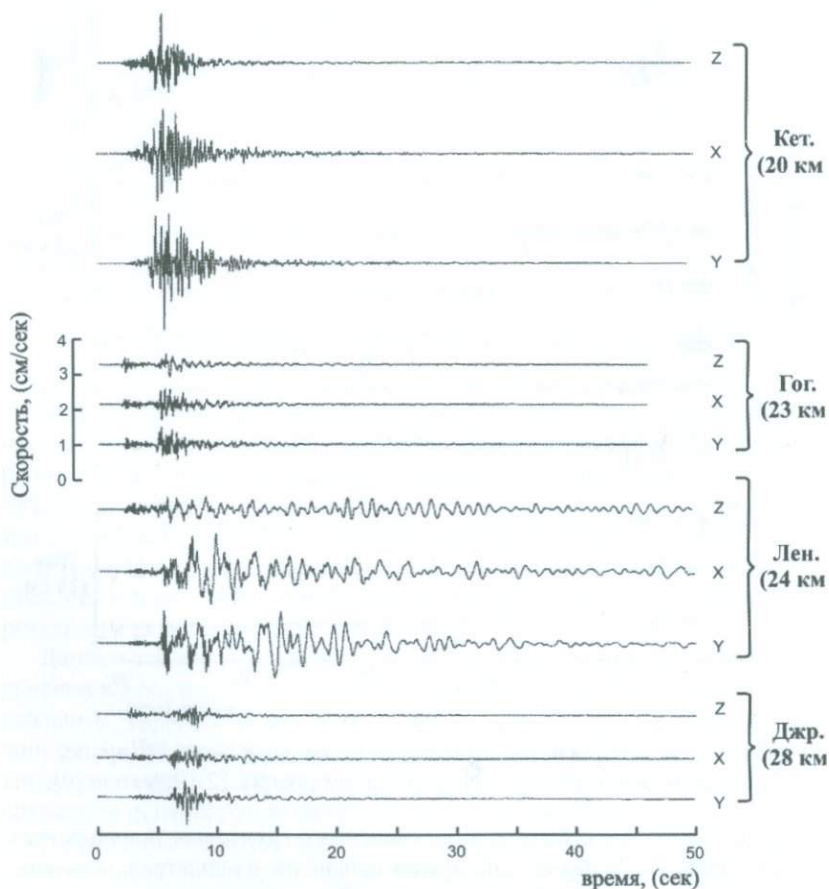


Рис. 31. Велисограммы грунта, вычисленные по акселерограммам, записанным в Кети, Гогаране, Ленинанкане и Джрашене [9].

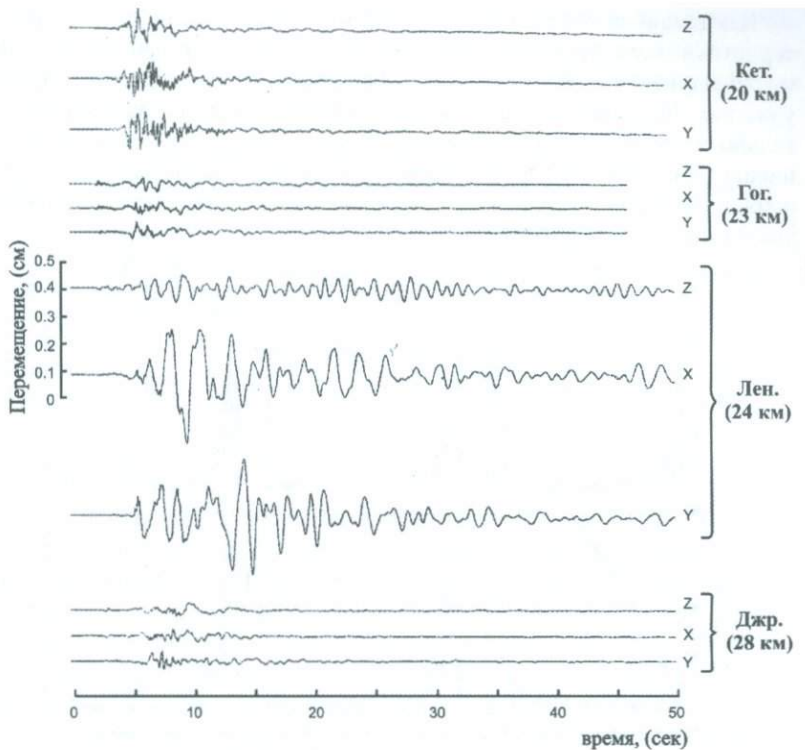


Рис. 32. Сейсмограммы грунта, вычисленные по акселерограммам, записанные в Кети, Гогаране, Лениакане и Джрашене [9].

Таблица 4. Результаты регистрации афтершока 31 декабря 1988 года [9]

Станция регистрации	ипоцентральное расстояние (км)	Максимальные значения								
		Ускорение грунта (см/сек <sup>2</sup> )			Скорость грунта (см/сек)			Перемещение грунта (см)		
		Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y
Кети	19.9	42	38	57	1.6	1.4	1.9	0.080	0.070	0.07
Гогаран	23.5	12	18	16	0.4	0.5	0.5	0.028	0.024	0.03
Ленинака	23.6	17	15	31	0.4	1.1	1.0	0.050	0.250	0.22
Джрашен	28.2	12	13	16	0.3	0.4	0.7	0.025	0.022	0.04

Как видно из последних двух графиков на рис. 33, частотные характеристики всех трех скальных участков Кети, Гогаран и Джрашен почти одинаковы. Анализ записей афтершоков, полученных в разных участках Лениакана (Мармарашен, Айгебац и др.), также дополнительно подтвердил вышесказанное. Результаты анализа записей афтершоков позволили также получить некоторые количественные оценки влияния локальных грунтовых условий на усиление или ослабление уровня сотрясения грунтов.

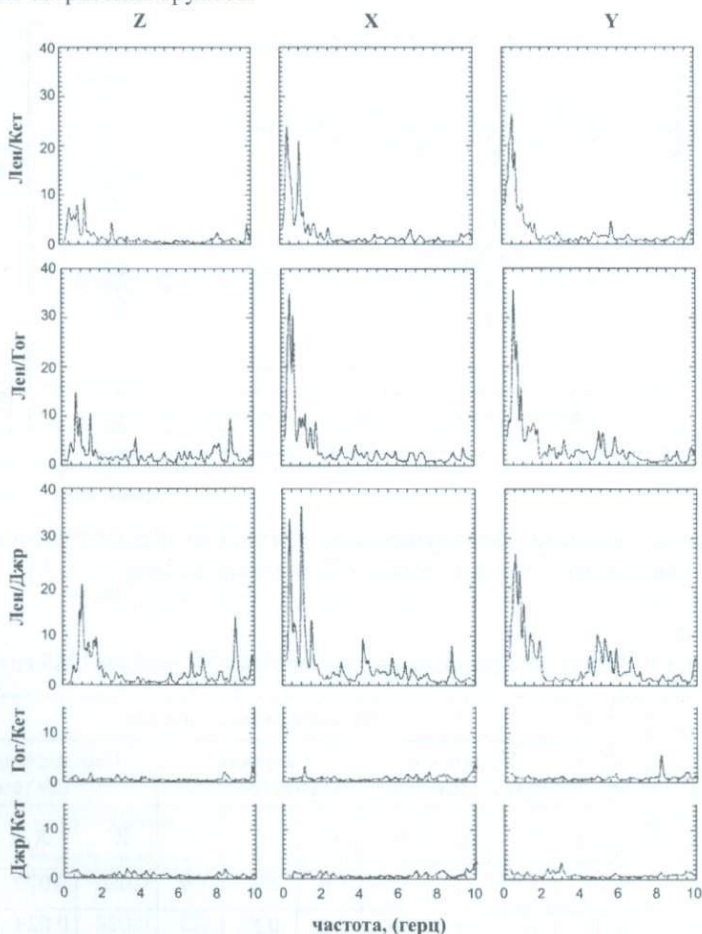


Рис. 33. Сравнительные спектральные анализы вертикальных (Z) и горизонтальных (X, Y) акселерограмм грунта, зарегистрированные в Кети, Гогаране, Лениакане и Джрашене от афтершока 31.12.1988 года [9].

В табл. 5 приведены сопоставительные данные, полученные на станциях Кети, Гогаран, Ленинанкан и Джрашен, заимствованные из вышеупомянутой статьи Р. Боччердта, Ж. Гласстоера, М. Андревса и Е. Гранника [9].

Таблица 5. Отношения амплитуд колебаний, зарегистрированные в разных местах при афтершоке 31.12.1988 [9]

Место регистрации	Величина фактора дальности	Отношения наибольших амплитуд								
		по ускорениям			по скоростям			по перемещениям		
		Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y
Лен./Кет.	1.19	0.5	0.5	0.6	0.3	0.9	2.2	0.7	4.2	3.7
Лен./Гог.	1.00	1.4	0.8	1.9	1.0	2.2	2.0	1.8	10.4	5.9
Лен./Джр.	0.84	1.2	1.0	1.6	1.1	2.3	1.0	1.7	9.5	4.4
Среднее значение		1.0	0.8	1.4	0.8	1.8	1.7	1.4	8.0	4.7

Из таблицы видно, что амплитуды ускорений в трех направлениях X, Y, Z в аллювиальных грунтах Гюмри по сравнению со скальными грунтами Гогарана, который находится на одинаковом расстоянии от эпицентра, как и Ленинанкан, в 1.4, 0.8, 1.9 раза больше, а амплитуды перемещений грунтов в Ленинанкане превосходят амплитуды Гогарана в значительно большей степени – соответственно в 1.8, 10.4 и 5.9 раза. Данные таблицы показывают, что при эпицентральных расстояниях до 30 км и магнитудах землетрясений  $M=4-5$  ускорения на аллювиальных грунтах, по отношению к скальным грунтам, в среднем могут расти до 1.4 раза, максимум – до 1.9 раза. Такие отношения регламентируются нормами сейсмостойкого строительства многих стран, в том числе нормами Республики Армения. Что касается перемещений грунта, то в рыхлых грунтах они могут до 10 раз превышать перемещение в скальных грунтах. Более подробный анализ данных табл. 5 с учетом геологических особенностей грунтовых условий станций приводится в упомянутой статье [9].

## 6. Разрушительные последствия землетрясения

Спитакское землетрясение причинило тяжелые разрушения жилым, гражданским, промышленным, сельскохозяйственным зданиям и сооружениям, объектам жизнеобеспечения, связи, транспорта, историко-архитектурным памятникам. Обвалились тысячи жилых домов, школ, больниц, детских садов, оставив под обломками тела людей, материальные и исторические ценности.

Наибольшие тяжелые повреждения во время Спитакского землетрясения имели место в трех городах – Спитаке, Ленинанкане и Кировакане.



Их расстояния от зоны разрыва соответственно составляли: 1-9 км для Спитака, 32 км для Ленинанкана и 25 км для Кировакана. В геологическом отношении Спитак и Кировакан расположены вдоль рек, в районах с горным рельефом. Топография около Спитака не такая расчлененная, как в Кировакане. Большая часть территории обоих городов расположена на старых речных террасовых отложениях с мощностью до десятков метров, на тонких почвенных слоях или на породе, составляющей окружающие холмы. Большая часть сооружений в Кировакане, вероятно, возведена на скальных грунтах. Ленинанкан расположен на обширной аллювиальной равнине. Региональные геологические разрезы указывают на то, что он находится в бассейне с осадочными образованиями, достигающими глубин 3-4 км. Близкие к поверхности геологические разрезы, согласно данным Геологического управления Армянской ССР, показывают мощные слои аллювия (пески, глина, гравий, суглинки, озерные отложения), простирающиеся до глубины 300-400 м под большей частью города Ленинанкана. Кроме того, Кировакан расположен на узкой долине прямо напротив высоких гор, а Ленинанкан – в широкой котловине [1,3,9].

Среди специалистов по сейсмостойкому строительству и особенно среди сейсмологов распространено мнение, что указанные географо-геологические особенности этих городов не могли не влиять на поведение зданий и сооружений в смысле их сопротивления землетрясениям. Более того, по мнению специалистов по сейсмостойкости церковных сооружений значительная часть энергии землетрясения разряжается в геологических структурах, вследствие чего церковные сооружения, построенные на склонах и вершинах ущелий, пострадают от землетрясения больше, чем построенные на равнинах.

Ответы на такие вопросы не могут быть однозначным, так как основным фактором, приводящим к повреждениям и разрушению того или иного сооружения, возведенного в том или ином месте, является уровень сейсмического воздействия (максимальное ускорение основания и его частотный состав) и динамические и прочностные характеристики самого сооружения. Поэтому нижеприведенный анализ повреждений будет проведен именно с этих позиций. С этой целью на следующих рисунках (рис. 34-41) приведены результаты экспериментальных исследований по измерению микроколебаний строительных площадок и их аналитическим расчетам на основании данных литологических колонок в городах Ленинанкан, Кировакан и Спитак [18].

Из общего числа современных многоэтажных зданий обрушились или сильно пострадали в Спитаке 87%, в Ленинанкане 52%, в Кировакане 24%. Большой масштаб разрушений в Спитаке можно объяснить близостью города к зоне разрыва. Важным наблюдением является то, что

масштаб разрушений в Ленинакане был больше, чем в Кировакане, который, как сказано выше, находился ближе к зоне разрыва, чем Ленинанкан. Особенно плохо себя проявили каркасно-панельные 9-этажные здания серии 111 в Ленинакане, где обрушились все 133 здания этой серии. В Кировакане ни одно из зданий этой серии не разрушилось и не получило серьезных повреждений. Причины большой уязвимости зданий этой серии в Ленинакане, помимо нерациональности их конструктивного решения и низкого качества строительства, является, то, что для этих зданий имело место существенное увеличение сейсмического воздействия из-за совпадения периодов колебаний этих зданий с периодами колебаний грунта во время землетрясения (резонанс). Как отмечено выше, в Ленинакане при афтершоках преобладали колебания грунта с периодами от 0.5 до 2.5 сек. К таким выводам привели и многочисленные измерения и анализ мокроколебаний грунтов в городах Ленинанкан, Спитак и Кировакан (рис. 34-40), произведенные непосредственно после землетрясения группой японских специалистов [2,22,25]. Согласно этим измерениям, преобладающие периоды колебаний грунтов в Ленинакане составили 0.5-0.6 сек (приведенные в [18] расчеты свидетельствуют, что эти значения периодов соответствуют второй форме колебания грунтовой толщи (как это видно из рис. 39,40)), в Спитаке – 0.2-0.3 сек, в Кировакане – 0.2-0.4 сек. Вибрационные и микросейсмические испытания зданий серии 111, проведенные в Ереване 1978-1987 годах до землетрясения, показали, что их периоды находятся в диапазоне 0.55-0.75сек (в зависимости от уровня воздействия). Учитывая большую продолжительность землетрясения особенно в Ленинакане (см Рис. 32), возрастание уровня воздействия для этих зданий из-за резонанса в Ленинакане имеет большую вероятность. В пользу предложения, что главной причиной массового разрушения 9-этажных зданий серии 111 были их резонансные колебания, свидетельствует и то обстоятельство, что несколько зданий той же серии и конструктивного решения, построенные в Ленинакане, но имеющие **5 этажей** (их период почти в 2 раза меньше, чем 9 этажных) не обрушились и получили только незначительные повреждения. Как было отмечено выше о большой вероятности резонанса зданий 111 в Ленинакане свидетельствуют и записи сейсмометров СБМ и ИГИС (рис. 25, 26). Для маятника СБМ с периодом свободных колебаний 0.25 сек на записи (рис. 25) одно максимальное значение из десятки амплитуд, а на записи маятника ИГИС с периодом свободных колебаний 0.8 сек (рис. 26) десятки максимальных значений, что характерное явление при резонансных колебаниях. Что касается 9-этажных крупнопанельных зданий в Ленинакане, то кроме других известных преимуществ, их периоды (0.34 сек) в 1.5 раза меньше,

чем 9-этажных зданий серии 111, т.е. для них явление резонанса маловероятно. Отметим, что два крупнопанельных здания не обрушились и в Спитаке, несмотря на большую интенсивность (0.8 g), они получили серьезные повреждения и в дальнейшем были снесены. Другой причиной больших повреждений в Ленинакане, на которое не обращается внимание, на наш взгляд, является то, что в течение первых 30 сек основного события (толчка) произошли 3 подсобытия, причем третье из них произошло через 10 сек (в момент начала самых больших ускорений на акселерограмме, записанной в Гукасяне – рис.3.24) после первого, эпицентр которого находился в 30 км к западу от первого события, т.е. на расстоянии всего 10-12 км от Ленинакана. Это означает, что эпицентральное расстояние (при третьем подсобытии) для Ленинакана было не 32 км, как отмечено выше, а 10-12 км и, наоборот, эпицентральное расстояния для Кировакана при этом событии было не 25 км, а примерно 40 км.

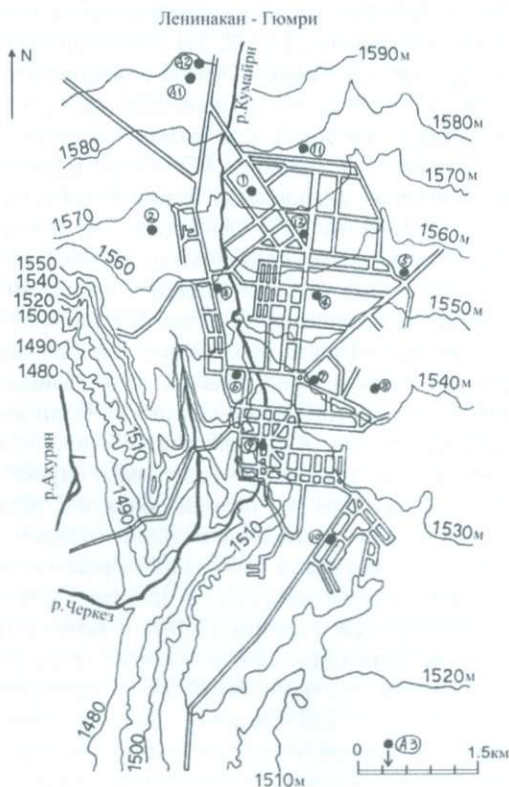


Рис. 34. Расположение участков записи микроколебаний в г. Ленинакане-Гюмри [246].



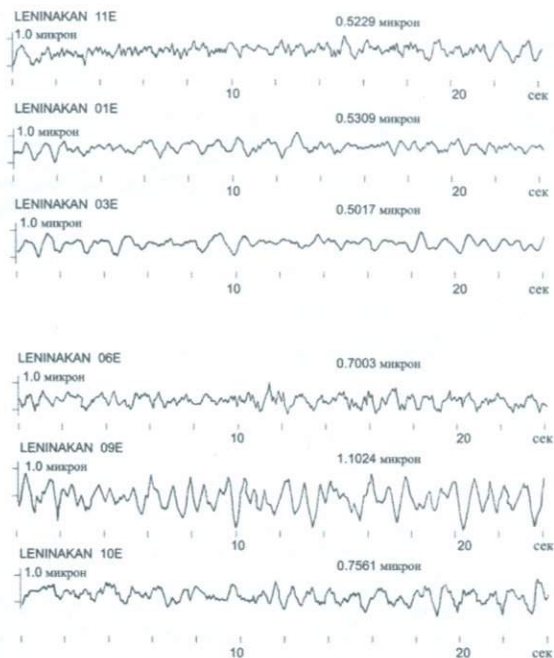


Рис. 35. Записи микроколебаний в г. Ленинакане [246].

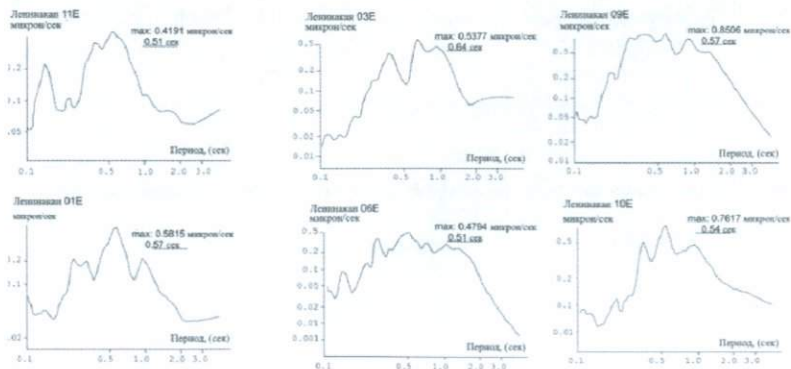


Рис. 36. Результаты гармонического анализа микроколебаний в центральной (старой) части г. Ленинакана [246].



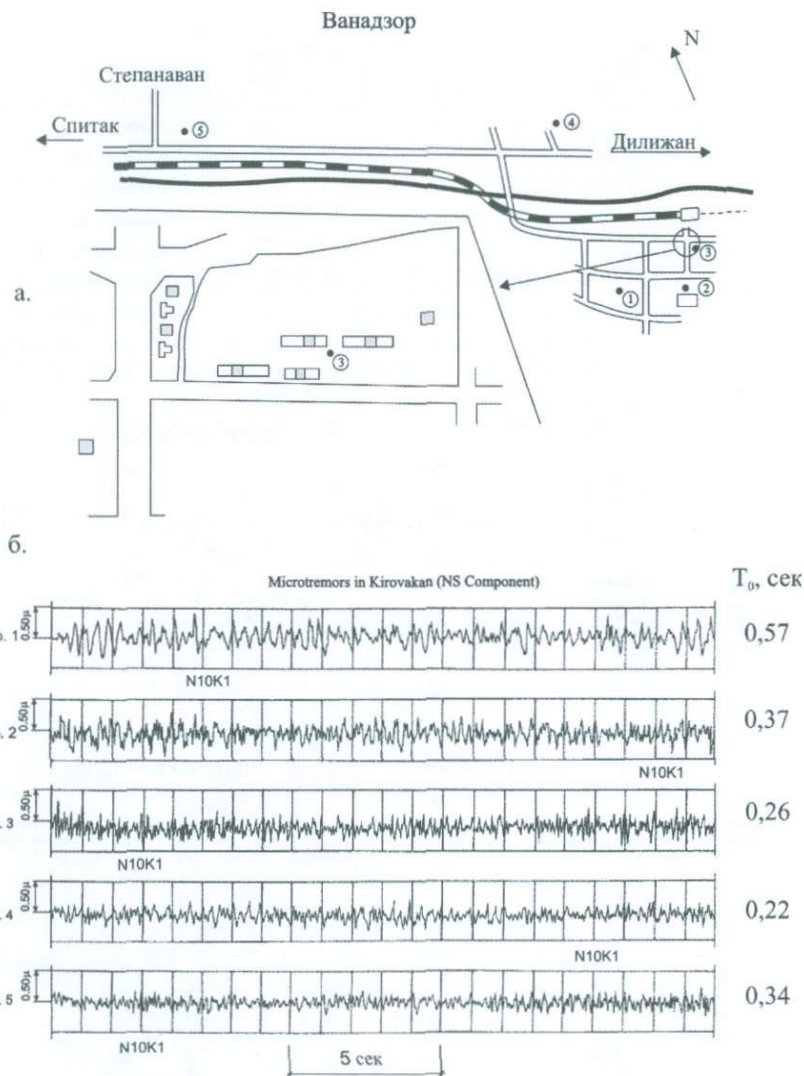


Рис. 37. Расположение участков (а), записи микроколебаний (б) и величины их преобладающих периодов г. Кировакан-Ванадзор [214, 244, 246].

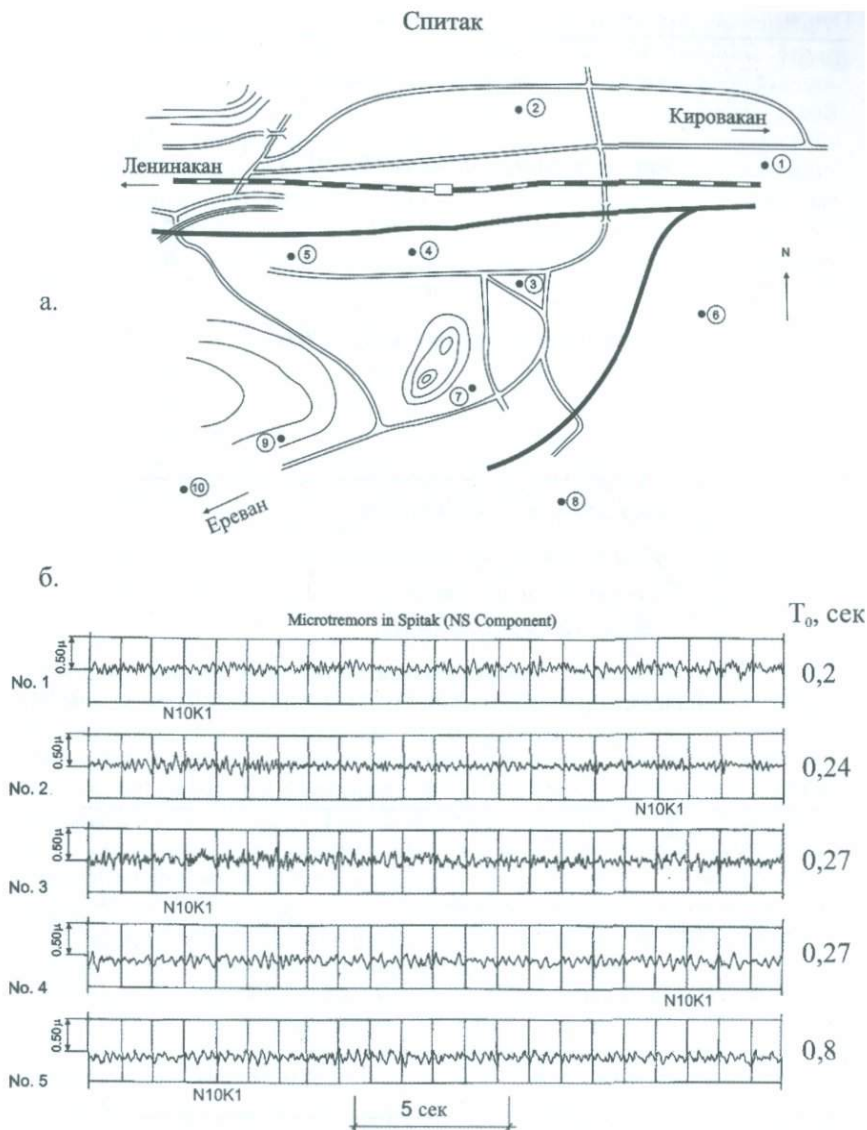
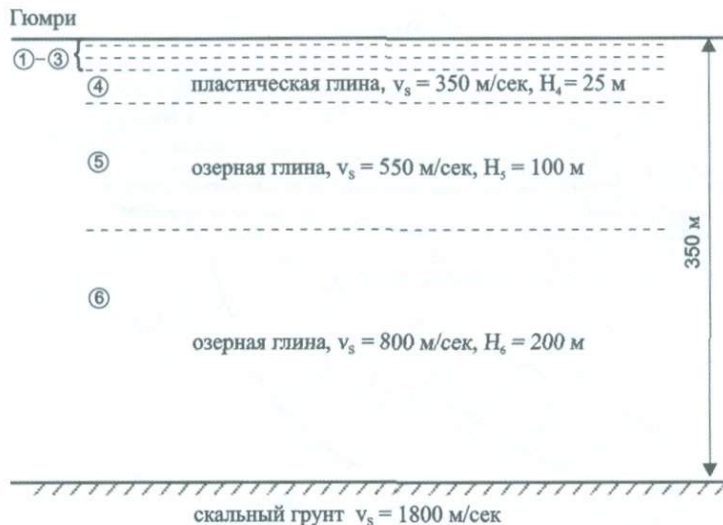


Рис. 38. Расположение участков (а), записи микроколебаний (б) и величины их преобладающих периодов г. Спитак [214, 244, 246].



① песок,  $H_1 = 5.5$  м,  $v_s = 200$  м/сек

② глина,  $H_2 = 7.0$  м,  $v_s = 300$  м/сек

③ туф,  $H_3 = 12.5$  м,  $v_s = 450$  м/сек

Рис. 39. Геологический разрез центральной части города Гюмри и расчетные значения преобладающих периодов:  $T_{01} = 1.869$  сек,  $T_{02} = 0.751$  сек,  $T_{03} = 0.455$  сек. [18].



Рис. 40. Геологический разрез участка Мармашен города Гюмри и расчетные значения преобладающих периодов:  $T_{01} = 0.428$  сек,  $T_{02} = 0.17$  сек,  $T_{03} = 0.084$  сек. [18].

В заключение остановимся еще на одном обстоятельстве, связанном с **периодом колебаний поврежденных и неповрежденных зданий**. Такие отношения периодов можно использовать для инструментальной оценки степени повреждения зданий после землетрясения. В частности, такой способ оценки повреждений предусматривается нормами сейсмостойкого строительства Армении. В качестве неповрежденных зданий принимались здания, построенные в Ереване, а поврежденных – их типовые близнецы в городах Ленинакан и Кировакан. Были использованы результаты измерений японских специалистов, проведенные в феврале 1989 года совместно с сотрудниками АрмНИИСА с нашим участием. В Ереване были измерены периоды двух 5-этажных каменных зданий серии IA-451, четырех 9-этажных зданий серии III и двух крупнопанельных зданий серии AI-451КП, в Кировакане четырех каменных (поврежденных), зданий серии III (поврежденных) и в Ленинакане одного крупнопанельного (поврежденного) здания. После землетрясения в центральной части Ленинакана не оказалось полностью разрушенных зданий серий IA-451 и III для измерения их периодов.

Периоды всех зданий измерялись как в продольном, так и в поперечном направлениях. Среднее значение периода колебаний (независимо от направления) неповрежденных 5-этажных каменных зданий (в Ереване) оказалось 0.295 сек, поврежденных (в Кировакане) 0.461 сек, неповрежденных 9-этажных серии III – 0.578 сек, поврежденных – 0.886 сек, неповрежденных 9-этажных крупнопанельных – 0.382 сек, поврежденных (в Ленинакане) – 0.430 сек. Сводные результаты сравнительного анализа приведены в табл. 6 Таким образом, **наибольшее увеличение периода свободных колебаний в результате землетрясения имело место для каменных зданий в 1.56 раза, далее для сборных каркасных зданий в 1.53 раза и наименьшее увеличение для крупнопанельных зданий в 1.12 раза**. Из этих зданий каменные в результате землетрясения получили повреждения 3-4-й степени (в Кировакане), каркасные – 2-3-й степени (в Кировакане), а крупнопанельные – 1-2-й степени (в Ленинакане) по шкале повреждений норм сейсмостойкого строительства Республики Армения [24].

После Спитакского землетрясения было много споров и о его изосейстах. Было составлено много вариантов изосейст. Они сильно отличались в основном относительно территории города Ленинакана. Не останавливаясь подробно на вариантах изосейст, учитывая, что их составление всегда носит сугубо индивидуальный и субъективный характер, на рис.34 показана одна из схем изосейст, составленная группой советских и иностранных специалистов непосредственно в первые дни после землетрясения [2], которая более или менее соответствует реальному распределению повреждений.



Таблица 6. Периоды свободных колебаний поврежденных и не поврежденных зданий

Конструктивное решение здания	Периоды свободных колебаний (средние), в сек		Увеличение периода колебания здания в результате его повреждения, в %
	неповрежденного здания	поврежденного здания	
5-этажные каменные здания серии 1А-451	0.295	0.461	56.3
9-этажные каркасно-панельные здания серии 111	0.578	0.886	53.3
9-этажные крупнопанельные здания серии А1-451КП	0.382	0.430	12.5

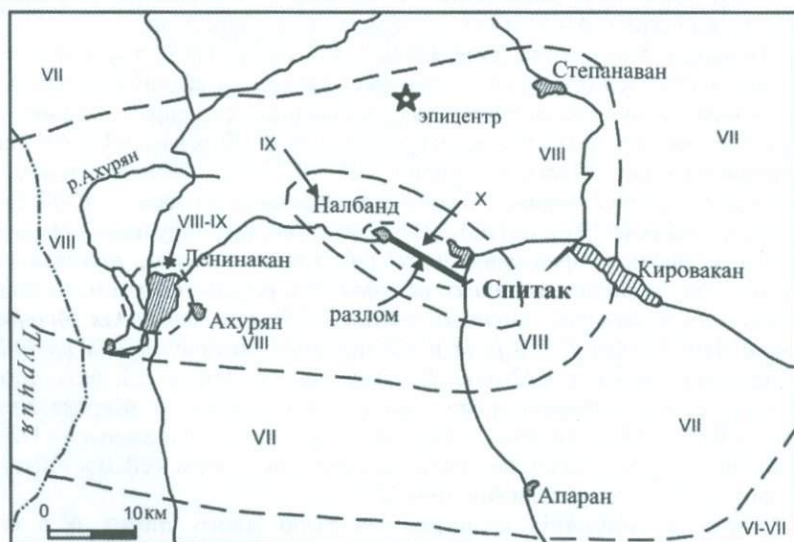


Рис. 34. Изосейсты Спитакского землетрясения [2].

Первое заключение об интенсивности Спитакского землетрясения и причинах массовых разрушений было составлено уже 15 декабря 1988 г. группой ученых бывшего СССР в составе Т.Р. Рашидова, Б.К. Карапетяна, М.У. Ашимбаева, Н.Н. Бургмана, Б.Е. Денисова, Т.Ж. Жунусова, А.А. Иманходшаева, Л.С. Килимника, В.А. Ржевского, А.О. Саакяна, Р.О. Саакяна, Э.Е. Хачияна, Г.Х. Хожметова, С.Г. Шагиняна, согласно

которому интенсивность землетрясения в эпицентральной зоне была не менее 10 баллов, а в Ленинакане не менее 9 баллов.

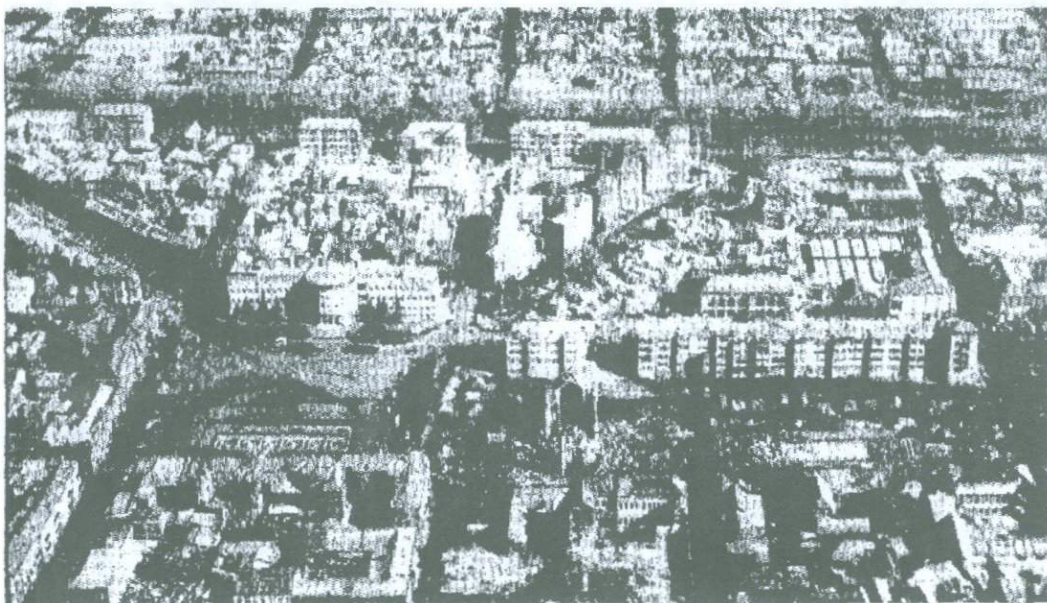
В первые дни трагедии большую работу по оказанию технической помощи Армении, в том числе по обследованию технического состояния зданий и сооружений в зоне бедствия, провели специалисты Министерства обороны СССР под руководством генералов К.М. Вертелева и В.С. Удальцева.

Более подробные сведения о характерах и причинах повреждений и разрушений каменных, железобетонных жилых и общественных зданий, транспортных и гидротехнических сооружений, историко-архитектурных памятников, составленные Т.Г. Маркаряном, Л.А. Давтяном, Р.А. Бадалян, Р.С. Азояном, Г.С. Шестопёрвым, А.М. Аветисяном, А.Н. Саркисяном, С.Г. Шагиняном, Р.Н. Арутюняном, С.Г. Азизяном, В.И. Григорьяном приведены в книге “Трагедия Спитака не должна повториться”, изданной под редакцией Э.Е. Хачияна к 10-летию землетрясения в 1998 году [11].

До этого в советских и иностранных научных журналах и сборниках, газетах и научно-популярных изданиях были опубликованы многочисленные статьи и сообщения об инженерном анализе последствий Спитакского землетрясения, авторами которых являлись: Я.М. Айзенберг, Р.О. Амасян, Г. Аминтаев, Р.А. Атабекян, Ф.О. Аракелян, М.У. Ашимбаев, Н.Н. Бургман, В.Г. Григорян, В.Г. Гарибян, Б.Е. Денисов, Н.Я. Дорман, А.М. Жаров, Т.Ж. Жунусов, В.Б. Заалишвили, Р.А. Затикян, В.А. Ильичев, Г.А. Казина, Б.К. Карапетян, М.Х. Карапетян, Л.Ш. Килимник, М.А. Клячко, В.Т. Корнилов, Л.А. Манукян, А.В. Манукян, А.Н. Мартемянов, М.А. Марджанишвили, Л.Н. Махатадзе, А.М. Мелентев, М.Г. Мелкумян, В.С. Микаелян, Э.Л. Микаелян, В.Л. Мнацаканян, Г.С. Мурадян, Т.Н. Мухадзе, Л.А. Мхитарян, Д.А. Мхитарян, С.Н. Назаретян, А.А. Овсепян, С.М. Оганесян, Н.Л. Оганесян, В.Н. Ойзерман, А.С. Платонов, А.С. Поляян, С.В. Поляков, В.А. Ржевский, Е.А. Теняев, К.А. Тоноян, А.М. Уздин, Ш.А. Хакимов, С.О. Хачатрян, З.М. Хлгатян, И.Ф. Цепенюк, Г.Ш. Чануквадзе, В.М. Черкасов, В.В. Чугурян, В.В. Штейнберг, А.С. Юзбашян и большая группа иностранных специалистов [2]. О Спитакском землетрясении было написано много статей, и вряд ли кому-нибудь удалось бы проследить за всеми публикациями. Поэтому прошу прощения у тех авторов, фамилии которых здесь не упомянуты.

В последующих страницах показан ряд характерных иллюстраций последствий землетрясения, которые, по нашему мнению, не нуждаются в комментариях.

## РАЗРУШЕНИЯ, ПРИЧИНЕННЫЕ СПИТАКСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ



Панорама центральной части города Гюмри с высоты птичьего полета после Спитакского землетрясения 07.12.1988

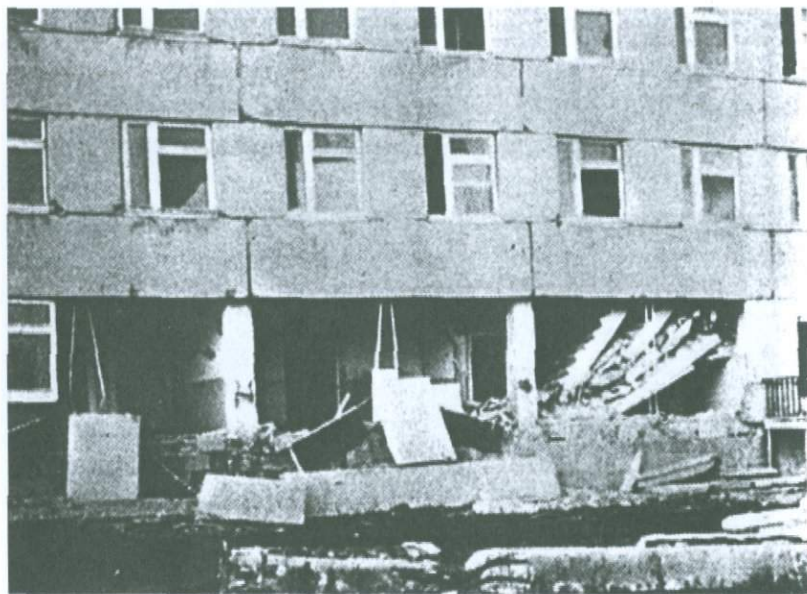


Разрушения причинённые  
Спитакским землетрясением  
Каменным зданиям





## Каменные здания



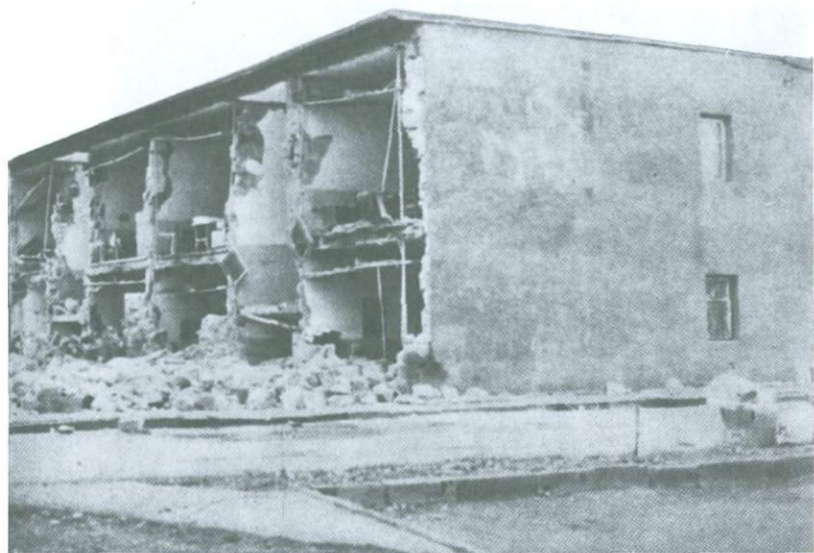
## Каменные здания



## Каменные здания



## Каменные здания





## Индивидуальные сельские дома



## Железобетонные здания



## Железобетонные здания

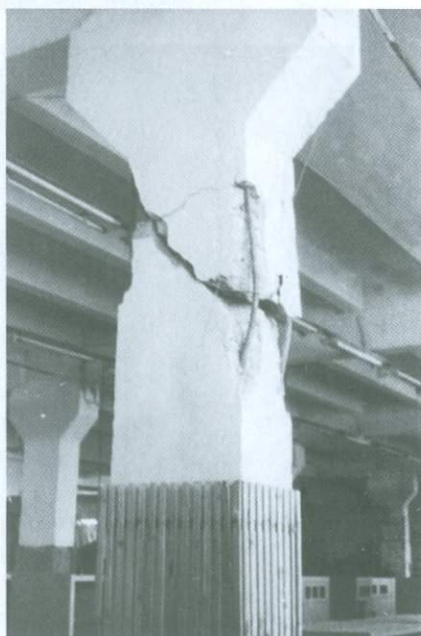


## Железобетонные здания





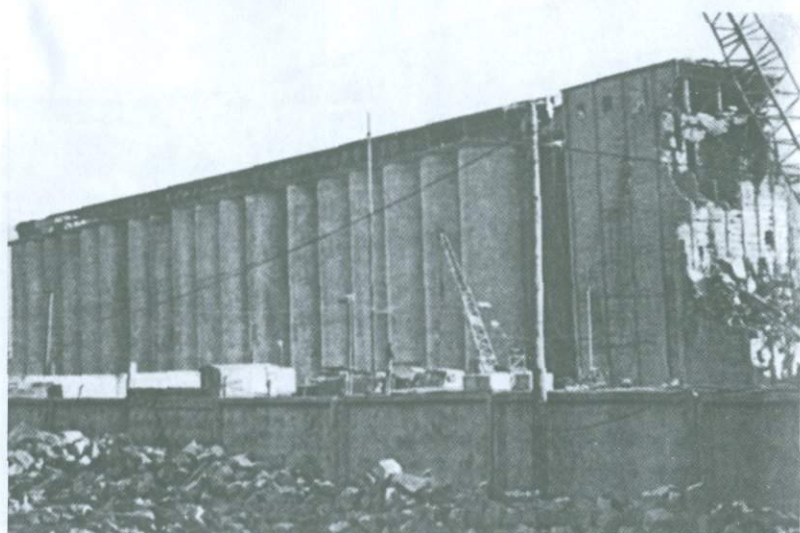
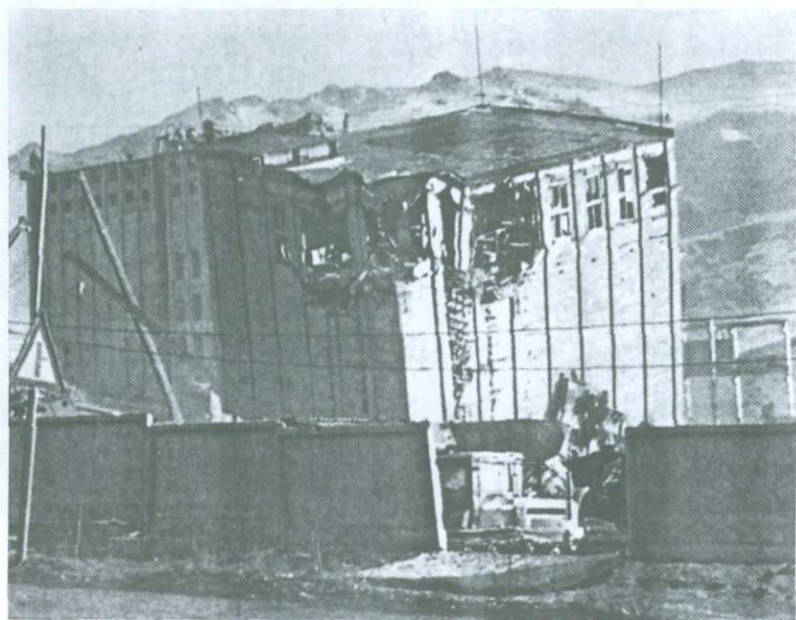
## Железобетонные здания



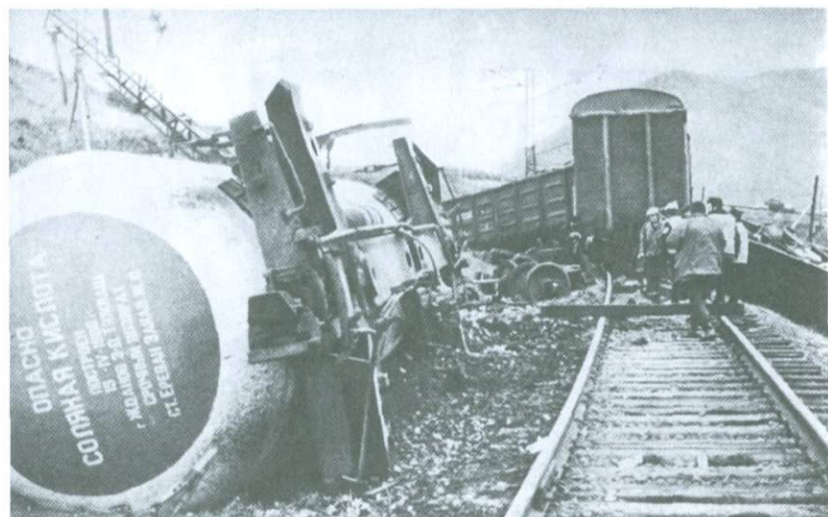
## Железобетонные здания



## Промышленные здания

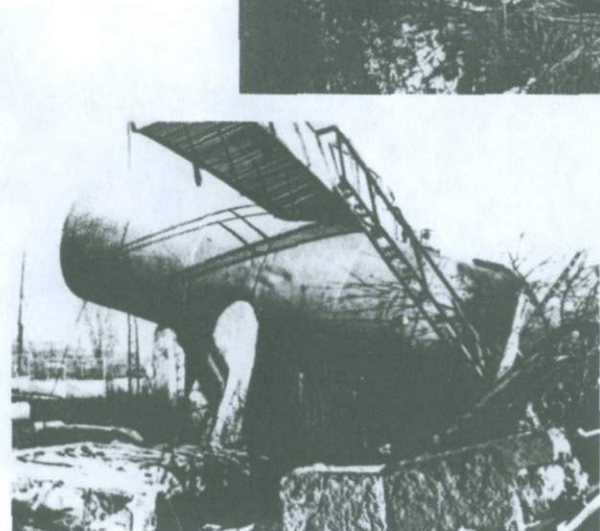
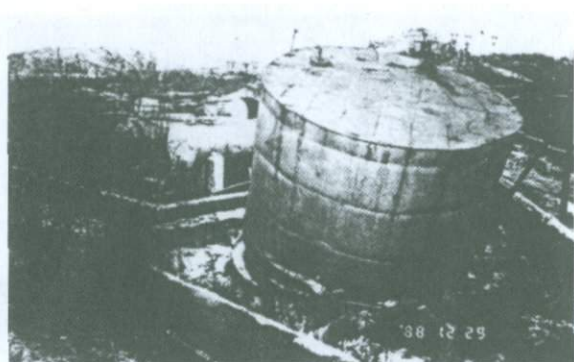


## Опрокидывание железнодорожных вагонов

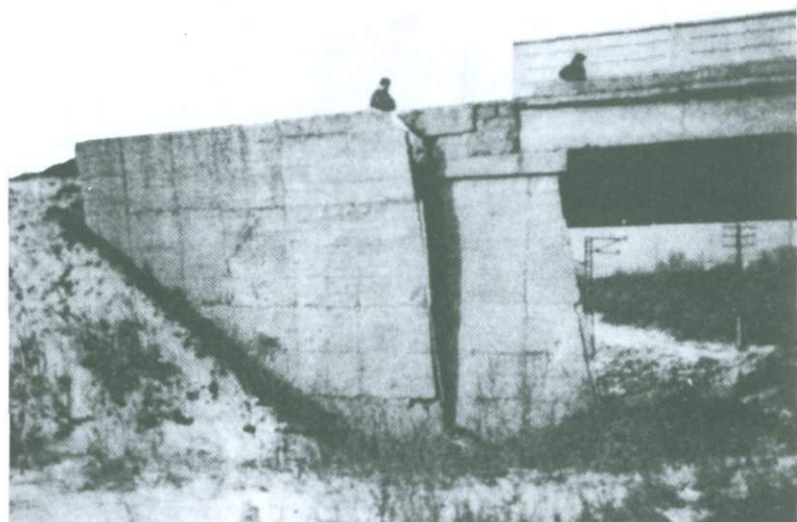




## Инженерные сооружения



## Мосты и туннели



## Здания церквей



## 7. Социально-экономические последствия землетрясения

От землетрясения пострадало более 40% территории РА, где проживало более одного миллиона людей. Жертвой землетрясения стали более 25 тысяч людей, 19 тысяч были ранены и более чем 500 тысяч остались без крова. Самое печальное, что погибло много детей. Из-под завалов извлечено 39755 пострадавших, спасена жизнь почти 16000 человек, госпитализировано 12495 пострадавших. Из зоны бедствия было эвакуировано 119474 детей, женщин и стариков, часть которых была вывезена за пределы Армении. Полностью и частично были разрушены 21 город и райцентры, 324 села. Полностью был разрушен город Спитак и прилегающие к нему села. Более 20% жилищного фонда вышло из строя или получило тяжелые повреждения.

Таблица 7. Общий объем ущерба Спитакского землетрясения [28]

Территория, подвергнутая землетрясению	Число жителей		Жилые дома		Промышленные и сельскохозяйственные предприятия		Общественные здания и сооружения		Процент разрушения
	Полное	Погибли	Построено	Разрушено	Построено	Разрушено	Построено	Разрушено	
Спитак	18500	9733	433	433	9	6	28	24	100
Ленинакан	232000	9974	12450	11250	40	40	669	323	75
Кировакан	171000	420	7162	2333	34	6	456	-	25
Степанаван	21000	63	2134	1430	9	1	134	12	67
Сельская местность	146500	4352	29533	20094	1404	1293	581	186	34
Вся зона воздействия	589000	24542	51712	35395	1496	1348	1868	540	60

Подверглись сильным повреждениям более 2 тысяч школ, детских садов, объекты медицинского и бытового обслуживания, культуры и торговли. Общая картина ущерба, причиненная землетрясением, приведена в табл. 7. От землетрясения в целом пострадало 9 млн. квадратных метров жилплощади, из коих 4.7 млн. квадратных метров или полностью вышли из строя, или подлежали сносу из-за сильных повреждений (аварийность). Полностью или частично разрушено 230 промышленных, 80 перерабатывающих объектов и 300 коллективных сельских хозяйств, 224 животноводческие фермы. Вышли из строя или были



разрушены объекты сети водо-, тепло- и газоснабжения, линии электропередач, более 600 км автодорог, 10 км железнодорожных путей, 13 узлов связи. Общая сумма ущерба от землетрясения составила более чем 13 миллиардов рублей по валюте бывшего СССР 1988 года. После землетрясения было много разговоров (они продолжаются и по сей день) о сравнительно большом числе человеческих жертв и объеме материального ущерба по сравнению с другими землетрясениями той же силы. *Мы уже отметили, что в этом деле существенную роль играли низкий нормативный уровень сейсмической опасности и недостаточный запас несущей способности, принятой при проектировании объектов на всей территории зоны бедствия, предусмотренные нормами СССР [23] неудовлетворительное конструктивное решение зданий и качество строительства, неблагоприятное сочетание динамических характеристик грунтов и зданий, приводящих к резонансным явлениям, и, наконец, отсутствие эффективных спасательных служб и медицинской помощи в первые часы землетрясения [11].* Немалую роль играло и время землетрясения. В зоне бедствия были разрушены и пришли в аварийное состояние общеобразовательные школы на 210 тыс. уч. мест. В момент землетрясения в 11 часов 41 мин. местного времени все ученики находились непосредственно на классных занятиях. Случилась бы беда на несколько минут позже, во время перемены, жертв среди учеников было бы значительно меньше. Но нам кажется, что в этих сравнительных оценках с другими землетрясениями кроется еще одно существенное упущение. Ведь, как было сказано, 7 декабря 1988 года на территории Армении произошло *не одно, а два землетрясения с магнитудами  $M=6.8$  и  $M=6.25$ , с худшим, с точки зрения безопасности людей, промежуток времени между ними – всего 4 мин и 21 сек.* Как было отмечено выше этот афтершок причинил обширный дополнительный значительный ущерб зданиям и сооружениям, уже ослабленным или поврежденным главным толчком. Естественно, он и стал причиной смерти тысяч людей. Многие в ходе эвакуации из поврежденных, но все еще устоявших зданий, не успев покинуть их, были накрыты окончательными разрушениями от этого мощного афтершока. Кроме того, как видно из табл.1, в течение первых 24 часов с начала землетрясения произошли по крайней мере 10 форшоков с магнитудами 4.5-5.0, которые стали еще одной, дополнительной причиной роста повреждений и гибели людей. Это означает, что в течение одних суток произошли 10 землетрясений с интенсивностью VII-X баллов, что, по нашему мнению, является одной из основных причин большого объема разрушений и числа жертв при Спитакском землетрясении. Если бы в этот день произошло только второе землетрясение с магнитудой  $M=6.25$ , то еще неизвестно сколько было бы число жертв

(см. также 2). В частности, при землетрясении в Баме (Иран) 26.12.2003 года с такой же магнитудой  $M=6.3$  погибло более 50000 человек. Поэтому при таких формальных сравнениях число жертв и объем ущерба в случае Спитакского землетрясения минимум надо разделить пополам.

Мировой опыт и статистика позволяют приближенно оценить следующие людские потери *в городах развивающихся стран*:

- при умеренных землетрясениях (8 баллов по шкалам MSK и ESC) погибает в среднем 0.5% населения, 2% получают серьезные ранения;
- при сильных землетрясениях (9 баллов) погибает в среднем 5% населения, 20% получают серьезные ранения.

Нам кажется, что данные таблицы 7 о числе погибших во время Спитакского землетрясения укладывается в такую статистическую оценку»

Столь катастрофическое стихийное бедствие оказало сильное отрицательное воздействия на рождаемость и перепроизводство населения, на демографическое положение страны и на нервно-психическое состояние людей. Армяне, известные своим трудолюбием и энергичностью, в дни землетрясения оказались беспомощными и не в силах даже восстановить свой собственный дом. Пострадавшим необходимо было не только экстренная медицинская помощь (хирургическое вмешательство и переливание крови), но и психологическая помощь. Особенно это касалось детей и людей, потерявших родных и близких. Рассказывали, что у одной девочки по имени *Гаяне*, выжившей после недельного пребывания под обломками, было шоковое состояние и исчезли все человеческие реакции. Но достаточно было непродолжительное общение с московскими психологами *Ф. Коньковым* и *В. Конюцкиным*, как она заговорила в первый же день.

И еще об одной экстремально-психологической ситуации, имевшей место в Армении в тяжелые декабрьские дни 1988 года. По распоряжению прокурора по надзору за соблюдению законов в исправительно-трудовых учреждениях *Степана Мнацаканяна* осужденным, отбывающим наказание в ИТУ и имеющим родных и близких в зоне землетрясения, с 8 декабря, с целью предотвращения их самовольного ухода, были предоставлены краткосрочные отпуска (до 7 дней) для поиска родных и близких по месту проживания. После истечения срока отпуска из 288 осужденных не вернулись только двое, причем один осужденный нашел и сдал государству сейф с 40 тысячами рублей. Ни один осужденный не был уличен в мародерстве или ином преступлении.

Спитакское землетрясение одновременно выявило недопустимый низкий уровень подготовленности органов государственного управления Армянской ССР и населения в целом к чрезвычайным условиям, вызываемым стихийными бедствиями.



## 8. Международная солидарность и неотложная помощь зоне бедствия

Спитакское землетрясение и его тяжелые последствия вызывали огромный международный отклик во всем мире. Это были времена конца “холодной войны” и начала демократических преобразований во всей политической и общественной жизни СССР. Армения была в первых рядах этих процессов своими многотысячными мирными митингами и демонстрациями, направленными на справедливое разрешение Карабахского вопроса. Землетрясение стало причиной своеобразной беспрецедентной солидарности с Арменией, которая спонтанно возникла во всем мире. Со всех концов СССР и всего мира руку помощи армянскому народу протянули тысячи людей, спасатели, врачи, научные работники, парламентарии, министры и главы правительств, работники искусства и культуры, студенты и школьники. Армения в качестве помощи в большом количестве получала кровь для переливания, продукты питания, одежду, лекарства и медицинское оборудование, средства связи, палатки и домики, достроительные комбинаты и технологическое оборудование. Координацию работ по оказанию помощи возглавлял председатель правительства СССР **Н.И. Рыжков**, внесший огромный вклад в оказание помощи населению в первые часы и дни после землетрясения. В первые минуты и часы после трагедии с продуктами питания и одеждой на помощь спешили представители *соседней Грузии*. В спасательных работах принимали активное участие представители Франции, Греции, США, Англии, Канады, Австрии, Италии, Алжира, Югославии, Польши и других стран. Их самоотверженным трудом были спасены жизни тысяч людей. Грандиозную работу по доставке помощи совершили сотни летчиков из разных стран, совершив более 900 авиарейсов. Беспрецедентным по своим масштабам была медицинская помощь. В зону бедствия прибыли 417 врачей из 17 зарубежных стран. Грузия направила в зону бедствия 25 машин «Скорой помощи» с бригадами врачей. В течение суток работали более 6000 врачей, для госпитализации было развернуто около 10 тыс. коек. В оказании неотложной медицинской помощи пострадавшим самоотверженную работу провели **Е.И. Чазов, П.И. Черняев, Л. Рошаль (Россия), О. Гудушаури (Грузия), К.Н. Козбе и И.В. Тофану (Молдавия), Нгуен Хан Цзы (Вьетнам), Мики Винер (Израиль)** и др. Из зоны бедствия 40 тыс. человек были эвакуированы в Грузию, Крым, Ставропольские и Кубанские края. Сотни детей и раненые получили медицинскую помощь в больницах США, Италии, Франции, Германии и других стран. Материальная помощь зарубежных стран составила 500 млн. долларов, финансовая помощь – 80 млн долларов. **Помощь армянской диспаноры – 50 млн долларов.** Общая сумма помощи от республик бывшего СССР составила 1.4 миллиарда рублей.

Таблица 8. Объемы строительства социальных объектов за 1989-1990 гг. по бывшим Союзным республикам [11]

Наименование объектов и исполнителей	Единица измерения	Фактическое выполнение
<i>Российская Федерация</i>		
Жилищное строительство	тыс. кв. м.	531
Общеобразовательные школы	тыс. уч. м.	2.9
Дошкольные учреждения	тыс. мест	1
Больницы	тыс. коек	0.1
Поликлиники	тыс. пос. в смену	0.12
<i>Украина</i>		
Жилищное строительство	тыс. кв. м.	174
Общеобразовательные школы	тыс. уч. м.	1.7
Дошкольные учреждения	тыс. мест	0.67
Больницы	тыс. коек	0.02
Поликлиники	тыс. пос. в смену	0.04
<i>Республика Беларусь</i>		
Жилищное строительство	тыс. кв. м.	26
Дошкольные учреждения	тыс. мест	0.14
<i>Республика Узбекистан</i>		
Жилищное строительство	тыс. кв. м.	42
Общеобразовательные школы	тыс. уч. м.	1.2
Дошкольные учреждения	тыс. мест	0.14
<i>Республика Казахстан</i>		
Жилищное строительство	тыс. кв. м.	4
Больницы	тыс. коек	0.1
<i>Республика Молдова</i>		
Жилищное строительство	тыс. кв. м.	11
Общеобразовательные школы	тыс. уч. м.	0.96
Дошкольные учреждения	тыс. мест	0.15
<i>Республика Кыргызстан</i>		
Жилищное строительство	тыс. кв. м.	10
<i>Республика Таджикистан</i>		
Жилищное строительство	тыс. кв. м.	2
<i>Республика Туркменистан</i>		
Жилищное строительство	тыс. кв. м.	9
<i>Республика Грузия</i>		
Жильё	тыс. кв. м.	19
<i>Литовская Республика</i>		
Жильё	тыс. кв. м.	23.4
Школы	тыс. уч. м.	0.8
<i>Латвийская Республика</i>		
Жильё	тыс. кв. м.	13
<i>Эстонская Республика</i>		
Жильё	тыс. кв. м.	12



Из Лондона было перечислено 5 миллионов фунтов стерлингов, *Арманд Хамер* лично привез в Ереван чек на *миллион долларов*, медикаменты, оборудование, аппарат “искусственная почка”. В Армению приехали *сын и внук Джорджа Буша* старшего, президента США, передав Армении тонны грузов – медицинское оборудование, лекарства, игрушки. *Семья Бурды* выделила 1 миллион марок ФРГ. Руководитель японской миссии сейсмологов и инженеров, приехавших в зону бедствия, *С. Суэхиро* подарил АрмНИИ сейсмостойкого строительства измерительно-вычислительный комплекс OMNILIGHT-8M, для измерения микроколебаний грунтов. 10 декабря 1988 года был объявлен Днем траура. Армянский народ благодарен и признателен всем, кто в трагические часы пришел на помощь. Он высоко оценивает гуманизм и отвагу спасателей и врачей, летчиков, рабочих и солдат, щедрую материальную, финансовую и техническую помощь правительств, фирм, организаций и отдельных граждан.

Таблица 9. Объекты, построенные в зоне землетрясения по финансированию правительств, фирм и организаций зарубежных стран (кроме СНГ) [11]

Наименование стран	Жилье, тыс. кв.м.	Школы, уч. мест	Детсады, мест	Больницы, коек	Поликлиники, штук	Произв. объекты, штук
Австрия	10.2	252	165	150	1	1
США	24.5	50	50	410	7	3
Болгария	18					
Великобритания	0.6	400		60		
Венгрия		360				
Германия	24.5		240	240	7	1
Дания	1.7	300				
Голландия	0.2					
Италия	12.7	1560	190	120	4	3
Монголия		420	120			
Норвегия	2.0			288		
Польша	0.2				1	1
Финляндия		50	50	500	4	
Франция	9.1	150			31	
Чехия		1280				1
Швейцария	7.7			90	6	1
Швеция	0.3					
Югославия	6.8		75			
Разные организ.	14.3	200	300	157	10	
<b>Всего</b>	<b>348.0</b>	<b>4722</b>	<b>1490</b>	<b>2015</b>	<b>71</b>	<b>11</b>

В знак признательности 2256 представителей различных стран мира и организаций были награждены памятными медалями и грамотами правительства Республики Армения. Ряд новых школ были названы именами знаменитых писателей и деятелей культуры помогающих стран. В местах падения двух самолетов, доставляющих помощь в зону бедствия (югославский АН-12 и советский ИЛ-75), в знак благодарности и увековечения памяти погибших летчиков и военнослужащих сооружены мемориальные памятники. В первые дни после землетрясения с помощью специалистов и рабочих из разных стран были восстановлены десятки объектов первой необходимости. С нового 1989 г. началось осуществление большой программы восстановительных работ, составленной Правительством СССР. Было предусмотрено за 2 года построить 5.3 млн квадратных метров жилья, школ, больниц и других объектов. В эту работу включались все союзные республики СССР. Однако после распада СССР большая часть программы восстановления осталась невыполненной. Объемы строительства социальных объектов за 1989-90 гг. по бывшим Союзным Республикам приведен в табл. 3.10, объекты, построенные правительствами разных стран, в табл. 9. Более подробные сведения о помощи зоне бедствия приведены в [11].

Полностью восстановить зону бедствия Армении еще не удалось. Об этом в последние годы постоянно заботится правительство Армении и общешармянский фонд "Айастан".

В деле помощи Армении своей государственной деятельностью и собственными пожертвованиями способствовали *Дж.Буш, Р.Рейган, Дж.Бекер, Р.Доул, В.Оуэнс, Л.Преслер, П.Саймон, Дж.Докмеджян, А.Хаммер, Д.Петерсон, Д.Кео (США), М.Тетчер (Англия), Г.Коль (Германия), Ф.Митеран, П.Жокс, Ж.Ширак, М.Дераж, Ш.Азнавур (Франция), Р.Хоук (Австралия), Э.Бернабелли (Италия), Ж.Сарней (Бразилия), Ф.Закария (Дания), Д.Гелерман (Израиль), мать Тереза, (Индия), А.Хашеми-Рафсанджани (Иран) и многие другие. Президент Кипра Г.Василиу* сдал свою кровь в помощь жертвам землетрясений. *Премьер-министр Великобритании М.Тетчер* специально прилетела в Ленинакан, чтобы лично присутствовать на церемонии открытия "английской" школы на 400 уч. мест, построенной британским правительством.

Во многих странах мира для помощи Армении были организованы десятки благотворительных концертов, музыкальных фестивалей, футбольных и хоккейных матчей с участием знаменитых артистов и спортсменов. Все "звезды" французской эстрады принимали участие в записи песни *Ш.Азнавура "Тебе, Армения"*. Большой благотворительный концерт "Детям Армении" состоялся в Нью-Йорке в знаменитом Карнеги-холле с участием *П. Доминго, М. Ростроповича, Е. Образцовой, С. Рейми, В. Виаардо, Ф. Фон-Штада, П. Бурчуладзе, А. Мило, Р. Репина*. По сообщениям информагентств, в декабрьские дни 1988 г., накануне

Рождества, на улице далекого Сиднея прохожие могли видеть хрупкую обаятельную девчужку лет семи, она играла на скрипке народные мелодии. *Майорет Джамирзе*, так звали девушку, нарисовала плакат с улыбающимся солнышком и написала: “Желаю вам радостного Рождества и наилучшие пожелания в Новом году. Пожалуйста, жертвуйте пострадавшим от землетрясения в Армении. Бог воздаст вам за это”. Стараниями девушки Майореты и ее семьи было прислано 1500 долларов в фонд помощи Армении. О большой помощи, оказанной международным сообществом армянскому народу в ликвидации последствий разрушительного землетрясения, о подвигах проявленных при этом тысячами врачей, спасателей, летчиков, машинистов и водителей, строителей и рабочих было издано много книг и статей [29,30,31]. Тяжело переживал трагедию Армении знаменитый английский писатель *Грем Грин*: *“Я поражен солидарностью людей. Армения стала нашей общей бедой, пепел ее руин стучит в моем сердце... Катастрофа, которая произошла в этой маленькой республике, словно пробудила лучшие человеческие чувства. И теперь мне кажется, что мир изменился, стал лучше. Люди больше думают о себе подобных, сопереживают и, я надеюсь, что такое ощущение общей причастности сохранится, не исчезнет, выкристаллизуется в нечто постоянное”*. На этой позитивной ноте позволим себе завершить изложение анализа особенностей Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года и его последствий.

\*\*\*

Декабрь 1988г. – трагическая дата нашего народа. Землетрясение 7 декабря огромной силы обрушилась на нашу страну. Оно унесло жизни тысяч людей, причинило огромный материальный ущерб нашему народу, был парализован нормальный ритм жизни на более чем 40% территории республики. Главной причин Спитакской трагедии, как было отмечено выше, явилась сама природа с ее пока нераспознанными и непредсказуемые разрушительными силами. Но на масштабе этой трагедии существенно влияли также многие немаловажные факты. Это прежде всего наша недооценка в прошлые годы уровня сейсмической опасности территории Армении, несоответствие основных положений и норм сейсмостойкого строительства прошлых лет современным научно-техническим достижениям, слабый контроль за качеством проектирования и строительства. После Спитакского землетрясения были приняты ряд мероприятий для повышения уровня сейсмической безопасности страны. Одним из главных итогов этих усилий явились новые национальные нормы по сейсмостойкому строительству РА СНРАП-2.02.94, разработанные армянскими специалистами и введены в действие с 01.04.1995г с существенным повышением уровня сейсмической опасности всей территории РА. В 2006 г. разработана новая редакция СНРАП-2.02-2006 с новыми разделами и существенными дополнениями. В настоящее время продолжается работы по дальнейшему усовершенствованию норм. 2016-2018 гг. по инициативе правительства РА (МЧС) и Всемирного банка специалистами США, Италии и Армении была разработана новая вероятностная (карта) оценка сейсмической опасности территории РА. В настоящее время в Национальном университете архитектуры и строительства РА по финансированию Азиатского банка по поручению Фонда территориального развития РА выполняется задание по переработке норм сейсмостойкого строительства СНРАП-2.02-2006. В 2019 г. предполагается введение в действие переработанные нормы с новой вероятностной картой, сейсмической опасности РА.



# ПРИЛОЖЕНИЕ

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

### 1. ЧТО ТАКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

Землетрясение – это колебательные движения земной поверхности, вызванные внезапными разрывами (разрушениями) горных пород в земной коре. Во время землетрясения грунт и находящиеся на ней предметы и строения начинают сотрясаться. При сильных и разрушительных землетрясениях предметы опрокидываются, в стенах зданий возникают трещины, полностью или частично обрушиваются строения, оставляя под развалинами людей, животных и имущества, на грунте образуются трещины, на холмах и возвышенностях – обвалы и оползни, рельеф местности подвергается существенным изменениям.

Землетрясения происходят на обширных территориях Земли. Вероятность быть свидетелем землетрясения для человека очень большая. Многие в жизни это испытывают несколько раз. Причина смерти одного из 8000 умирающих за один год в мире людей являются землетрясения, а 10 из них в той или иной степени страдают от землетрясения. Землетрясения происходят совершенно неожиданно. Человек в начале спрашивает себя “что это такое”. Пока он ищет ответ на свой вопрос, происходят следующие удары, и он уже думает “когда закончится это кошмарное явление, что мне делать”. Когда землетрясение длится недолго, человек быстро успокаивается, когда оно продолжается – человек автоматически начинает совершать какие-то действия: кричать, бежать, прыгать с окна или неподвижно стоять на месте. Человек вообще привык к мысли, что пол под ним и особенно земля очень надежны, а теперь становится страшно ощущать, что надежности в них больше нет. Если вы заранее внутренне готовы к такой ситуации, вы быстро ориентируетесь и спрячетесь в безопасное место (лучше всего под стол) и поможете другим сделать то же самое. После нескольких секунд тряски начинаются разрушения и обвалы. Лопаются и вылетают оконные стекла, с полок падают тяжелые предметы и осыпается побелка, в стенах и перекрытиях образуются трещины. Возникает оглушительный шум, похожий на кошмарный крик. Обваливаются здания и сооружения, мосты и плотины, мгновенно изменяется облик окружающей среды. Обычно все это длится 10-20 секунд, перемещения грунта и невысоких зданий не превосходят 3-5 см, но из-за высокой чувствительности человеческих ощущений людям кажется, что землетрясение продолжалось



30-40 секунд, а перемещения грунта достигли больше чем одного метра. Насколько обманчивы человеческие ощущения при землетрясениях, свидетельствует приводимый во многих книгах о землетрясениях рассказ одного турецкого священника, который, в момент землетрясения проповедуя с вершины Стамбульского минарета, после землетрясения утверждал, что минарет изгибался настолько, что он якобы мог прикоснуться рукой земли. Сильное землетрясение неизолированное явление. Ему часто предшествует несколько слабых ударов, которые называются *форшоками*, а после землетрясения (основного удара) всегда происходит большое количество сильных и слабых землетрясений, которые называются *афтершоками*. Они могут происходить в течение нескольких месяцев и даже целого года. Но в этом вопросе имеются также отдельные неточности. Дело в том, что не всегда удается четко установить суть имеющего место события: это был форшок, основное землетрясение или афтершок. Для отдельных геологических регионов характерны происхождения в течение нескольких минут или часов после основного удара новых землетрясений равносильной интенсивности. В других местах могут происходить чередующие друг друга слабые и сильные землетрясения, без четкого выделения основного удара. Такие землетрясения в сейсмологии получили название "*рой землетрясений*". Они в основном происходят в вулканогенных регионах.

Письменные сведения о землетрясениях и подробное описание их последствий можно найти во многих трудах древних мыслителей и историков разных народов. Старейшее из таких собраний – китайское, уходящее в прошлое на 3000 лет. В японских источниках имеются сведения о землетрясениях начиная с 416 года н. э. Хорошо документированная история землетрясений, охватывающая около 17 столетий, имеется в греческих, персидских и арабских источниках [65]. Богатая письменная информация о землетрясениях и их последствиях на территории Армении и соседних стран имеется в трудах многих армянских историков: Мовсеса Хоренаци, Оганеса Драсханакертци, Закария Канакерци, Григора Ереванци, Киракоса Гандзакеци и др. Сводные сведения о более чем 1000 землетрясениях, происходящих в течение последних двух тысячелетий в Армянском нагорье обобщены в монографии В.А. Степаняна "Землетрясения в Армянском нагорье и прилегающих окрестностях", изданной в Ереване в 1964 году на армянском языке [57]. Вот как описывает знаменитое Гарнийское землетрясение 4 июня 1679 года Закария Канакерци:

*"4 июня 1679 года на Араратскую страну свалился сильный гнев Бога, так как Бог сердито смотрел на созданные им же существа. Во вторник после пасхи в 7 часов внезапно земля прогремела, как облако, и*

после крика со значительной тряской начала двигаться. Вся Араратская страна дрожала и стонала, похоже на поговорку: кто это смотрит на землю, трясет ее и заставляет колебаться ее основание. И это землетрясение пришло со стороны Гарни, и разрушились все строения, красивые дома, монастыри и церкви. Разрушенными оказались следующие церкви: Агчуцванк, Айриванк, Авуцтар, Трдакерт, Хор Виран, Джрвеж, Дзагаванк, три церкви Еревана, Норагавит, Дзорагек, Норк, Гамриз. Свалились с основания крепости Еревана, а также мечети и минареты. Во многих местах вытекли новые источники, а многие старые засохли. Обвалились скалы и, сваливаясь в потоки реки, тормозили движение воды. Разрушилось множество деревень, а в Канакере даже ни одного куриного гнезда не осталось. И удивительно то, что в том же Канакере у одного дома все четыре стены упали, а покрытие осталось целостным на четырех колоннах, как будто висячий в воздухе. Землетрясение дошло до поселка Карби ...

Все прекрасные дворцы обители святого Овнанаванка обвалились, церемония в церкви нарушилась и мы еле-еле спаслись от гибели. Многих, которые остались под землей, удалось вытащить оттуда, а тем, которых не удалось вытащить, для них их дома превратились в собственные кладбища. Погибших было больше, чем оставшихся в живых, и несмотря на то, что число погибших во всех местах не смог узнать, но не осталось ни кошки, ни собаки и ни курицы. Землетрясение длилось до октября месяца. Каждый день Земля гремела три, четыре или пять раз и происходило землетрясение. Но весь ущерб от землетрясения был нанесен в первый день. Те, которые остались в живых, жили в садах под палатками из ковров (ковры), в виноградниках и необработанных землях”.

Любопытно, что об этом самом Гарнийском землетрясении 1679 года рассказывает другой историк Грогор Ереванци [57]:

“В дни правления епископа Степаноса боготворный гнев спустился на Араратскую провинцию. В среду, 4 июня 1679 года, когда еще не наступил полдень, звонила земля, гремели все существа и земля от тряски двигалась с бурей так, что все живые теряли надежду на жизнь, считая что это последний день света, и казалось, что это ни чуть не уступает этому дню. На почве появились обширные разрывы, каменные скалы превращаясь в осколки, наполнили ущелья и долины, луна и солнце отменили, как ночью, и от земной пыли вода приобрела кровавой оттенок, источники изменили обычный свой ход, боготворные толстостенные дома и великолепные церкви с основания обвалились, длинные улицы превратились в непроходимые груды камней. Старые и новые строения начисто разрушились со дна, и множество людей погибло под развалинами домов. Тех, которые имели родствен-



ников, через 2-3 дня вытащили из-под развалин и в одежде без священника и церемоний похоронили в землю, а те, которые не имели ни одного сочувствующего, чтобы их вытащили из развалин, и по сей день остаются на месте гибели...”.

Как видим, в обоих описаниях одного землетрясения имеются как сходные моменты, так и значительные отличительные оттенки особенно в оценках последствий землетрясения.

О последствиях землетрясения 25 ноября 1840 года в районе горы Арарат собралось множество рассказов очевидцев и откликов на них со стороны ученых того времени. Это катастрофическое землетрясение оказалось в центре внимания не только армянских историков, но и чиновников Российской империи и всего мирового научного сообщества. О нем высказались немецкие ученые – геологи М. Вагнер и Г. Абих, майор российской армии на Кавказе Воскобойников, русский географ Н. Стебницкий и др. Причем Вагнер и Абих, которые в дальнейшем были на месте катастрофы, высказали прямо противоположное мнение о происходящей трагедии. В письме академику Брандту Вагнер на основе свидетельств очевидцев и воздействий на окружающую среду утверждал, что трагическое землетрясение 1840 года сопровождалось извержением вулкана на горе Арарат. Абих же на основе тех же фактов доказал, что это утверждение ошибочно и что это было самое сильное землетрясение на территории Армении в течение всего 19 века.

Наиболее полное описание этого землетрясения содержится в обширной докладной записке русского майора Воскобойникова генералу Головину о “необычном землетрясении” в Армянской области. Ниже приводятся некоторые отрывки из этой записки, которые, на наш взгляд, содержат наиболее характерные стороны этого землетрясения и его последствий [40]:

*“Землетрясение произошло после полудня в 7 часов 45 минут, с прерывающимися подземными ударами, которые сопровождались волновыми колебаниями в течение примерно двух минут. Первые четыре удара, которые были наибо́льшими, сопровождались подземным грохотом и, как было обнаружено, они распространялись от горы Арарат в восточную и северо-восточную стороны. На равнинных берегах Аракса на расстоянии до одного верста (1067 м) образовалась вереница многочисленных трещин, которые от колебания грунта местами достигали ширины до 2 сажень (4.26 м) и снова закрылись. От этих трещин и расщелин вытекали водяные фонтаны высотой до 2 аршин (1.5 м). От землетрясения вода в Араксе сотрясалась с такой силой, что размывала берега реки, образуя бороздообразную впадину в середине потока. Это необычное землетрясение причинило огромные разрушения в горо-*

дах Маку, Байазет, Нахиджеван, Ордубад и др. Но больше всего пострадали жители Армянской области. Образовавшиеся в результате обвала у вершины Большого Арарата ледяные и каменные куски, падая с 6000-футовой высоты, полностью покрыли монастырь св. Акона и село Акори, оставив под завалами 1000 людей. В результате землетрясения разрушились более чем 6000 домов, 25 церквей и мечетей. Количество человеческих жертв было не большое, так как в это время дня люди находились вне своих квартир. Можно представить, что произошло бы с ними, если бы землетрясение произошло после заката солнца. В районе Нахиджевана временно высохли 30 источников и открылись несколько новых, из некоторых источников истекали молокообразные грязные водяные струи, два других источника в два и более раз увеличили свой дебит.

Во время первого подземного удара жители села Кара-Асанду заглохли от необычного звука молнии, которая приходила от вершин соседних гор.

От повторного удара земля взрывалась и растрескивалась, из глубины образовавшихся трещин выбросились струи воды, песка и мелких камней”.

Название “Вайоц Дзор” местность получила после землетрясения 21 июля 735 года в области “Вайоц Дзор” с магнитудой  $M=7.0$  погибло 10.000 человек, погужаясь в землю. “Вай”, по-армянски означает горе, “дзор” – ущелье. Так как огромное количество людей во время землетрясения оказалось под землей в местном ущелье, местность после землетрясения называли “Вайоц Дзор” – “Ущелье горя”. Об этом свидетельствует армянский летописец Степанос Орбелян (13 век), который об этом землетрясения на грабаре (староармянском) написал [40]:

«Այս յանկարծակի տես ի վերուստ պատուհաս Տեսնն. Եւ կարեալ իւտար շօշափելի զկատանն ամենայն զաւուրս 40, եւ շարժումն եւ դրրումն սաստիկ. զի եռայր երկիրն անեղ դողացմամբ յանդնոց եւ բարձրանայր մինչեւ ի վեր. եւ անդէն իբր զայիս ծովու փուլանիւր. լերինք տապալէին, վեմբ ի հիմանց բակտէին, տունք եւ ապարանք գեղեցիկք լինէին գերեզմանք բնակչաց. արքիւրք խցէին. գետ կորչնէին. եւ ամենայն տեղի երերէր տատանմամբ. եւ ճայնք մարդկեղէն բարբառոյ յանդնոց եւ ի վերուստ յօրոց «Վայ ձոր, վայ ձոր». Եւ կենդանոյն ընկղմեցան զիբ 10000 զորս զիտէին եւ թիւ արկին. Եւ զանճանօրիցն ոչ որ զիտէր զհամարն. յազարս որոյ կոչեցաւ անուն կատարին Վայոց ձոր.»

Перевод на русский язык вуглядит примерно так:

“Вдруг с неба произошла божья беда и весь уезд 40 дней подряд оказался в мраке, вместе с ним были также грохот и землетрясение, так как Земля страшно возбуждалась, образуя подземный гул. Из про-



пости гул поднимался вверх и снова спускался вниз как морская волна. Разрушились и опрокидывались горы, камни вырвались с оснований, дома и апартаменты повсюду страшно сотрясались и сверху и с глубины земли как бы человеческим голосом были слышны слова “вай дзор”, “вай дзор” (горе в ущелье, горе в ущелье) и 10000 живых людей погружались в Землю, тех, которых узнавали, – подсчитали, а число незнакомых никто не смог подсчитать. По этому случаю уезд получил название “Вайоц Дзор”.

Английский перевод, сделанный Е. Гуидобони и Г. Траина выглядит следующим образом [70]:

*“Suddenly the punishment of God above was felt. There was thick darkness over the whole region for forty days; and a powerful and destructive earthquake occurred. There was such a terrible upheaval of the earth that damage extended from deep in abuses to great heights. The earth heaved like the waves of the sea; mountains collapsed, rocks completely crumbled, while houses and fine palaces became a tomb for their inhabitants. Springs dried up and rivers disappeared. Everywhere shook, and sounds like human voices rose up from the depths into the open air: ‘Vay jor, Vay jor’ [woe, valley, woe, valley]. Of those who were registered as taxpayers, we know that about 10000 were swallowed up alive, but no-one knows how many others lost their lives. That is why the place was called Vayoc ‘Jor’”.*

Известный французский писатель, автор многочисленных научно-популярных книг Пьер Руссо собрал и обобщил многочисленные отчеты очевидцев о последствиях большого количества разрушительных землетрясений во всем мире. Огромный интерес с точки зрения объяснения сути самого землетрясения и его последствий, на наш взгляд, представляет описание писателем трагического Лиссабонского землетрясения 1 ноября 1755 года, отдельные отрывки из которого приводятся ниже [71]:

*“Какое чудесное утро выдалось на праздник Всех Святых. В субботу 1 ноября 1755 года с самой зари зазвонили колокола. День обещал быть ясным и веселым. Стрелки башенных часов церкви Святой Марии показали 9 часов 40 минут... Вдруг раздался чудовищный шум, как бы рев, вырвавшийся из недр Земли, и наполнил собой церковь, все пространство вокруг, весь мир... Всем, кто находился в церкви, показалось, что земля уходит из-под ног, ... увидели, как с грохотом обрушился центральный свод, тут же превратившийся в гору праха... Толчки продолжались некоторое время, показавшееся вечностью... Землетрясение прекратилось, но улицы уже не было. По обеим сторонам вместо домов протянулись две гряды каменных куч, из которых торчали обломки стен. Солнечный день внезапно сменился ночью, и в этом мраке оставшиеся в живых казались обезумевшими призраками,*

*тицетно искавшими спасения... Но все это, было лишь прологом к катастрофе. Разгорелся пожар, который начался через 3 часа после толчков и начал распространяться затем с невероятной быстротой... Весь Лиссабон превратился в гигантский костер. Несмотря на спускавшиеся сумерки, было светло как днем... Все нижняя часть города горела в течение 5-6 дней. Обезумевшие от страха лиссабонцы пустились в бегство, многие помчались к морю. Естественное побуждение: ведь земля перестала быть для человека прочной и устойчивой опорой... Внезапно как бы под воздействием неожиданного гигантского отлива море отступило. Оно отступило, увлекая за собой суда, оголив порт и доки, выставив напоказ свое дно и берега... И вдруг с такой же стремительностью море перешло в наступление. Люди увидели исполинскую волну (цунами) высотой не менее 12 метров, которая надвигалась с быстротой, несущейся во весь опор лошади. Гигантская волна взметала всю территорию города. Горы, окаймляющие реку Тежу, не выдержали силу толчков и обрушились на побережье... А разве можно было сосчитать, сколько человеческих жизней унесло море...”.*

Лиссабонское землетрясение удостоилось пристального внимания многих крупных ученых, философов и писателей. Известный французский философ-писатель Жан Жак Руссо в одном из своем памфлете, направленном против усложненности человеческой цивилизации и ратуя за максимальное ее приближение к природе (как идеального общества), упоминая о Лиссабонском землетрясении, пришел к необычному выводу: **“если бы мы жили не в домах, землетрясения нас не убивали бы”**. В связи с чем он удостоился безжалостной высмеянную другого, не менее известного философа-писателя Вольтера. В сатирической повести “Кандиду”, затронув тему Лиссабонского землетрясения, идею Руссо Вольтер считал большим преувеличением.

Несмотря на то, что дошедшая до нас богатая информация о проявлениях и последствиях прошлых землетрясений содержат много полезного, они недостаточны для их научного осмысления. Как отмечает Ч. Рихтер [51] к сообщениям о проявлениях исторических землетрясений следует относиться критически, так как, с одной стороны, они очень отрывочны, а с другой – из-за необычности самого явления очевидцы, с целью увековечивания собственной персоны, часто невольно впадают в фантазию и допускают грубые ошибки, преувеличивая факты.

“В сейсмологии данные накапливаются медленно, многое зависит от исследования сильных землетрясений, которые происходят не часто. Незрелые выводы, основанные на отрывочных данных и повторяемые от одного издания к изданию, нанесли науке реальный ущерб. Лишь немногие сейсмологи проявляют замечательный такт одного русского,



который писал: *ввиду недостатка данных, мы воздерживаемся от каких бы то ни было выводов*” (Ч.Рихтер). В действительности только начиная с XVIII века появились первые научно обоснованные описания разрушительных землетрясений и их последствий.

Разрушительные землетрясения становятся причиной гибели тысячи людей. Наибольшее число погибших – 830000 по историческим источникам имело место при землетрясении в провинции Шэньси (Китай) 23 января 1556 года, которое считается величайшей природной катастрофой истории. Известны десятки землетрясений, при которых число человеческих жертв превышало 100000, в том числе и за последние годы. *Число жертв при землетрясениях* зависит от множества различных факторов. Даже при сравнительно несильном землетрясении число жертв может быть значительным, и наоборот, известно множество сильных и катастрофических землетрясений с единичными числами жертв. На наш взгляд, в этом вопросе одним из главных факторов является место происхождения землетрясения – его удаленность от населенных пунктов. Существенную роль в этом играет плотность населения эпицентральной зоны, сейсмовооруженность зданий, качество строительства и длительность эксплуатации существующих застроек и ее этажность. Большое влияние на число жертв играют времена года и суток. Зимние месяцы и ночное время являются наименее благоприятными. Мировой опыт и статистика позволяют приблизительно оценить следующие людские потери *в городах развивающихся стран*:

- при умеренных землетрясениях (8 баллов по шкалам MSK и ESC) погибает в среднем 0.5% населения, 2% получают серьезные ранения;
- при сильных землетрясениях (9 баллов) погибает в среднем 5% населения, 20% получают серьезные ранения;

Умеренные по силе землетрясения могут причинить огромный ущерб и большое число жертв, если они возникают прямо под большими городами. Большое влияние на число жертв оказывают следующие за главным толчком афтершоки, их магнитуды и самое важное промежуток времени (иногда несколько минут) между главным толчком и первым афтершоком. Определенное влияние также оказывают глубина очага и другие опасные явления, сопровождающие землетрясение – *пожары, оползни, цунами*. Не редки случаи, когда от сопровождающих землетрясение опасных явлений число жертв было больше, чем от разрушения зданий и сооружений. И, наконец, количество жертв при землетрясениях существенно зависит от морально-психологической подготовленности населения и оперативности государства по оказанию медицинской помощи пострадавшим и производства спасательно-восстановительных работ при природных стихийных явлениях.

## 2. ОПАСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ.

Землетрясения оказывают существенное негативное влияние на окружающую среду и на общество в целом. Они, в первую очередь, становятся причиной гибели тысячи людей и уничтожения в течение нескольких секунд созданных ими материальных и духовных ценностей. Однако сами сотрясения земли ответственны лишь за часть общих потерь. Они вызывают и другие опасные геологические эффекты.

В сейсмологии негативные явления, обусловленные землетрясениями, разделяются на две категории: природные и связанные с деятельностью человека [39]:

### *а. перечень опасных природных явлений, связанных с происхождением землетрясения:*

- сотрясение грунта;
- нарушение грунта – трещины и смещения;
- оползни, лавины, сели;
- разжижение грунта;
- оседание грунта;
- цунами – высокие морские волны со скоростью распространения 800км/час;
- образование стоящих волн – сейшов.

### *б. перечень опасных явлений, связанных с землетрясением и человеческой деятельностью:*

- разрушение или обрушение зданий и сооружений;
- наводнение при прорывах плотин и водоводов;
- пожары при повреждениях нефтехранилищ, разрывах газопроводов и электрических систем;
- падение и опрокидывание предметов внутри и вне зданий;
- повреждение транспортных средств, коммуникаций, линий энерго- и водоснабжения, а также канализационных труб;
- радиоактивные утечки из ядерных реакторов.

Иллюстрированные изображения некоторых из этих опасных явлений, сопровождающих землетрясение, показаны на рис. 35-44.

При Нью-Мадридском (США) землетрясении 1811 года образовалось новое озеро с площадью 10 км<sup>2</sup> и глубиной в 1.5-7 м, а во время Сан-Францисского землетрясения 1906 года относительная горизонтальная подвижка двух блоков по известному Сан-Андреасскому разлому достигла 7 метров. Большие изменения рельефа местности имели место и при Токийском землетрясении 1923 года, когда дно центра Токий-



ского залива спустилось на 100-200 метров, а на севере, наоборот, поднялось на 250 метров. Изучение причин опасных явлений, сопутствующих землетрясениям, и разработка эффективных методов борьбы с ними является одной из основных задач прикладной сейсмологии.

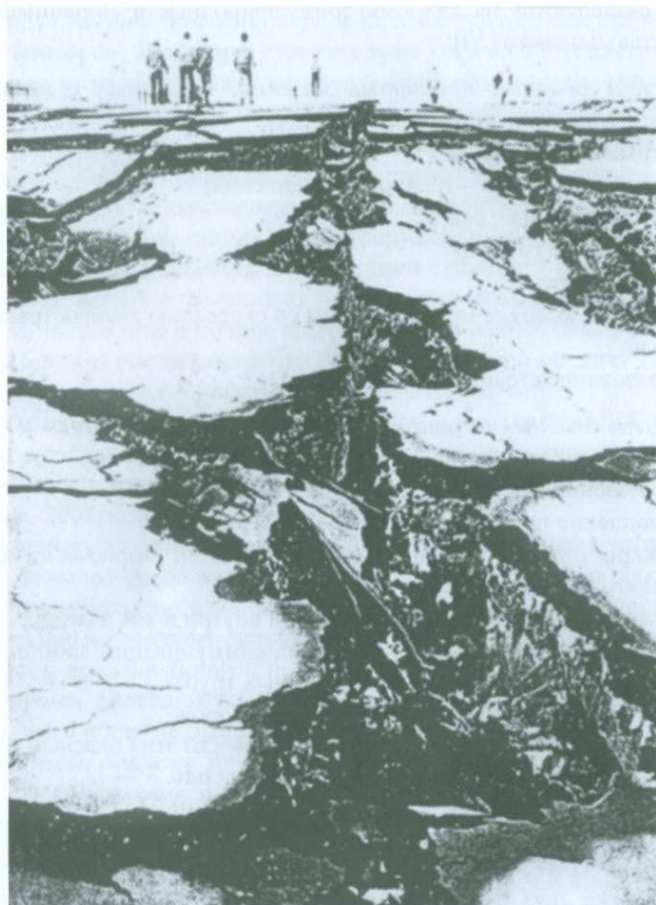


Рис.35. Надрывы (трещины) на поверхности земли у японского города Ниигата после землетрясения 16 июня 1964 года [72].

а.



б.

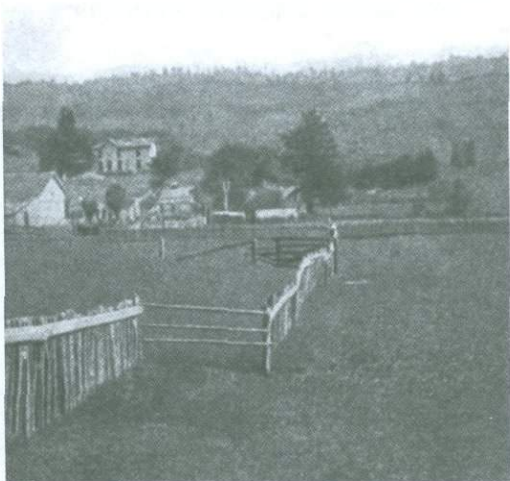


Рис. 36.

- а. Разлом Сан-Андрюаса в Калифорнии. Вид на разлом с самолета, на правом верхнем углу видны две реки, русла которых за многие тысячелетия оказались сдвинутыми смещениями по разлому. Остальные реки, видимые на снимке, появились позже разлома [73].
- б. Смещение забора на 2.6м во время Сан-Францисского землетрясения 1906 года [73].



Рис. 37. Разжижение грунта около Эль Центро во время землетрясения в Империял Валле в 1979 году [74].

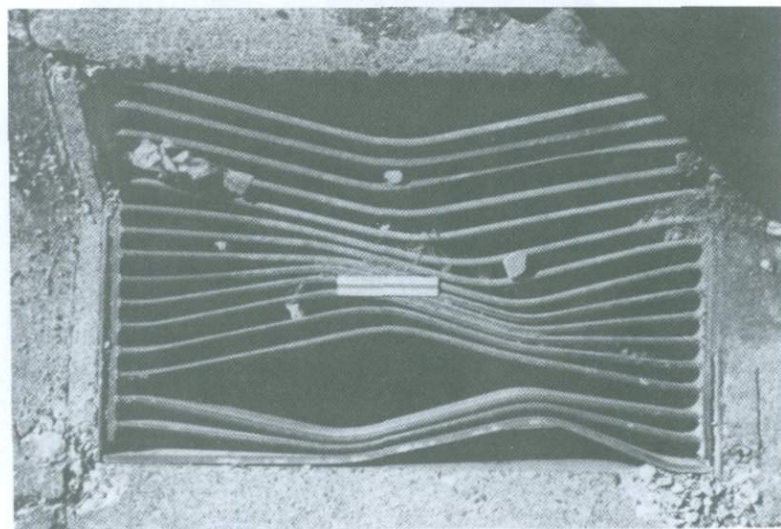


Рис. 38. Деформирование канализационной решетки во время землетрясения в Ломо Приета 17 октября 1989 года [75], длина линейки около 15 см.



Рис. 39. Оползень, образованный в результате землетрясения [76].



а.



б.

Рис. 40. Последствия землетрясения:  
а. опрокидывание зданий из-за разжижения грунта (Ниитата, 1964) [39].  
б. разрушение газопровода (диаметр 1м) при землетрясении [76].



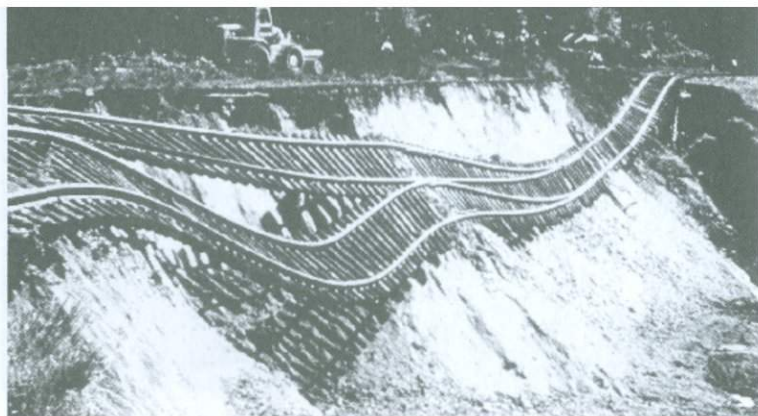
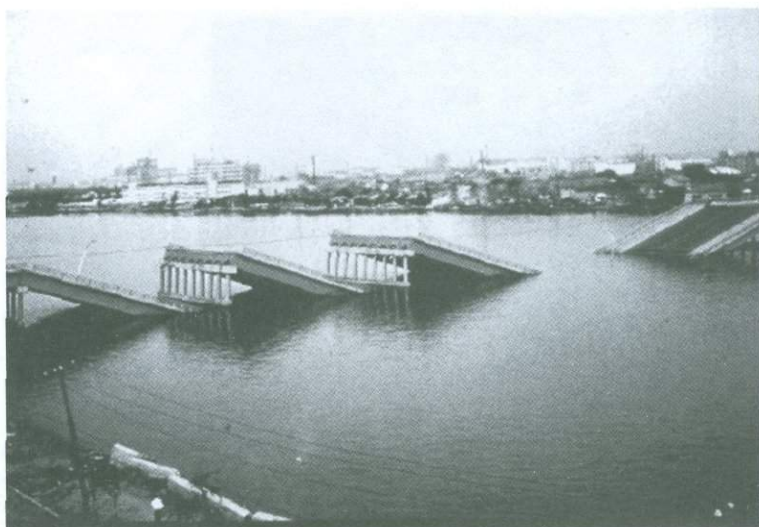


Рис.41. Искривленные железнодорожные пути повисли в воздухе во время землетрясения 1965 года в Олимпии, когда склон холма под ними сполз вниз [39].



Рис. 42. Разрушения столбов линии электропередач при землетрясении 17 января 1995 года в Кобе [77].

а.



б.

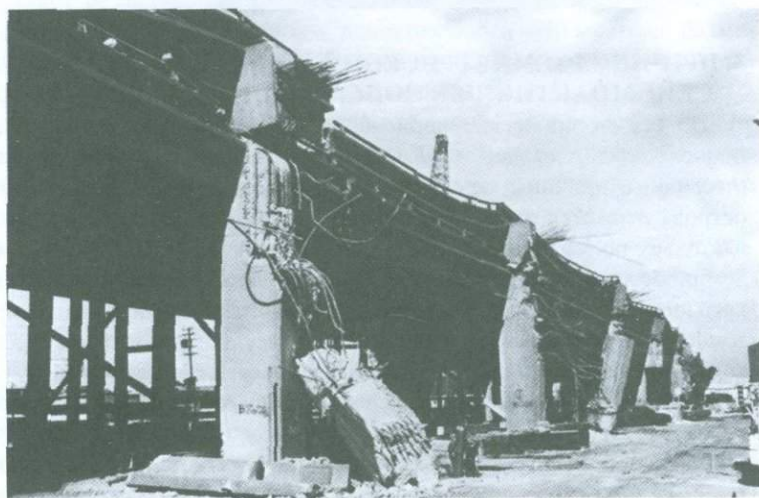


Рис. 43.

- а. Разрушение моста при Фукуйском землетрясении 1948 года.
- б. Повреждения двухъярусного моста Интерстейт 880 (Interstate 880) во время землетрясения в Ломо Приетта 1989 года [75].

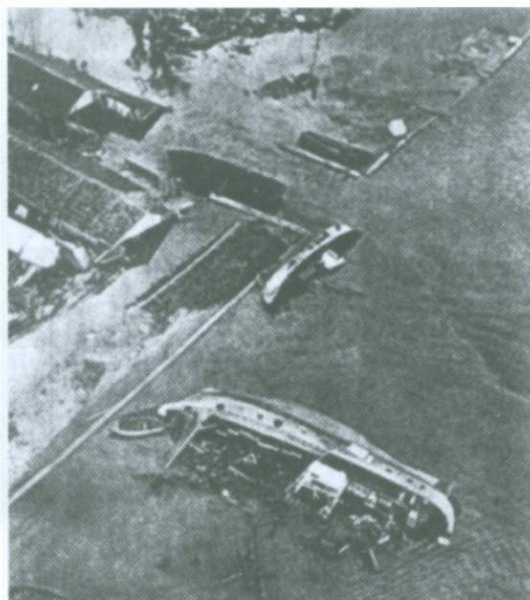


Рис. 44. Последствия цунами на японских берегах от Чилийского землетрясения 1960 года.

### 3. ПРИЧИНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ЛИТОСФЕРНЫЕ ПЛИТЫ, СЕЙСМОАКТИВНЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ

Во все исторические времена людей всегда интересовало, почему происходят землетрясения. Каждая цивилизация оставила свое мнение (легенду) о причинах землетрясений. По древней японской легенде, их острова держатся на спине огромного сома, движение которого заставляют Землю содрогаться. Индейцы Северной Америки считали, что Землю несет на себе огромная черепаха, и Земля вздрагивает каждый раз, когда черепаха переваливается с ноги на ногу. В других странах причину землетрясения связывали с движениями лягушки, крота, быка, змеи [39].

Аристотель считал, что причиной землетрясения являются атмосферные вихри, которые, проникая в землю сквозь пустоты и сквозные щели, вызывают землетрясение. Несмотря на научную несостоятельность такой гипотезы, она не только просуществовала много веков, но и имеет своих сторонников и в настоящее время под названием *“сейсмоопасная погода”*, которая может сигнализировать о приближении землетрясения. В древности землетрясение часто рассматривалось как наказание от разъяренных богов. Церковь явление землетрясения использовала для пропаганды своих моральных принципов. Она считала, что землетрясение наказывает людей за их недостойное общественное поведение, развязанность и недобросовестность.



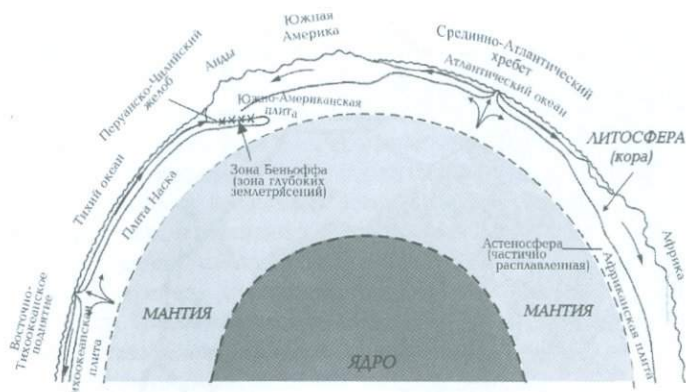


Рис. 45. Земля в разрезе [39].

В наши дни полностью выявлены истинные причины возникновения землетрясений. Они связаны с непрерывными процессами, происходящими в *оболочке* – *литосфере* Земли. По современным представлениям Земля состоит из трех основных частей: *оболочки*, *мантии* и *ядра* (рис. 45). Оболочка Земли имеет очень маленькую толщину по сравнению с ее радиусом – 6378 км. В континентальных участках толщина оболочки доходит до 150 км, а под океанами – 70 км. Если размеры Земли мысленно уменьшить до размеров яйца, то толщина коры литосферы окажется равной толщине скорлупы яйца.

Литосфера не только имеет малую толщину: *она твердая, но не целостная*. Литосфера разбита на несколько больших кусков. Эти куски литосферы называются *плитами* (рис. 46). Размеры плит, как видно из рисунка, изменяются от сотни до нескольких тысяч километров.

Самыми крупными из плит являются: Евразийская, Тихоокеанская, Африканская, Индо-Австралийская, Северо-Американская, Южно-Американская, Антарктическая, плита Наска, плита Кокос, Карибская и Аравийская плиты.

Под литосферой (в астеносфере) действуют глубинные силы, предупреждающие плиты медленно перемещаются в пределах нескольких сантиметров в год. Первоисточником таких движений служит тепло, которое существует в Земле со времени ее образования. Причины этих глубинных сил не вполне выявлены. Они связаны с явлениями тепловой конвенции в недрах Земли, физико-химическими процессами в результате радиоактивного распада элементов и динамическими эффектами вращения Земли вокруг своей оси и Солнца, а также его взаимодействия с Луной и другими планетами. Температурное поле плит по их толщине неравномерное. Нижние грани плит, расположенные в астеносфере, имеют более высокую температуру, чем верхние на поверхности



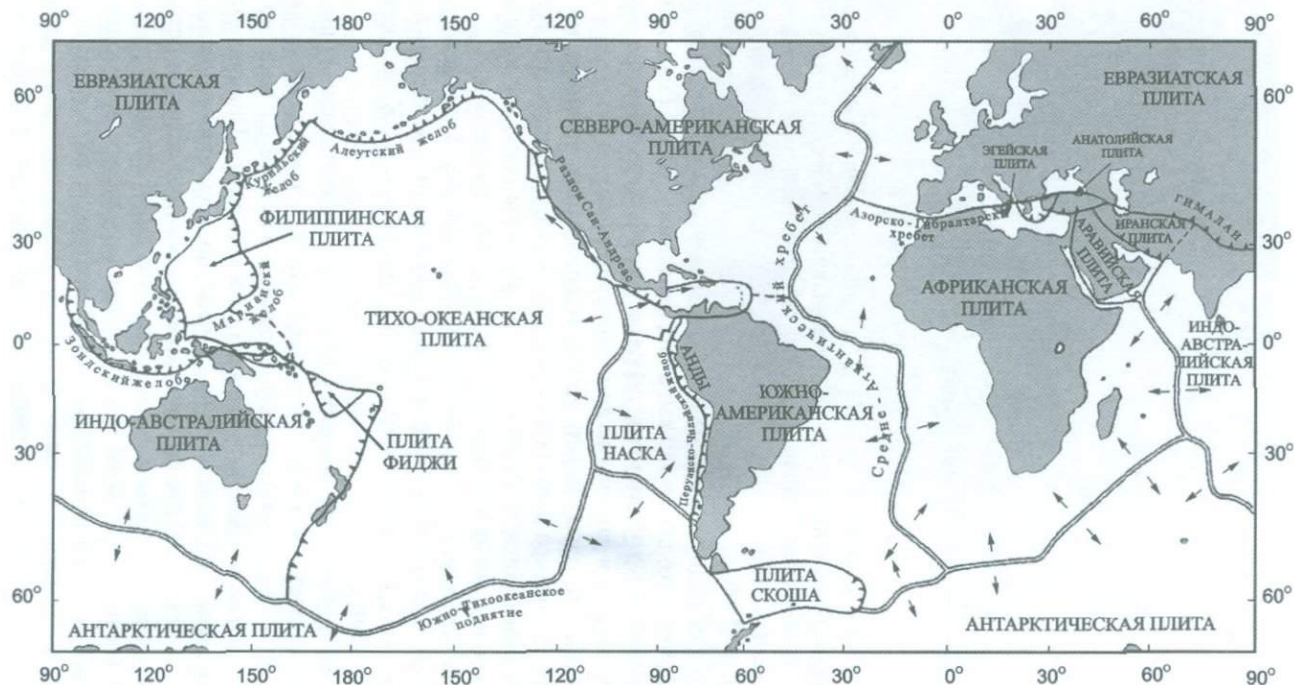


Рис. 46. Литосферные плиты [39].

Направления движения плит показаны стрелками, зоны субдукции обозначены у границ зубцами.

Земли, в результате чего они могут легко скользить относительно более пластичного основания, испытывая относительно малое сопротивление.

Кроме того, из-за температурного градиента плиты становятся гравитационно неустойчивыми по отношению к мягкой (горючей) подстилающей основе (астеносфере), вследствие чего возникает отрицательная плавучесть литосферной плиты: плита изгибается вверх и ее края частично погружаются в глубину Земли. В этой сложной ситуации в некоторых регионах из мантии горячее вещество поднимается наверх, остывает и оттесняя плиты в противоположные стороны (Средне-Атлантический хребет), становится причиной процесса так называемого *спрединга (раздвигания)* океанического дна. В других местах плиты *проскальзывают краями* одна вдоль другой (разлом Сан-Андреас в Калифорнии) и, наконец, есть области, где одна плита при встрече заталкивается под другую более мощную (Перу-Чилийский желоб), они называются областями *субдукции (уничтожения)*. Таким образом, Земля не является неизменяемой – плиты непрерывно частично воссоздаются и поглощаются. Из-за спрединга плит из мантии образуется новая кора, и поверхность Земли возрастает, а благодаря субдукции – старая кора возвращается в мантию, уменьшая поверхность Земли и одновременно поднимая вышележащую плиту. Одновременно происходит конвективный переход тепла из мантии вверх за счет погружения холодного материала литосферы (у океанских желобов) и подъема горячего материала мантийными восходящими потоками (у средне-океанских хребтов). В обоих случаях происходит вынос тепла из мантии на поверхность Земли. *Ежегодно около  $10^{28}$  эрг ( $2.78 \cdot 10^{14}$  кВт·ч) энергии выделяется всей нашей планетой и через атмосферу распространяется в окружающее пространство.*

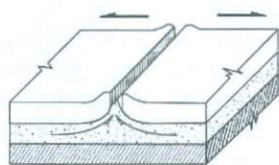
Система океанских хребтов (зоны спредингов) не является непрерывной. Ее можно представить в виде отдельных сегментов, смещенных относительно друг друга в поперечном направлении и соединенных *трансформными* разломами (с проскальзыванием). В зонах субдукции (зоны Беньофа) землетрясения происходят на глубинах до 700 км. Глубочайшее место в океане расположено у Марианского желоба с глубиной 11022 м. Если движение плит по разлому носит характер медленного проскальзывания (*крип*), от такого движения никакие колебания поверхности Земли (землетрясение) не возникают. Наблюдения показывают, что землетрясения неоднократно могут происходить на уже существующих разломах из-за неоднородности их боковых поверхностей.

Вследствие постоянства площади поверхности Земли скорости раздвигания океанического дна у океанических хребтов должны совпадать со скоростями субдукции дна у океанических желобов. Исходя из этого можно определить относительные скорости движения плит. При этом они совершают не только поступательные, но и вращательные движе-

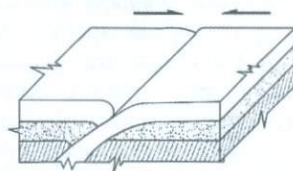
ния [78]. Таким образом, границы между плитами бывают *трех типов* – *хребты, желобы и трансформированные разломы* (рис. 47).

Землетрясения и вулканы являются следствием непрерывно происходящих в недрах Земли вышеуказанных сложных физико-химических процессов и механических движений. Такие несогласованные движения литосферных плит заставляют каменную толщу растрескиваться и вспарываться, создавая эффект землетрясения. Землетрясения, вызванные движением плит, называются *тектоническими*. Естественно, что они в основном (95%) должны происходить на границах плит. Небольшая их часть происходит внутри плит. Причиной таких внутриплитных землетрясений является то обстоятельство, что тектоническая активность (механическая напряженность) от взаимодействия на краях плит распространяются в их внутренние, более ослабленные (с меньшей толщиной плит и прочностью пород) области. Некоторые землетрясения имеют вулканическое происхождение. Редко землетрясения бывают вызваны деятельностью человека – заполнением водохранилищ, закачкой воды в скважины, горными работами и ядерными взрывами.

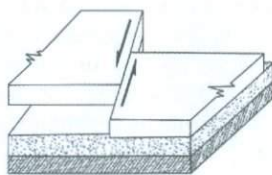
Примерно 90% всех землетрясений, происходящих на земном шаре, сосредоточены на территориях, окружающих Тихий океан. Эта зона получила название *Тихоокеанский пояс* (кольцевой) землетрясений. Другой пояс это *Альпийский* или *Средиземноморский и Трансзаитский*, включающий 5-6% всех сильных землетрясений, протягивается от Средиземноморья на западе до Китая на востоке, через южную Европу, Турцию, Кавказ, Иран и Северную Индию. Остальные 4-5% землетрясений происходят в других местах и внутри плит.



Хребет - спрединг



Желоб - субдукция



Трансформный разрыв - проскальзывание

Рис. 47. Относительные движения плит.



На цветном рис. 48 показана глобальная карта сейсмической опасности Земли, составленная в 1990-1999гг. в пределах международной программы “Глобальная оценка сейсмической опасности Земли” под эгидой ЮНЕСКО в период международной декады снижения опасности катастроф, провозглашенной ООН.

### Карты сейсмического районирования.

В более чем 60 странах мира происходят сильные землетрясения. Строительство зданий и сооружений в этих странах ведется с учетом сейсмических воздействий на основании *карт сейсмического районирования (зонирования)* данной страны. Уровень сейсмической опасности на картах сейсмического районирования оценивается (прогнозируется) по частоте повторения сильных землетрясений и по геодинамическим и тектоническим условиям региона. Чем длиннее время, в которое имеются исторические сведения о землетрясениях на данной территории, тем, естественно, достовернее будет уровень прогноза сейсмической опасности. Как было отмечено выше, для некоторых регионов Земли такие статистические сведения имеются более чем за 2000 лет, для других регионов – менее чем за 100 лет.

С другой стороны, обычные здания и сооружения возводятся со сроком существования (эксплуатации) не более чем 50-100 лет. Поэтому при разработке национальных карт сейсмического районирования учитываются период повторяемости сильных землетрясений на территории данной страны и сроки службы сооружений. Вероятность  $P$  превышения данной интенсивности  $I_t$  в течение  $t$  лет при ее повторяемости  $T$  лет (т.е. за это время произойдет хотя бы одно землетрясение интенсивностью  $I_t$ ) составляет (в процентах)

$$P = \left(1 - e^{-t/T}\right) \cdot 100.$$

В табл. 10 вычислены значения вероятности  $P$  при различных сроках службы сооружения  $t$  и повторяемости  $T$  землетрясений данной интенсивности.

Таблица 10

Вероятности превышения  $P$  (в %)

Срок службы сооружения $t$ лет	Повторяемость землетрясения $T$ лет			
	250	500	1000	2000
50	18	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>2.25</b>
100	33	18	<b>10</b>	<b>5</b>
150	45	26	<b>14</b>	<b>7</b>
200	55	33	18	<b>10</b>

Примечание: Жирными цифрами в таблице показаны наиболее благоприятные сочетания между сроком службы сооружения и повторяемостью землетрясения данной интенсивности.



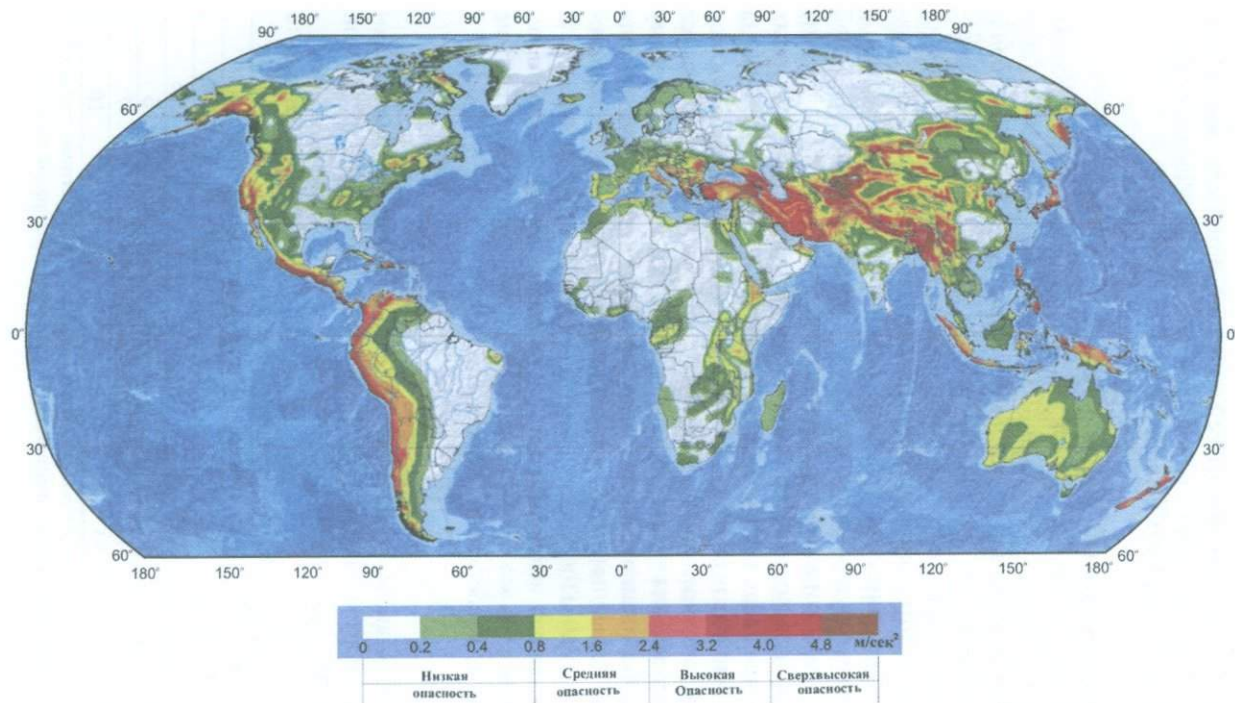


Рис.48 Глобальная карта сейсмической опасности Земли. Максимальное значение ускорения грунта (в  $\text{м/сек}^2$ ) рассчитаны на 10%-ой вероятности их превышения в течении 50-летнего отрезка (при периоде повторяемости землетрясения данной интенсивности, равной 475лет) [76]

Чем меньше время повторяемости землетрясения данной интенсивности и длиннее срок службы сооружения, тем больше уровень сейсмической опасности и величина сейсмического риска. При периоде повторяемости землетрясения данной интенсивности в среднем один раз за 500 лет вероятности превышения этой интенсивности в течение 50 или 100 лет, примерно равны, соответственно 10 и 20%, что можно считать приемлемым с точки зрения безопасности и экономической эффективности обычного гражданского и промышленного строительства.

Карты сейсмического районирования многих стран имеют идентичную структуру: территория страны разделена на небольшое число (2-5) сейсмоопасных зон. К каждой зоне приписываются определенные параметры, характеризующие наиболее вероятный для данного интервала времени уровень сейсмической опасности, обусловленный сейсмическим режимом данной зоны и сопредельных (20-30км) территорий. Ясно, что чем большую и сложную территорию в геотектоническом отношении занимает данная страна, тем больше должно быть число сейсмических зон.

Во время землетрясения на здания и сооружения кроме *постоянных* (собственный вес) и *временных* (вес всего содержимого здания, снега, ветровое давление) действуют и так называемые *сейсмические нагрузки*. На самом деле это не нагрузка (сила) в прямом смысле. Когда грунт под сооружением движется, оно из-за инерции отстает от грунта и изгибается. Это похоже на действие на сооружение горизонтальных сил, перпендикулярных к его оси. Значения этих сил обусловлены величиной ускорения грунта и массой сооружения. Все нагрузки, кроме сейсмической, создают прямое физическое воздействие и имеют постоянное направление. Сейсмическая нагрузка имеет *инерционно-динамический характер* и действует только в течение землетрясения. Поэтому параметры, характеризующие уровень сейсмической опасности данной зоны, обуславливаются в первую очередь величинами горизонтальных (вертикальных, вращательных) *ускорений движения грунта и их изменения во времени*. Наибольшую полноценную информацию об этом параметре содержат трехкомпонентные акселерограммы грунта, зарегистрированные во время сильного землетрясения. Обоснованный их выбор для любой строительной площадки данной зоны потребует их наличия в большом количестве за длительный период наблюдений. Поэтому на картах сейсмического районирования обычно указывается *значение прогнозируемого максимального ускорения грунта* для любого горизонтального направления на поверхности Земли. Большую пользу в установлении величины максимального горизонтального ускорения грунта оказывают исторические сведения о последствиях прошлых землетрясений, национальные службы регистрации сильных движений

грунта и соответствующие банки данных прошлых землетрясений данного региона.

На картах сейсмического районирования целесообразно указывать также расположение активных разломов и дать дополнительные рекомендации по степени усиления уровня сейсмической опасности на площадках, расположенных вдоль и поперек разломов, вероятные оползневые участки и зоны возможного разжижения грунтов.

Карты сейсмического районирования (опасности), как очень важный государственный документ сейсмической защиты страны, периодически совершенствуются и корректируются. К их составлению привлекаются не только ведущие сейсмологи, геофизики и геологи данной страны, но и ведущие специалисты других регионов и стран.

#### **4. МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

Как отмечено выше, литосферные плиты непрерывно находятся в процессе медленных движений, вследствие чего на их границах возникают механически напряженные области. Внезапные разрывы этих областей и приводят к землетрясению.

Границы литосферных плит разбиты на отдельные крупные сегменты. Землетрясения на участке данного сегмента приводят к локальному снижению напряжения в данном месте, но частично передает напряжение к соседним сегментам, тем самым готовя их к следующему разрыву – землетрясению. Как отмечает Дж. Райс: “Фактически изучение землетрясений вдоль больших участков сейсмоактивных поясов (разломов) приводит к заключению, что, возможно, существует вполне определенная закономерная картина пространственного распределения областей накопления и разгрузки напряжений, так что нарастание напряжений в одном сегменте данного сейсмического разлома происходит не независимо, а сильно связано с меняющейся во времени передачей напряжений от соседних сегментов, в которых произошли разрывы” [48]. Принимается, что фронт “спускового” механизма сильных землетрясений вдоль сейсмических поясов (границ плит) распространяется с определенной скоростью (порядка 50-100км/год для Северной части Анатолийского разлома).

Во время сильного землетрясения разрывается сегмент коры большой протяженностью, который вызывает волну напряжения как в верхних слоях астеносферы, так и в секторах, прилегающих к границам плиты. Но по мере релаксации (ослабление напряженности) астеносферы во времени большая часть напряжений смещается в сторону соседних сегментов в границе плиты, делая их вероятными местами для последующих крупных землетрясений (разрывов).



Рассмотрим более подробно механизм образования отдельных разрывов. Разрыв может быть вертикальный или наклонный. Длина вспарывшейся части разрыва может быть от нескольких метров (слабые не ощутимые землетрясения) до сотни километров (сильные землетрясения). Вспарывающаяся трещина может достичь поверхности Земли или остановиться внутри нее (рис.49).

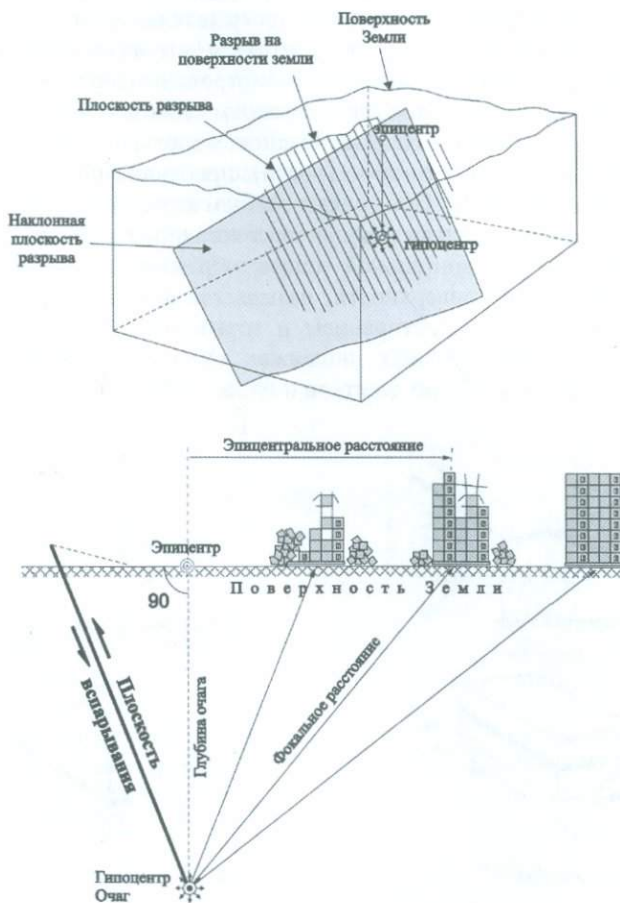


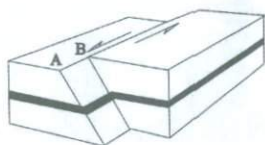
Рис. 49. Характерные параметры землетрясения.

Место, где начинается *вспарывание* называется *гипоцентром* землетрясения, вертикальная точка над гипоцентром на поверхности Земли называется *эпицентром*. Расстояние от поверхности Земли до

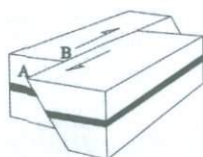


гипоцентра называется *глубина очага* землетрясения, которая обычно измеряется от нескольких километров до ста километров. Расстояние от эпицентра до данного пункта наблюдения на поверхности Земли называется *эпицентральным расстоянием*, а от гипоцентра до пункта наблюдения – *фокальным расстоянием*. Взаимные подвижки вспарывающихся частей подразделяются на горизонтальные: *левосторонний сдвиг* и *правосторонний сдвиг* и на вертикальные: *сброс* и *взброс* (рис. 50). При левостороннем сдвиге вспарывающиеся части плит движутся по горизонтали одна вдоль другой так, что *дальняя* от наблюдателя часть перемещается *влево*, если смотреть в перпендикулярном к разрыву направлении. При правостороннем сдвиге – наоборот. Если *вышележащая часть* вспарывающейся породы движется вниз – считается что имел место *сброс* (уступ), при движении вверх – имел место *взброс* (надвиг). При реальных землетрясениях вспарывание пород происходит с учетом различных сочетаний указанных подвижек.

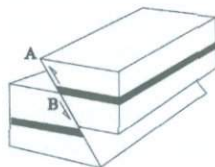
Направление горизонтальной линии, образованной разрывом при пересечении земной поверхности, называется *простирием*, а угол, образованной между простирием и горизонтом, – углом падения. Амплитуды относительных подвижек АВ могут измеряться от нескольких сантиметров до десятков и более метров.



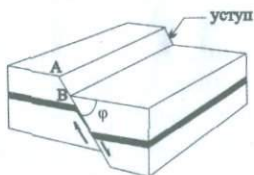
Левосторонний сдвиг



Правосторонний сдвиг



Надвиг или взброс



Сброс

АВ - амплитуда сдвига

$\varphi$  - угол падения

Рис. 50. Движения по разрывам.

Время вспарывания горных пород продолжается в течение нескольких секунд. В процессе вспарывания возникает определенное количество кинематической энергии, которая расходуется на разламывание и разрушение пород, на горизонтальные и вертикальные перемещения плит. Часть этой энергии превращается в тепловую энергию, а небольшая часть распускается в среде в виде упругих сейсмических волн, которые распространяются в теле Земли. Когда сейсмические волны достигают поверхности Земли, они вызывают колебания грунта, которые мы воспринимаем как землетрясение. Так как сейсмические волны генерируются не от одной неподвижной точки, а от движущихся в разные стороны краев вспарываемых пород целой области, они проходят разные пути и достигают поверхности Земли по различным направлениям и в различное время. О свойствах сейсмических волн речь пойдет чуть позже. А пока выясним какое напряженно-деформированное поле образуется на поверхности Земли в начальный момент землетрясения.

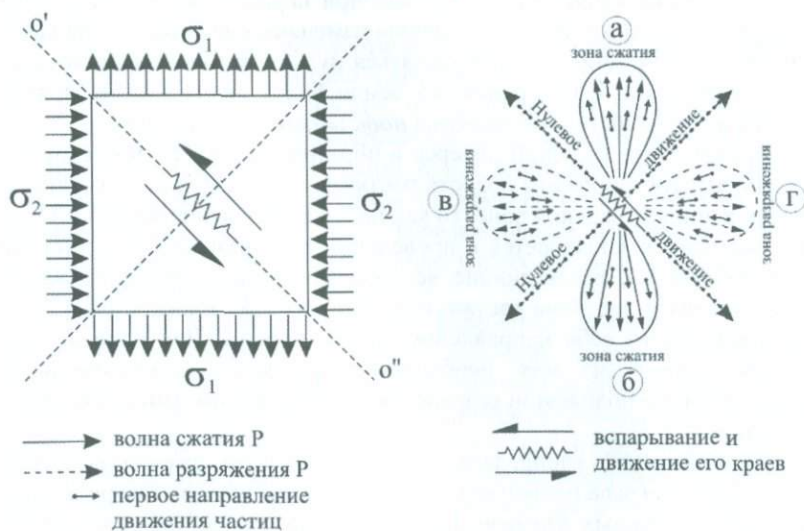


Рис. 51. Зоны сжатия и разряжения (растяжения) при землетрясениях [41, 61].

На рис. 51 показана упрощенная схема очага землетрясения, где направление линии  $0'0''$  совпадает с направлением вспарывания, а стрелками показаны направления упругих перемещений среды. Любо-

пытно, что почувствовал бы человек в первый же миг землетрясения, находясь в эпицентральной зоне землетрясения. Если бы он находился в области **а**, то ему показалось бы, что его толкали, а это значит, что земля под ногами подвергается *сжатию*. То же самое он почувствовал бы находясь в области **б**. Но находясь в области **г** и **в**, ему, наоборот, казалось бы, что Земля уходит из-под своих ног, т.е. грунт в этих областях подвергается растяжению. В момент разрыва верхнее крыло вспарываемой породы гонит в область **а** волну сжатия, а в область **в** – волну растяжения, нижнее крыло, наоборот, гонит в область **б** волну сжатия, а в область **г** волну растяжения.

Таким образом, эпицентральною зону можно разделить на четыре диагонально расположенные зоны, в двух из которых первым выступает *волна сжатия*, а в двух других – *волна растяжения* (разряжения). Вдоль направления трещины (вспарывания) движение среды взаимно уравниваются, и в этом направлении смещения среды отсутствуют. Логично, что они будут отсутствовать также в перпендикулярном к линии разрыва направлении. Так как при пересечении взаимоперпендикулярных плоскостей перемещения изменяют свой знак, то на самих этих плоскостях они должны равняться нулю. Эти плоскости, которые при пересечении с поверхностью Земли будут иметь вид не прямых линий, а окружностей, называются *нодальными* плоскостями.

Представляет большой интерес и обратная задача: если инструментально зарегистрированы области растяжения и сжатия на поверхности Земли в эпицентральной зоне, то как найти направление разрыва. Ответ на этот вопрос заключается в проведении двух взаимоперпендикулярных плоскостей, разделяющие всю исследуемую территорию на две зоны сжатия и две зоны растяжения. Одна из этих плоскостей и будет представлять из себя направление линии разрыва. Для однозначного выбора одного из них необходимо привлечь дополнительную информацию о положении разрыва по тектоническим данным и другие сведения.

Закономерность распределения зон сжатия и растяжения на поверхности Земли играла большую роль в деле различения землетрясения от подземных ядерных взрывов. На самом деле при подземных ядерных взрывах сигналы первых вступлений всех сейсмических станций вокруг эпицентра будут соответствовать *только зоне сжатия* в отличие от, как было сказано выше, чередующих зон сжатия и растяжения при землетрясениях. Но несмотря на такую явную очевидность этого явления, до сих пор имеются разногласия между специалистами в вопросе различения ядерного взрыва от землетрясения.



## 5. РЕГИСТРАЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сейсмология как наука не может развиваться без многосторонней информации, получаемой во время землетрясения с помощью приборов.

**Сейсмографы.** Приборы, регистрирующие движения земной поверхности при землетрясениях, называются *сейсмографами*. Сейсмографы записывают перемещения (смещения) грунта. Впервые они появились лишь в 80-90-е годы XIX века и поэтому записи землетрясений имеются, начиная с этого времени. Записи сейсмографов, показывающие изменение смещения почвы во времени, называются *сейсмограммами*. Смещения почвы обычно измеряются *миллиметрами*, а время – *секундами*.

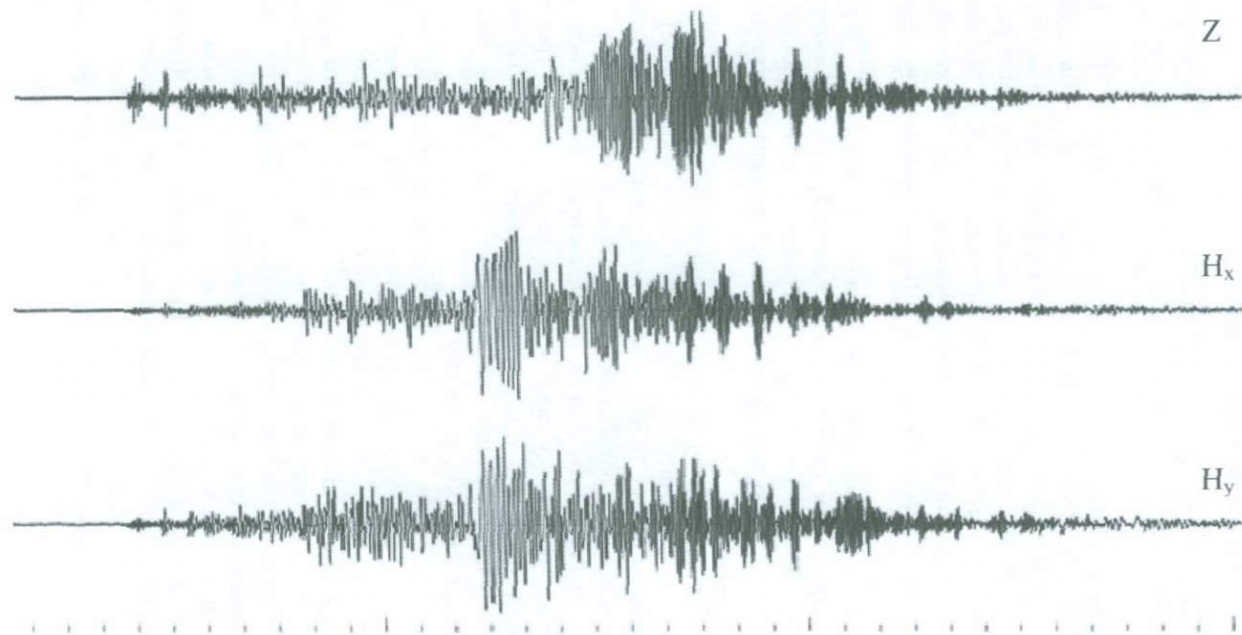
Все сейсмографы состоят из трех основных элементов – *упругого маятника, с периодом свободных колебаний  $T_c$  и коэффициентом затухания  $H$* . В начальный период регистр и записывающее устройство имели сложную конструкцию. Запись должна производиться в темном помещении.

В настоящее время разработаны и широко применяются сейсмографы с записью на магнитной ленте (в том числе и цифровые), которые не только экономят бумагу, но и позволяют также результаты записи непосредственно обрабатывать и хранить на компьютерах.

Движение любой точки грунта при землетрясениях происходит в трех направлениях. Поэтому каждый сейсмограф состоит из трех маятников, движущихся в трех (двух горизонтальных и одном вертикальном) взаимоперпендикулярных направлениях, позволяющих получать соответствующие *три* сейсмограммы.

В обычных условиях измерение колебаний производятся относительно некоторого зафиксированного основания, прочно закрепленного в грунте. Землетрясение же за очень короткое время воздействует на обширную территорию Земли, и мы лишаемся возможности зафиксированной опоры. Поэтому в сейсмологии для измерения кинематических параметров грунта (смещение, скорость, ускорение) пользуются *принципом инерции*, суть которого заключается в следующем: если резко сдвинуть подвес упруго висячего маятника, то в первый момент он останется *в покое* и прикрепленное к нему (маятнику) перо может оставить след на бумаге, отражающий относительное движение грунта. Конечно, маятник, отклонившись, сразу начинает качаться, но упругость подвески возвращает маятник в его нормальное положение относительно грунта.





Типичная трехкомпонентальная сейсмограмма землетрясения

Следовательно, если в грунте происходят простые гармонические колебания с амплитудой  $u_0$  и периодом  $T_0$ , то колебание маятника будет сейсмографа будет происходить с тем же периодом  $T_0$  и амплитудой  $B$ , а запись на сейсмограмме – с периодом  $T_0$  и амплитудой  $vB$ , где  $v$  коэффициент увеличения записи. Для данного параметра затухания  $h$  и коэффициента  $v$ , чем больше период свободных колебаний  $T_c$ , тем сейсмограф обладает идентичностью для записи землетрясений с большим диапазоном периодов колебания грунта от нуля до  $T_0 \leq 0.5 T_c$ .

Современные сейсмографы имеют большую чувствительность. Периоды их свободных колебаний доходит до  $T_c=10$ сек, а коэффициенты их увеличения доходят до 100000 раз. Они могут записывать землетрясения, происходящие на сколь угодно большом расстоянии от места регистрации с амплитудой до 0.001мм. Все сейсмографы настроены на непрерывный режим работы. Однако они «зашкаливают» при близких сильных землетрясениях из-за больших перемещений грунта до нескольких сантиметров; запись выходит за пределы допустимого и становится неразборчивой. Таким образом, сейсмографы в основном предназначены для записи перемещений грунта (сейсмограмма) при слабых местных и сильных дальних землетрясениях. В сейсмологии, сейсмограммы играют огромную роль. Они используются для определения основных параметров землетрясения: положение гипоцентра и эпицентрального расстояния, продолжительности толчков, величины магнитуды и изучения механики очага.

***Акселерографы.*** Инженеров-проектировщиков и строителей больше интересует, как ведут себя здания и сооружения, которые подвергаются воздействию сильных колебаний грунта при близких землетрясениях, т.е. такие сотрясения грунта, которые причиняют им повреждения. В зданиях и сооружениях во время землетрясения генерируются инерционные силы, значения которых зависят как от их массы и динамических характеристик, так и от ускорения их основания (грунта). Приборы, способные измерять не смещение грунта, а ее ускорение называются ***акселерографами*** (рис.19). Полученная запись называется ***акселерограммой***, которая, несмотря на то, что внешне похожа на сейсмограмму, имеет другие кинематические характеристики и в действительности является ее второй производной. ***Акселерографы предназначены для записи близких сильных землетрясений.*** Они не реагируют на местные слабые и дальние сильные землетрясения. В отличие от сейсмографов акселерографы работают не в непрерывном, а в так называемом ***«ждущем» режиме.*** Они включаются автоматически от самого землетрясения и питаются от аккумуляторных батарей, поскольку при сильных землетрясениях источник электрического тока может отключиться. В отличие от

сейсмографов коэффициент увеличения (чувствительности) невелик и находится в пределах 1-20.

Кроме того, они при помощи специального устройства (реле) автоматически срабатывают при сравнительно сильных толчках и производят непрерывную регистрацию ускорения грунта в течение 40-50 сек. При последующих сильных ударах они вновь включаются. Акселерографы устанавливаются не только на свободной поверхности грунта, но и на разных уровнях зданий, мостов, плотин, атомных станций, на других ответственных сооружениях. Для инженеров-строителей такие записи представляют огромную ценность. Они способствуют совершенствованию расчетных схем сооружений, методов определения сейсмических сил и расчета сооружений на сейсмические воздействия и нормативных документов по сейсмостойкому строительству.

Сеть регистрации ускорений грунта или, как принято у специалистов, *«сеть сильных движений»* была основана в начале 30-х годов в США начиная от записи ускорения грунта при землетрясении в Лонг-Биче (10 марта 1933 г.). В настоящее время во всем мире установлены более чем 8000 акселерографов (большая часть из них в США и Японии). Они позволяют при одном землетрясении иметь одновременные записи ускорений в более 300 участках грунтов с различными инженерно-геологическими условиями и на разных уровнях зданий и сооружений с радиусом более 200 км от эпицентра землетрясения. В отличие от сейсмографа, чем меньше период свободных колебаний акселерографа  $T_c$  (не более чем 0.1 сек), тем с большей точностью можно регистрировать ускорение грунта с большим диапазоном периодов колебаний грунта  $T_0$ . Современные акселерографы имеют период  $T_c = 0.01$  сек и могут регистрировать очень мощные землетрясения с ускорением колебания грунта до 2 g.

Созданные для обработки записей землетрясений электронные измерительно-вычислительные комплексы позволяют при наличии одного вида записи грунта получить искусственные записи двух других видов путем дифференцирования или интегрирования записей. Часто из акселерограммы грунта сильного землетрясения путем интегрирования получают соответствующие искусственные велисограммы и сейсмограммы грунта, так как, как было отмечено выше, при сильных землетрясениях обычным сейсмографом невозможно регистрировать большие перемещения грунта, достигающие до нескольких сантиметров.



## 6. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Как отмечено выше, землетрясение – результат внезапного испарывания механически напряженных областей в земной коре. Вследствие испарывания горных пород большая часть огромной потенциальной энергии, накопленной за длительный период подготовки землетрясений, освобождаются в среде в виде сейсмических волн, которые распространяются во всем теле Земли. Инструментальные регистрации землетрясений, о которых речь шла выше, создают широкие возможности для всестороннего изучения сейсмических волн, которые имеют большое прикладное значение не только в сейсмологии, но и для изучения внутреннего строения самой Земли и разработки методов в области поиска, разведки и добычи полезных ископаемых.

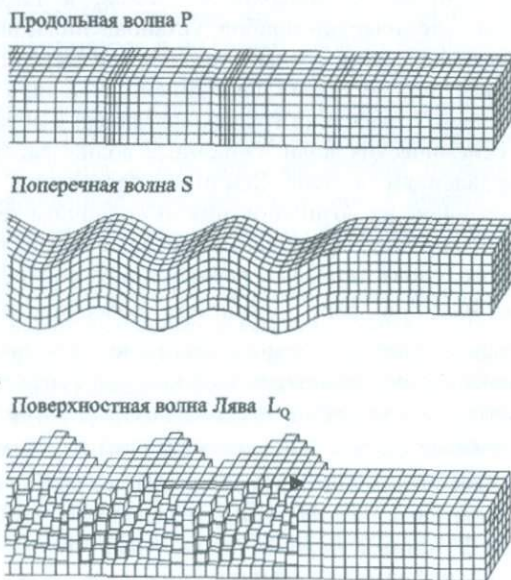
Существуют два основных типа сейсмических волн – *объемные* и *поверхностные* (Рис. 52). Объемные сейсмические волны распространяются в теле (объеме) Земли как упругие или звуковые волны. Поверхностные волны распространяются по поверхности Земли, *наподобие волн, распространяющихся по поверхности морей, океанов.* Человек, находящийся на поверхности земли, а также надземное сооружение или сейсмический прибор, установленный на поверхности Земли, эффект испарывания среды в коре Земли (землетрясение) сначала воспринимает в виде ударов двух объемных волн, а потом только в виде колебательных движений грунта, связанных с образованием поверхностных сейсмических волн. Объемные волны распространяются по всем направлениям в теле Земли и *постепенно ослабляются*, удаляясь от источника их возникновения. В сплошном теле возникают два типа объемных волн – *продольные*, которые обозначаются буквой **P** (от латинского слова *primae* – первый): они распространяются с *большой скоростью*  $v_p$  и рано достигают поверхности Земли, тем самым оповещая о факте землетрясения, и поэтому они называются также *первичными*; и *поперечные* волны, которые обозначаются буквой **S** (от латинского слова *seconde* – второй), которые распространяются с *меньшей скоростью*  $v_s$ , чем продольные волны и достигают поверхности Земли с *несколько опозданием*, но с более резкой силой удара и тем самым окончательно подтверждая, что на самом деле имело место землетрясение. В земных породах продольные волны **P** последовательно вызывают *деформации растяжения и сжатия*, а поперечные волны **S** – *деформации сдвига*; поэтому часто волны **S** называют также *волнами сдвига* (рис. 52).



Эти естественные особенности сейсмических волн **P** и **S** в отдельных случаях с применением не сложных современных технических средств (например, звуковая сигнализация в помещении в момент вступления волны **P**) могут способствовать эвакуации людей из зданий в начальном более безопасном промежутке времени (до прихода волны **S**) начавшегося землетрясения.

Как при любом разрушении или срезе обычного материала, так и при землетрясениях процесс расщепления горных пород начинается с одной локальной области (точки) и последовательно продолжается, распуская объемные сейсмические волны разной интенсивности и периодов в зависимости от общей глубины расщепляемой толщи, количества и размеров имеющихся в них трещин. Несмотря на то, что от очага землетрясения непрерывно излучаются объемные волны, любая частица среды, совершая обратнопоступательные движения, остается почти на том же самом месте, откуда она начала двигаться.

Так как все тела, твердые и жидкие способны передавать давление, то продольные волны **P** могут *пересекать все твердые и жидкие* области Земли. Но поперечные волны **S** могут пересекать *только твердые* области Земли.



Направление распространения волны

Рис. 52. Распространение волн в сплошной среде.

*Поверхностные сейсмические волны* обозначаются буквой **L** (латинское слово Long – длинный). Они распространяются по поверхности Земли, захватывая лишь неглубокую массу (зону) под ней. Поверхностные волны **L** распространяются с меньшей скоростью  $v_L$ , чем продольные **P** и поперечные волны **S**. Кроме этого, поверхностные волны имеют **более длинный период** (отсюда обозначение **L**) колебания, чем объемные волны, и обычно они становятся причиной разрушения сооружения.

Сложное движение грунта, которое мы ощущаем на любой точке поверхности Земли во время землетрясения и которое фиксируют сейсмографы, является результатом наложения движений частиц грунта по разным типам волн. На рис. 53а показана типичная сейсмограмма землетрясения с указанием моментов вступления волн **P**, **S**, **L**. Как видно из рисунка, если расстояние от регистрирующей станции до гипоцентра обозначим через  $\Delta$ , а время пробега волн **P** и **S** от очага до места регистрации соответственно через  $t_p$  и  $t_s$ , то будем иметь:

$$t_p = \frac{\Delta}{v_p}, \quad t_s = \frac{\Delta}{v_s}, \quad \Delta t = t_s - t_p,$$

откуда вытекает, что

$$\Delta = \Delta t \frac{v_s v_p}{v_p - v_s},$$

где  $\Delta t$  – время опоздания прихода волны **S** по отношению к времени прихода волны **P** (интервал времени между вступлениями волн **P** и **S** на сейсмограмме),  $v_p$  и  $v_s$  – соответственно скорости распространения продольных и поперечных волн. Скорости распространения сейсмических волн  $v_p$  и  $v_s$  не только отличаются друг от друга, они зависят от материала среды и глубины их заложения.

Для скальных грунтов величины скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн  $v_p$  и  $v_s$  принимаются в следующих пределах:

$$6.2 \text{ км/сек} < v_p < 8.2 \text{ км/сек}$$

$$3.7 \text{ км/сек} < v_s < 4.8 \text{ км/сек}.$$

Эти значения позволяют при оперативных расчетах для удаленных и глубокофокусных землетрясений выражение

$$\frac{v_s v_p}{v_p - v_s}$$

принять примерно равной 10 км/сек и основную формулу для вычисления эпицентрального расстояния представить в следующем упрощенном виде:

$$\Delta \approx 10 \Delta t, \quad (1.11)$$

где  $\Delta$  – в километрах,  $\Delta t$  – в секундах.

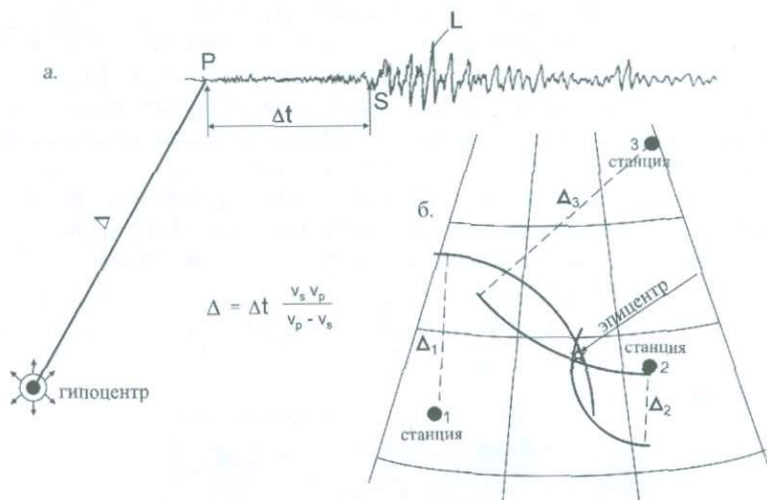


Рис. 53.

- Типичная сейсмограмма землетрясения (а),
- определение места и расстояния до эпицентра землетрясения (б)

Для местных землетрясений с неглубоким гипоцентром значение  $v_p v_s / (v_p - v_s)$  изменяется в пределах 7-9 км/сек. Для землетрясений на территории Республики Армения по нашим исследованиям значения  $\Delta t$  рекомендуется принимать  $\Delta t = 7.1$  км/сек. Согласно Ш. Околото для Японии  $\Delta t = 8$  км/сек.

Координаты эпицентра землетрясения определяются по записям трех сейсмических станций, как это показано на рис. 53б. Имея координаты любых трех сейсмических станций на карте и их расстояние до эпицентра  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  и  $\Delta_3$ , положение координат эпицентра устанавливается как координаты точки пересечения трех окружностей с радиусами  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  и  $\Delta_3$ . Эти окружности из-за возможных ошибок при определении  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  и  $\Delta_3$  не пересекаются в одной точке на карте; обычно вместо одной точки получается небольшой треугольник (с кривыми сторонами), центр которого принимается за точку эпицентра на карте.

Определение глубины очага землетрясения более сложная задача. Оно связано как с углом пересечения с поверхностью Земли сейсмических волн, так и с разностью времен вступления прямых и отраженных продольных сейсмических Р волн.

В действительности координаты эпицентра и глубина очага землетрясения устанавливаются не только по записям трех сейсмических станций, а в результате обобщения записей регистрации большего числа сейсмических станций. В этом важном деле между сейсмологами всех стран мира имеет место тесное сотрудничество, которые позволяют с использованием современных средств передачи и обработки информации за короткое время с достаточной точностью определить параметры происшедшего землетрясения.

## 7. СКОРОСТИ И ЛУЧИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Анализ динамических уравнений теории упругости показывает, что значения скоростей сейсмических волн  $v_p$  и  $v_s$  определяются по формулам:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

где  $E$ -модуль упругости среды,  $G$ - модуль сдвига,  $\rho$ -плотность,  $\nu$  -коэффициент Пуассона.

Так как  $E = 2G(1 + \nu)$ , при  $\nu = 0.25$ , будем иметь

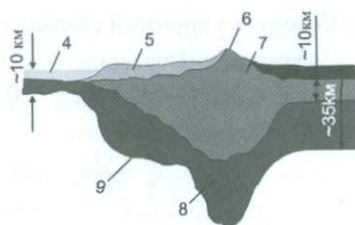
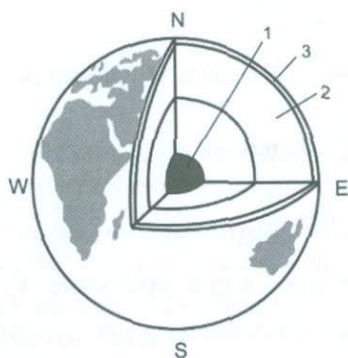
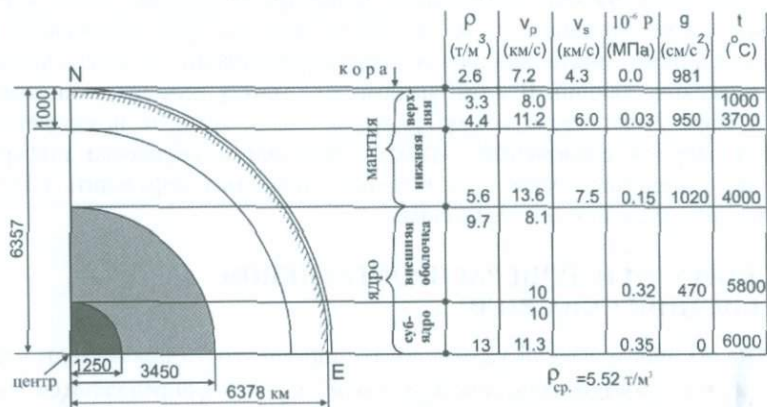
$$v_p = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} v_s = \sqrt{3} v_s = 1.73 v_s.$$

Для неглубоких землетрясений (пород)  $\nu = 0.22$  и отношение  $v_p/v_s$  будет равно 1.67, а для глубокофокусных землетрясений  $\nu = 0.27$ ,  $v_p/v_s = 1.78$

Исследования показывают, что скорости  $v_p$  и  $v_s$  по глубине Земли возрастают. Так как значение плотности пород тоже по глубине возрастает, то, как видно, из формул  $v_p$  и  $v_s$  вытекает, что упругие характеристики  $E$  и  $G$  по глубине должны расти в большой степени, чем плотность. Многочисленные исследования показывают, что механические свойства центрального ядра Земли приближается к свойствам жидкости. Имеются прямые доказательства, что ядро не пропускает поперечные S



волны, т.е. скорость в ядре  $v_s = 0$ . Внутри земли имеются две основные разрывные **границы** на расстояниях 30-60 км (граница Мохоровичича) и 2900 км от поверхности Земли на которых значения скоростей сейсмических волн претерпевают скачкообразные изменения.



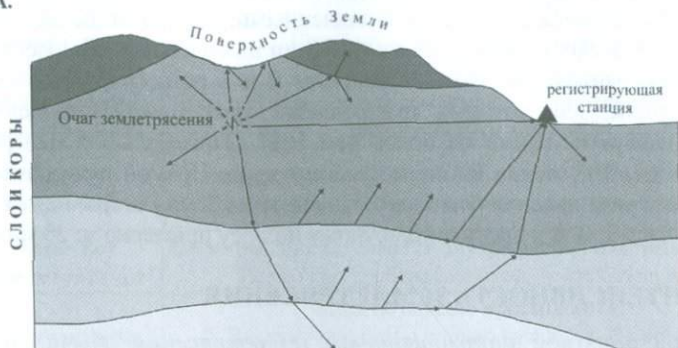
- 1 - ядро,
- 2 - мантия,
- 3 - кора,
- 4 - океан,
- 5 - осадочный слой,
- 6 - гора,
- 7 - гранит,
- 8 - базальт,
- 9 - поверхность Мохоровичича.

- $\rho$  - плотность,
- $v_p$  - скорость продольной волны,
- $v_s$  - скорость поперечной волны,
- $P$  - давление,
- $g$  - ускорение свободного падения,
- $t$  - температура.

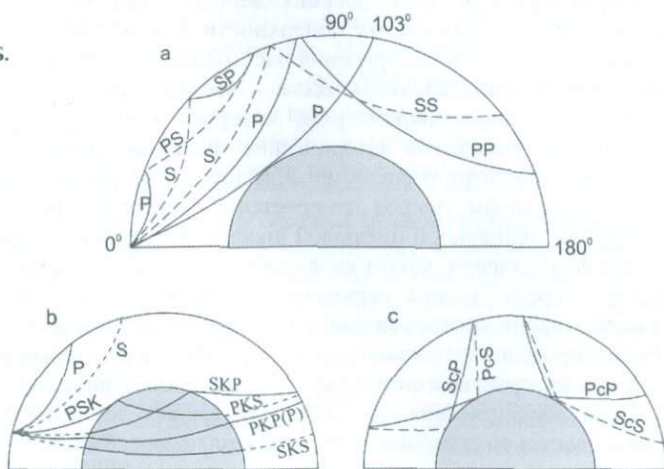
Рис. 54. Стрoение Земли по геофизическим данным.

В сейсмологии как в оптике принимается, что сейсмические волны распространяются как лучи света. Они переходя из одной среды вдругую отражаются и преломляются. На сейсмограммах волны Р и S часто встречаются несколько раз. Это в основном обусловлено их отражением и преломлением от поверхности Земли и от различных геологических слоев земной коры.

А.



Б.



- а - отраженные от поверхности Земли волны Р и S
- б - Р и S волны, пересекающие ядро
- с - Р и S волны, отраженные от поверхности ядра

— пути продольных волн Р  
 - - - пути поперечных волн S

Рис. 55. Пути распространения отраженных и преломленных волн А и лучи телеметрических объемных сейсмических волн Б.

Лучи сейсмических волн Р и S распространяющиеся от гипоцентра через кору до станции регистрации почти не отличаются друг от друга, так как отношение их скоростей по всей трассе прохождения изменяется несущественно. Так как величины обеих скоростей по глубине увеличиваются лучи распространения искривляются с выпуклостью, направленной вниз.

По мере уменьшения угла падения сейсмических волн у гипоцентра их лучи становятся более искривленными, проникая более глубокие области и выходя на поверхности Земли на более дальних расстояниях. Прямые, неотраженные от ядра волны Р и S регистрируются до таких расстояний, для которых центральный угол между гипоцентром и станцией регистрации не более чем  $103^0$ . При больших центральных углах чем  $103^0$  волна Р уже пересекает ядро. Прямой луч волны Р при нулевом угле падения совпадает с диаметром Земли и проходит из одного полюса Земли к противоположному полюсу примерно за 20 минут.

## 8. ИНТЕНСИВНОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Под понятием *интенсивности землетрясения* обычно подразумевается величина силы землетрясения (вернее – степень его последствия) на определенном месте на поверхности Земли, находящемся на определенном от очага землетрясения расстоянии. Способ оценки силы землетрясения на определенном месте – это задание величины этой силы одним цифровым параметром, который называется интенсивностью. Сегодня, продолжая исторические традиции времен доинструментальной сейсмологии, степень последствия землетрясения или величина причиняемого им ущерба измеряется *в баллах* (от французского слова – *ball*) по специальной цифровой шкале. Хотя оценка такого сложного природного явления, каким является воздействие землетрясения на окружающую среду, одним параметром нелогична, так как уровень повреждений зданий и сооружений существенно зависит от их начальной сейсмовооруженности, качества строительства и грунтовых условий, тем не менее на практике еще действуют различные цифровые шкалы оценки силы землетрясения баллами. Для слабых землетрясений эта оценка связывается со степенью их восприятия человеком и животными.

Шкалы оценки интенсивности землетрясения возникли значительно раньше, чем первые инструментальные их записи – сейсмограммы и акселерограммы. Начиная с 18-го столетия появились более чем 50 шкал по оценке интенсивности землетрясения. Все шкалы интенсивности основываются на трех основных показателях:

- воздействие землетрясения на людей и на бытовые предметы,
- воздействие землетрясения на здания и сооружения различных типов (по их повреждениям),

- воздействие землетрясения на природную окружающую среду
- остаточные явления в грунтах и изменение режима грунтовых и подземных вод.

Таблица 11. Сейсмическая шкала интенсивности MSK-64

Баллы	Наименование землетрясения	Краткое описание последствий землетрясения
I	<b>Неощутимое землетрясение</b>	Колебания грунта обнаруживаются только приборами.
II	<b>Едва ощутимое землетрясение</b>	В отдельных случаях землетрясение ощущается людьми, находящимися в покое.
III	<b>Слабое землетрясение</b>	Землетрясение ощущается многими людьми – во многих случаях неосознавая, что это землетрясение.
IV	<b>Заметное землетрясение</b>	Землетрясение ощущается внутри здания многими людьми. Возможно дребезжание окон, дверей, посуды.
V	<b>Пробуждение</b>	Многие спящие просыпаются. Висячие предметы сильно качаются. Животные беспокоятся.
VI	<b>Испуг</b>	Легкие повреждения в зданиях, тонкие трещины в штукатурке. Многие люди, находящиеся в зданиях, пугаются и выбегают на улицу.
VII	<b>Повреждение зданий</b>	Трещины в штукатурке, выколы отдельных кусков, тонкие трещины в стенах: большинство людей испуганы и выбегают из помещений, еле удерживаясь на ногах.
VIII	<b>Сильные повреждения зданий</b>	Крупные сквозные трещины в стенах, дымоходные трубы и парапеты падают. Испуг и паника. Водители автомашин обеспокоены. Обламываются ветви деревьев.
IX	<b>Всеобщие повреждения зданий</b>	В отдельных зданиях обвалы, разрушаются стены, перекрытия и покрытия. Всеобщая паника. Животные мечутся и издают крики.
X	<b>Всеобщие разрушения зданий</b>	Во многих зданиях обвалы. Трещины на грунтах шириной до 1 метра. Искривление железнодорожных рельсов, образование волнообразной поверхности на дорогах, образование оползней. Возникновение новых источников и озер.
XI	<b>Катастрофа</b>	Разрушение и обвалы мостов, плотин, подземных трубопроводов. Многочисленные горные обвалы, осыпание рыхлых пород с крутых склонов.
XII	<b>Изменение рельефа</b>	Всеобщие обвалы надземных и подземных сооружений. Коренные изменения на поверхности Земли, образование новых озер, водопадов, изменения русла рек.



В настоящее время в разных странах мира действуют различные шкалы интенсивности. Наиболее распространенные из них являются MSK-64, Модифицированная шкала *Меркалли* MM – 1956 и Шкала сейсмической интенсивности *JMA-1949*, *Европейская Макросейсмическая шкалу EMS'92*. Наиболее распространённая из них (в том числе и в Армении) является *MSK-64*.

Краткое описание международной шкалы сейсмической интенсивности *MSK-64* (Medvedev, Sponheuer, Karnik), авторами которой являются С.В. Медведев (Москва), У. Шпонхеер (Йена) и В. Карник (Прага) приведены в таблице 11.

Очевидно, что наибольшая интенсивность землетрясения должна иметь место в эпицентре землетрясения. Обычно так и бывает, если очаг землетрясения не находится под океаном. Удаляясь от эпицентра, интенсивность снижается. Для установления степени снижения интенсивности по результатам последствий землетрясения строят карту так называемых *изосейст землетрясения* – замкнутые площадки территорий одинаковой интенсивности вокруг эпицентра. Они разделяют территорию на зоны с различной интенсивностью. Наблюдения показывают, что при двойном увеличении эпицентрального расстояния интенсивность землетрясения снижается на одну единицу. Но снижение интенсивности зависит также от глубины очага землетрясения. Чем ближе очаг к поверхности Земли, тем быстрее снижается интенсивность по мере удаления от эпицентра. Отсюда важный практический вывод – *чем плотнее изосейсты, тем очаг ближе к поверхности Земли*. Таким образом, карты изосейстов в какой-то мере удобный способ обозначить место землетрясения, размеры и положения пострадавшей территории и влияние геологического строения на данном месте. Так как карты изосейст составляют по описательным сводкам шкал и в многих случаях без учета местных грунтовых условий, они также страдают вышеуказанными для макросейсмических шкал недостатками. И не случайно, что карты изосейст, построенные для одного и того же землетрясения различными авторами, часто сильно расходятся друг от друга.

Главный недостаток всех макросейсмических шкал, по нашему мнению, заключается в том, что определение интенсивности по ним связано со множеством субъективных факторов и большим диапазоном признаков, служащими основой для установления одной и той же интенсивности. Это дает возможность специалистам, привлеченным к изучению последствий землетрясений, пользоваться теми положениями шкалы, которые удовлетворяют их желаниям, особенно в тех случаях, когда интенсивность землетрясения (степень повреждения) служит

основанием для возмещения ущерба владельцам домов со стороны государственных организаций и страховых компаний.

Кроме того, несмотря на старание авторов шкал включить в нее все основные типы зданий и сооружений, в действительности эти типы в сейсмоактивных странах мира встречаются в таком множестве, что всегда возникает естественный вопрос об их идентичности с типами, приведенными в действующей шкале. Другие, не менее важные факторы, оказывающие существенное влияние на степень повреждений зданий и сооружений и игнорированные шкалами, это влияния грунтовых условий и вертикального компонента сейсмического воздействия (в зависимости от эпицентрального расстояния). Поэтому после каждого сильного землетрясения начинаются дискуссии о приемлемости основных положений шкал при оценках степеней повреждений зданий данной страны. В частности, такая ситуация сложилась после Спитакского землетрясения 1988 года в Армении, Эрзрумского – 1939 года и Измитского – 1999 года в Турции. Поэтому не случайно, что каждая страна старается иметь свою собственную шкалу интенсивности. Любопытно заметить, что по японской шкале “разрушительное” и “опустошительное” землетрясения в основном характеризуются по количеству обрушения традиционных японских деревянных домов. Это еще раз косвенно подтверждает тот факт, что 1-2-этажные деревянные дома являются наиболее сейсмостойкими по сравнению с аналогичными из других материалов.

## **9. МАГНИТУДА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ. ШКАЛА МАГНИТУД РИХТЕРА**

Рассмотренное выше понятие “интенсивность” землетрясения характеризует меру его последствия для определенной местности, без указания о его (землетрясения) силе (мощи) в целом как физического явления. Поэтому в конце XIX века были предложения (шкалы) оценить интенсивность землетрясения только в эпицентральной зоне. В дальнейшем были предложения судить о силе землетрясения по величинам площадей, пострадавших от него территорий. Землетрясение, вызывающее повреждения на территориях с большим диаметром, считалось принадлежащим к классу более сильных. Как видно из табл. II, с одной стороны, характеристики интенсивности землетрясения во многих случаях обусловлены уровнем восприимчивости людей (которое нельзя выразить количественными показателями), а с другой – степень повреждений зданий и сооружений существенно обусловлены качеством строительства и грунтовыми условиями. При установлении же силы землетрясения по площадям поврежденных территорий встает вопрос о глубине очага. Таким образом, возникла настоятельная необходимость оценить силу



землетрясения независимо от его последствий каким-либо числовым параметром, получаемым при помощи прибора (сейсмографа) во время землетрясения *независимо от места регистрации*. Так как причиной всех макросейсмических эффектов, включенных в любую шкалу интенсивности и наблюдаемых при землетрясениях, являются перемещения грунта, то естественно при оценке силы землетрясения варьировать значением *перемещения грунта*. Так возникла идея магнитуды землетрясения. *Магнитуда землетрясения – это мера оценки его силы по величине перемещений частиц грунта во время этого землетрясения*. Латинское слово “magnitude” в переводе на русский язык означает “величина”. Фактически, говоря о магнитуде землетрясения, необходимо подразумевать его величину. Чем больше уровень перемещений частиц грунта во время землетрясения, тем больше его магнитуда, т. е. сильнее само землетрясение.

В формулировании понятия магнитуды принимали участие многие специалисты в области сейсмологии. В частности, работники сейсмических станций часто задумывались над несоответствием степени беспокойности или страха людей, вызываемого землетрясением, и характером его реальной сейсмограммы, записанной на станции. Слабый местный толчок всегда имел большой отклик, тогда как сильное далекое землетрясение в малонаселенной пустыне, горах или же в океане часто оказывается незамеченным за исключением самих сотрудников сейсмических станций, располагающими сейсмограммами землетрясения. Самим сейсмологам также труднее было правильно классифицировать землетрясения по их силе, независимо от их последствий. Большой вклад детализации понятия магнитуды внес профессор Калифорнийского технологического института (в Пасадене) Чарльз Рихтер, который разработал план разделения сильных и слабых землетрясений на объективной инструментальной основе, чем субъективные суждения об их последствиях. Главный аксиоматический принцип оценки заключается в том, что из двух землетрясений, имеющих один и тот же гипоцентр, большое (сильное) должно регистрироваться с большой амплитудой колебания грунта на любой станции. При одной и той же силе землетрясения сейсмограф, установленный на близком к эпицентру расстоянии, будет регистрировать большие перемещения грунта, чем на далеком расстоянии. Следовательно, для определения магнитуды прежде всего встал вопрос о выборе места регистрации землетрясения.

Как отмечено выше, Рихтер поставил вопрос *разделения* землетрясений на *сильные* и *слабые*. Поэтому возникла необходимость установления “*стандартного*” землетрясения в качестве эталона. Для стандартного землетрясения место регистрации Рихтер выбрал на расстоянии

*100 км от эпицентра.* С другой стороны, даже на одинаковом расстоянии от эпицентра величины перемещений частиц грунта участков с различными инженерно-геологическими характеристиками существенно отличаются. Поэтому было уговорено, что регистрирующий прибор должен быть установлен на *участках со скальными грунтами.* В качестве прибора Рихтер выбрал крутильный короткопериодный *сейсмограф Вуда-Андерсона*, имеющий большое распространение в 30-х годах прошлого столетия. Основные параметры этого сейсмографа: период свободных колебаний маятника – 0.8 сек, коэффициент затухания –  $h=0.8$ , коэффициент увеличения – 2800 (реальное перемещение грунта на ленте записи увеличивается в 2800 раз). Вот как сформулировал понятие магнитуды сам Рихтер: *"Магнитуда любого толчка определяется как десятичный логарифм выраженной в микронах максимальной амплитуды записи этого толчка, записанной стандартным короткопериодным крутильным сейсмографом Вуда-Андерсона на расстоянии 100 км от эпицентра"*. Заранее отметим, что не обязательно каждый раз иметь именно сейсмограф Вуда-Андерсона в точности на расстоянии 100 км от эпицентра (такое может случиться совершенно случайно), просто, надо вводить поправки для приведения результатов измерений, полученных на других расстояниях и другими сейсмографами, к тем, которые были бы получены на расстоянии 100 км сейсмографом Вуда-Андерсона.

Следовательно, магнитуда землетрясения, которая обозначается буквой  $M$ , будет

$$M = \lg A_c,$$

где  $A_c$  – *величина перемещения скального грунта на сейсмограмме в микронах*, зарегистрированной сейсмографом Вуда-Андерсона на расстоянии 100 км. Если на сейсмограмме землетрясения, зарегистрированной сейсмографом Вуда-Андерсона, на расстоянии 100 км максимальное перемещение грунта равно 1 микрону (1 микрон = 0.001 миллиметру), то магнитуда этого землетрясения принимается равной  $M = \lg 1 = 0$ . Но это не означает, что не было землетрясения, просто оно было очень слабым. Аналогичным образом, если максимальное перемещение грунта равно 10 микронам, то магнитуда такого землетрясения будет  $\lg 10 = 1$ . В действительности магнитуде  $M=1$  будет соответствовать то землетрясение, во время которого *на расстоянии 100 км от эпицентра действительное перемещение скального грунта* будет равно:

$$A = \frac{A_c}{2800} = \frac{10}{2800} = 0.00357 \text{ микрону.}$$



Исходя из вышеприведенного определения магнитуды с удивлением можно заметить, что она может иметь и отрицательные значения. Так, если на сейсмограмме землетрясения, записанной сейсмографом Вуда-Андерсона, на расстоянии 100 км от эпицентра перемещение грунта равно 0.1 микрону, то магнитуда такого землетрясения будет

$$M = \lg 0.1 = \lg \frac{1}{10} = \lg 1 - \lg 10 = -1.$$

В этом случае действительное перемещение грунта будет

$$A = \frac{0.1}{2800} = 0.0000357 \text{ микрон.}$$

Запись такого перемещения грунта, конечно, не легкое дело. Она предполагает создание сейсмографов с большими коэффициентами увеличения. К счастью, отметим, что в настоящее время созданы такие сверхчувствительные сейсмографы, которые способны зарегистрировать землетрясения с магнитудами до  $M = -3$ . *Таким образом, при увеличении магнитуды на единицу амплитуда колебания грунта возрастает в 10 раз.*

Шкала магнитуд Рихтера (если его вообще можно называть шкалой) не имеет верхнего предела. Поэтому ее часто называют “открытой” шкалой, так как никто не может прогнозировать, когда и с какой силой будет самое сильное землетрясение, хотя верхний предел магнитуды обусловлен (ограничен) предельным значением прочности земных пород. По-видимому, такое можно утверждать и о нижнем пределе шкалы, так как со временем, путем усовершенствования сейсмографов, создаются возможности для регистрации самых слабых землетрясений.

Изданной в 2002 году [80], мы отметили два землетрясения в качестве самых сильных, от начала инструментальных регистраций, имеющих магнитуду  $M=8.9$ . Оба эти землетрясения происходили под океаном в зонах субдукции. Первое землетрясение происходило в 1905 году у побережья Эквадора, второе – в 1933 году в побережьях Японии. В 2002 году мы высказали риторический вопрос: может, наша планета не способна генерировать землетрясения с магнитудой больше чем 8.9 и считали, что ответ на этот вопрос может дать только время. Прошло немного времени и мы получили ответ на этот вопрос: *на нашей планете Земля возможны землетрясения с магнитудой больше чем 8.9. Первое землетрясение произошло 26 декабря 2004 года. На побережье острова Суматра произошло самое катастрофическое землетрясение на Земле с магнитудой более 9.0 (9.12), вызвавшее огромное цунами и ставшее причиной смерти более чем 300000 людей. Второе землетрясение произошло в 11 марта 2011 года в Японии. Ниже приведены данные и факты заимствованные из «Землетрясение в*

Японии (2011) – Википедия». Землетрясение произошло у восточного побережья острова Хонсю с координатами расположения эпицентра 38.0N и 142.9E, глубиной очага 32 км и магнитудой  $M=9.0-9.1$  в 130 км к востоку от города Сендай. Оно произошло на расстоянии 70 км от ближайшей точки побережья. Землетрясению предшествовала серия крупных форшоков начавшаяся 9-ого марта толчка с магнитудой  $M=7.2$  и продолжавшаяся тремя толчками с магнитудой  $M=6.0$ . За одну минуту до начала основного толчка землетрясения 11 марта, центр системы раннего предупреждения (около 1000 сейсмографов) города Токио передала по телевидению сообщение о приближающемся землетрясению с магнитудой  $M=9.0$ . Это стало возможно благодаря опозданию на 90 секунд поперечной волны S (со скоростью  $v_s=4$  км/сек), для преодоления расстояния 373 км до Токио. Считается, что это спасло жизни большого количества людей.

Очевидно, что если землетрясение записано не сейсмографом Вуда-Андерсона, а любым другим сейсмографом, то магнитуда землетрясения будет

$$M = \lg 2800A,$$

где  $A$  – уже максимальное значение *действительного перемещения грунта* (не на сейсмограмме) в микронах, записанная любым сейсмографом.

Возникает естественный вопрос – как определили магнитуду, если сейсмограф установлен не на расстоянии 100 км от эпицентра, а на произвольном расстоянии. Для этого сам Рихтер для Калифорнийских землетрясений построил калибровочную кривую для перехода от амплитуд, наблюдаемых на произвольном эпицентральной расстоянии к амплитудам, ожидаемым на расстоянии 100км. Этот тип магнитуды в настоящее время называется локальной (местной) магнитудой –  $M_L$ , и определяется формулой Рихтера

$$M_L = \lg A + 3 \lg \Delta - 2.92,$$

где  $A$  – максимальное значение *действительного* перемещения грунта по объемным поперечным волнам S в микронах, записанного любым сейсмографом,  $\Delta$  – эпицентральной расстояние в километрах.

Эта формула применима только для мелкофокусных местных землетрясений типа изученных Рихтером с  $\Delta \leq 600$  км.

Для землетрясений с эпицентральной расстоянием  $\Delta > 600$  км на сейсмограммах преобладают поверхностные волны с большими периодами. Для мелкофокусных, удаленных землетрясений (телесеismicических) Гутенберг вывел следующую формулу магнитуды  $M_S$ :

$$M_S = \lg A + 1.656 \lg \Delta + 1.818,$$

где  $A$  – горизонтальная компонента действительного перемещения грунта (в микронах), вызванного поверхностными волнами с периодом около 20 секунд.

Особенность перечисленных формул заключается в том, что при увеличении эпицентрального расстояния  $\Delta$  максимальное перемещение грунта  $A$  уменьшается и наоборот, поэтому в итоге одно и то же самое землетрясение, зарегистрированное на разных расстояниях от эпицентра, будет иметь почти одинаковую величину магнитуды.

Все вышеприведенные рассуждения и формулы, несмотря на внешнюю простоту, при их практическом применении сталкиваются с определенными трудностями, связанными с переводами величин перемещений грунта, записанных современным сейсмографом, к записям сейсмографа Вуда-Андерсона, с установлением угла падения фронта сейсмических волн, глубиной очага и фиксацией на сейсмограмме положений первых вступлений объемных и поверхностных волн  $P$ ,  $S$ ,  $L$  и их периодов, а также связанными с грунтовыми условиями места регистрации землетрясения. Поэтому все сейсмические станции имеют свои корректирующие коэффициенты для определения магнитуды. Все расчеты производятся с применением компьютерных программ или специальных номограмм. Считаю необходимым еще раз отметить, что разработка концепции оценки силы землетрясения посредством шкалы магнитуд является фундаментальным шагом в развитии количественной сейсмологии. Никакая другая мера не описывает масштаб землетрясения в целом так полно и точно. Шкала магнитуд дает возможность, имея хотя бы одну инструментальную запись (сейсмограмму) землетрясения на поверхности Земли вне зависимости от места происшествя и степенью причиненного последствя, количественно оценить масштабы и мощь землетрясения.

## 10. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОМЕНТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Из вышеизложенного нетрудно заметить, что определение величины магнитуды зарегистрированного землетрясения также связано с принципиальными трудностями и поэтому не всегда оценка его магнитуды адекватно соответствует его реальной мощи. В этой связи возникли предложения оценить силу землетрясения непосредственно по параметрам очага. Как было сказано выше, в процессе землетрясения в некоторой области коры Земли происходит внезапное вспарывание горных пород по некоторой плоскости с определенной площадью и относительной подвижкой. Ясно, что чем больше площадь вспарывания и относительная подвижка, тем сильнее землетрясение.



Будем считать, что плоскость разрыва имеет форму очень тонкой пластины с размерами  $L$  и  $h$  и толщиной  $b$ , как показано на рисунке 1.44. До разрыва в результате действия касательных напряжений  $\tau$  вдоль поверхности разрыва две ее стороны будут смещаться друг от друга на величину  $u$ . Так как до разрыва пластина находилась в состоянии равновесия, можно предположить, что к ее сторонам приложена пара сил с моментом  $M_0=PL$ , который называется *сейсмическим моментом* землетрясения. Землетрясение произойдет тогда, когда этот момент превзойдет момент пары сил, обусловленный касательными напряжениями  $\tau = \gamma G$ , действующими в противоположных направлениях на нижней и верхней гранях пластины и равными  $M = \tau Fb$ , т.е.

$$\text{при } M_0 \geq M, \quad M_0 = \tau Fb,$$

где  $F=Lh$  – площадь плоскости разрыва.

С другой стороны, так как

$$\tau = \gamma G, \quad \gamma b = u,$$

где  $G$  – модуль сдвига,  $\gamma$  – угол сдвига,  $u$  – подвижка, то для момента  $M_0$  получим

$$M_0 = FG u.$$

Таким образом, сейсмический момент – это *произведение трех величин: площади вспарывания, модуля сдвига пород земной коры и относительной подвижки вспаренных частей (блоков)*. Измеряется он обычно в *дин·см* –ах.

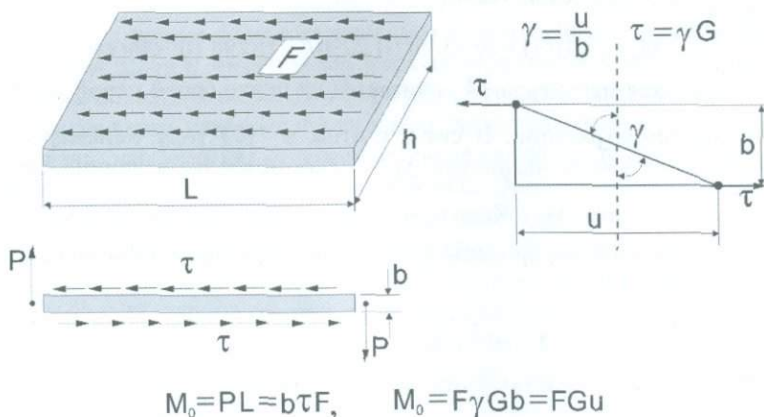


Рис. 54. Механизм процесса вспарывания и иллюстрация происхождения сейсмического момента [54].



Как видно, вычисление момента землетрясения не менее сложная задача, чем вычисление его магнитуды, так как в отличие от магнитуды с двумя параметрами (перемещение грунта и эпицентрального расстояние) для определения величины момента необходимо знание *трех* величин: длины и глубины разрыва и относительной подвижки. Кроме того, величина модуля сдвига земной коры тоже не одинакова для всех сейсмоактивных регионов. Обычно ее принимают равной в пределах  $3 \cdot 5 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>. А самое главное заключается в том, что сейсмический момент можно вычислить только для тех землетрясений, при которых на поверхности Земли образовался разрыв, т.е. только для сильных землетрясений.

Впервые величина сейсмического момента была вычислена К. Аки для Ниигатского землетрясения 1964 года. Поскольку в действительности образованные в результате вспарывания блоки по всей длине разрыва не имеют одинаковой подвижки, обычно в качестве расчетной подвижки принимается их среднее значение  $\bar{u}$ . По мнению Велса и Коппершмитда [82], именно по средней величине  $\bar{u}$  происходит одинаковая по глубине разрыва относительная подвижка противоположных блоков.

Сейсмический момент Спитакского землетрясения 1988 года вычислен при следующих параметрах очага: простирание разрыва  $L=38$  км, глубина очага  $h=11$  км, средняя подвижка вспаренных блоков (вертикальная)  $\bar{u} = 1.22$

( $u_{\max} = 2.0$  м). Следовательно,

$$M_0 = 38 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{11} \cdot 1.22 \cdot 10^2 = 15.298 \cdot 10^{25} \text{ дин-см.}$$

Рихтеровская магнитуда  $M_s$  считается не подходящей мерой для сильнейших землетрясений. В связи с этим в 1977 году Канамори была предложена новая магнитуда  $M_w$ , основанная на величине сейсмического момента  $M_0$ . Исходя из анализа параметров сотни сильных землетрясений была предложена следующая эмпирическая зависимость между  $M_s$  и  $M_w$

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7.$$

Обработка статистических данных показала, что при землетрясениях умеренной силы значение моментной магнитуды  $M_w$ , вычисленное по этой формуле, оказывается меньше значения Рихтеровской

магнитуды  $M_s$ , а при сильных землетрясениях, наоборот,  $M_w > M_s$ . В обоих случаях погрешность не превосходит 10%.

## 11. ЭНЕРГИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Магнитуда землетрясения – это очень простой и надежный параметр землетрясения. Но эта величина, как мы видели выше, относительная и, самое главное, не имеет физического смысла. Другое дело энергия землетрясения, которая измеряется по физически точной шкале. Чтобы судить о конкретной мощи источника (очага) необходимо связать шкалу магнитуд с параметрами выделяемой при землетрясении энергией. Установление такой зависимости обусловлено множеством предположений, связанных с деформационным характером очаговой зоны, его глубиной, величинами скоростей  $V_p$  и  $V_s$ , изменением плотности среды по глубине, характером сейсмограммы и ее продолжительностью и др. Однако, несмотря на все это рассматривая землетрясение как точечный источник, излучающий цуг гармонических волн однородно по всем направлениям, Гутенберг и Рихтер получили следующую эмпирическую зависимость:

$$\lg E = 1.5M + 11.8,$$

где  $E$  – энергия землетрясения, выраженная в эргах, ( $10^7$  эрга = 1 Дж),  
 $M$  – магнитуда землетрясения.

Имеются и другие подобные зависимости в том числе и нелинейные между магнитудой и энергией землетрясения, разница в величине магнитуды, вычисленной по разным формулам в среднем достигает 0.5. В настоящее время наиболее приемлемой считается формула.

Отметим, что энергия, выделяемая при землетрясении средней силы, сравнима с энергией взрыва атомной бомбы. Энергия атомной бомбы, сброшенной американцами на Японский город Хиросима в 1945 году, составила  $8 \cdot 10^{20}$  эрг, а энергия современной одной мегатонной атомной бомбы составляет приблизительно  $5 \cdot 10^{22}$  эрг, т. е. современная атомная бомба примерно в 60 раз мощнее, чем первая атомная бомба. Но ни одна атомная бомба со своей энергией не может быть сравнима с энергией землетрясения с магнитудой 8 и более. Так, при землетрясении с магнитудой 8.9 выделяемая энергия эквивалентна сумме энергий 17000 атомных бомб, сброшенных на Хиросиму, или сумме энергий 250 одной мегатонных современных атомных бомб. Во время Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года величина выделяемой энергии достигла

$100 \cdot 10^{20}$  эрг, что равносильно сумме энергий 13 хиросимских атомных бомб.

Наихарактерной особенностью зависимости между энергией землетрясения и его магнитудой является резкий рост величины энергии по сравнению с увеличением магнитуды. Расчеты показывают, что если  $M$  увеличивается на 20%, выделяемая энергия  $E$  удваивается, а при увеличении магнитуды на единицу – энергия растет в среднем в 32 раза. Так как величина энергии, выделяемой при землетрясении, более адекватно характеризует его разрушительные способности, то это означает, что землетрясения с магнитудой  $M=7$  в 32 раза разрешительное, чем землетрясение с магнитудой  $M=6$ , а не в 10 раз, как это вытекает из определения магнитуды.

На рис. 55 показана графическая зависимость между энергией землетрясения и магнитудой для ряда слабых и сильных землетрясений.

У некоторых специалистов распространено мнение, согласно которому определенное количество слабых землетрясений, происходящих в данном регионе, могут погасить накопленную в земных недрах энергию и тем самым предотвратить возможность возникновения сильного землетрясения. Отсюда якобы вытекает, что частые слабые землетрясения в одном и том же месте могут стать предохранительным клапаном или гасителем сильных землетрясений.

Однако простые расчеты показывают, что этого на самом деле не может быть. Так, если величину энергии, выделяемой при землетрясении с магнитудой  $M=4$  принять за единицу, то при более сильных землетрясениях с  $M>4$  величины отношений энергии, согласно формуле энергии приведенной выше, будут иметь значения, приведенные в табл. 12.

Из таблицы видно, что должны происходить 1048476 землетрясений с магнитудой  $M=4$ , чтобы высвобожденная при них суммарная энергия была равна энергии одного землетрясения с магнитудой  $M=8$ , или должны происходить 1024 землетрясений с магнитудой  $M=5$ , чтобы энергетически они были эквивалентны одному землетрясению с магнитудой  $M=7$ . Как видим, число эквивалентных слабых землетрясений настолько велико, что по существу они не могут привести к гашению одного сильного землетрясения. Так, например, три года подряд ежедневно должно происходить одно землетрясение с магнитудой  $M=4$ , чтобы предотвратить одно среднее землетрясение с магнитудой  $M=6$ .



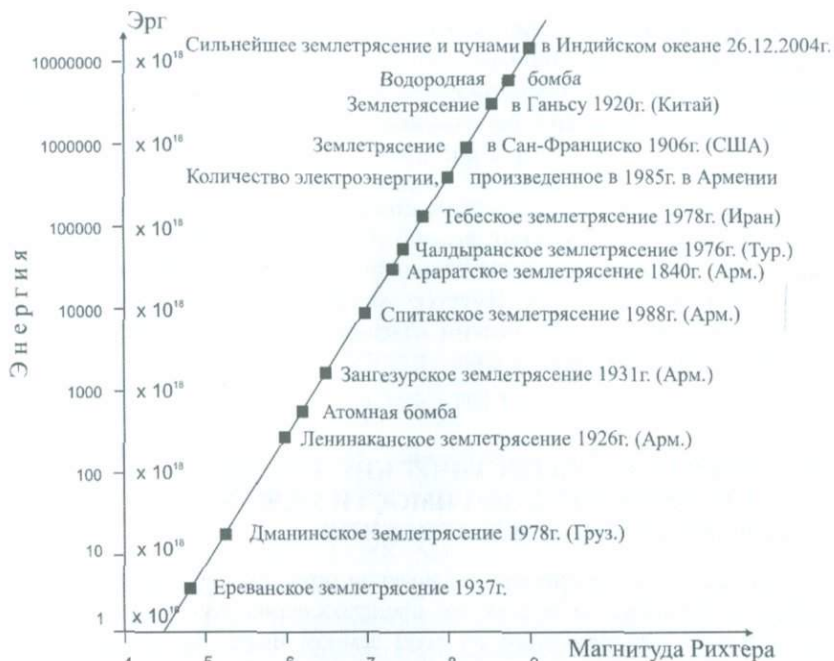


Рис. 55. Связь между энергией и магнитудой землетрясения.

Таблица 12

Магнитуда землетрясения, $M$	Отношение энергии данной магнитуды к энергии землетрясения с магнитудой $M=4$
4	1
5	32
6	1024
7	32768
8	1048576

С другой стороны, как показывают всемирные данные записей землетрясений, сильные разрушительные землетрясения приурочены к границам тектонических плит (главным разломам), в то время как слабые землетрясения в основном обусловлены вторичными тектоническими образованиями. Поэтому имеются даже предположения, согласно которым активность слабых землетрясений в данном регионе в какой-то мере является сигналом о подготавливающихся процессах сильного землетрясения.



В количественной сейсмологии высвобожденную при землетрясениях энергию характеризуют также введением понятия *энергетического класса землетрясения*, как десятичный логарифм от общей энергии  $E=10^k$ , выраженной в джоулях:

$$k = \lg E,$$

где  $k$  – называется энергетическим классом землетрясения. Таким образом, если при землетрясении высвобожденная энергия составляет  $10^1$ ,  $10^2$ , ...  $10^k$  джоуль, то соответствующий энергетический класс землетрясения будет 1, 2, ...  $k$ . Имеется эмпирическая зависимость между магнитудой  $M$  и энергетическим классом  $k$ , предложенной Гутенбергом, Рихтером и Раутинан в виде

$$k = 1.8M + 4.$$

## 12. НЕКОТОРЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Длительные сейсмические наблюдения позволили накопить большой объем информации о местах их происхождения, количестве, силе и последствиях землетрясений на всем земном шаре. Землетрясения не рассеяны по нашей планете случайным образом. Они сосредоточены в четко ограниченных узких зонах. Большинство землетрясений происходит в Тихоокеанском кольцевом поясе: 80% слабых, 90% средних и почти все глубокофокусные землетрясения [42]. Следующий по количеству землетрясений пояс – Альпийско-Гималайский сейсмический пояс от Зондских островов через Среднюю Азию и Кавказ до западной Европы. Небольшое число землетрясений происходит вдоль океанических хребтов и в внутриконтинентальных территориях. *Глубина очагов* большей части землетрясений находится в пределах 10–40 км. Для глубокофокусных землетрясений глубина очага доходит до 700 км, а поверхностные толчки имеют глубину порядка нескольких километров. В табл. 13 приведены некоторые характерные статистические данные общего характера.

*Количество ежегодно высвобождающейся во всем мире при землетрясениях энергии составляет от  $10^{25}$  до  $10^{26}$  эрг [83].* В общем количестве ежегодной энергии, высвобожденной при всех землетрясениях, доля землетрясений с магнитудой  $M \geq 7$  составляет более 90%, землетрясений с магнитудой  $M \geq 8$  – около 50%, а землетрясений с магнитудой  $M < 5$  – не более 1%. При слабых землетрясениях, несмотря на их большую частоту, выделяется незначительное количество общей ежегодной энергии [42].

Магнитуда землетрясения	Число землетрясений в течение одного года	Наибольшая интенсивность в баллах	Длительность интенсивных сотрясений грунта, сек	Радиус территорий с сильным движением грунта, км
8.0-8.9	1	XI-XII	30-90	80-160
7.0-7.9	15	IX-XI	20-50	50-120
6.0-6.9	140	VII-X	10-30	20-80
5.0-5.9	900	VI-VIII	2-15	5-30
4.0-4.9	8000	V-VII	1-5	0.5-15

Для *среднегодового числа землетрясений  $N$  (повторяемость)* имеет место следующее соотношение Гутенберга-Рихтера в зависимости от магнитуды  $M$  [42]:

$$\lg N = a + b(8 - M),$$

где  $a$  и  $b$  некоторые постоянные. Статистический анализ показывает, что для разных групп землетрясений в основном изменяется значение постоянной  $a$ . Значение константа  $b$  изменяется незначительно от 0.9. Это означает, что *повторяемость землетрясений  $N$  по этой формуле независимо от магнитуды увеличивается приблизительно в 8 раз при каждом целом шаге вниз по шкале магнитуд*. Для землетрясений с магнитудой  $M \geq 6$  значения  $a$  и  $b$  соответственно равны:  $a = -0.48$ ,  $b = 0.9$ .

Ниже приводятся основные эмпирические соотношения между *магнитудой* землетрясения и другими параметрами его последствий на поверхности земли, широко применяемые в фундаментальных работах по сейсмологии:

- *характерная длина разрыва  $L$* , в км

$$\lg L = 1.32M - 7.99$$

- *характерная подвижка по разрыву  $u$* , в м

$$\lg u = 0.55M - 3.71$$

- *максимальное перемещение грунта  $A$* , в микронах

$$\lg A = M - 3 \lg \Delta + 2.92$$

$\Delta < 500$  - эпицентральное расстояние в км.

- *радиус  $r$  области деформации* (для японских земл-ий), в км

$$\lg r = 0.51M - 2.27$$

- *площадь деформации на поверхности  $Q$* , в см<sup>2</sup>

$$\lg Q = 1.02M + 5.96$$

- "время разрушения"  $L/v_r$ , т.е. отношение длины разрыва  $L$  к скорости разрушения (вспарывания)  $v_r$ , в сек

$$\lg(L/v_r) = 0.5M - 1.9$$

- вероятность растрескивания поверхности земли:

магнитуда	$M < 7.0$	$7.0 < M \leq 7.4$	$M > 7.4$
вероятность, %	0	60	100

- область афтершоков  $Q'$ , в  $\text{см}^2$

$$\lg Q' = 1.02M + 6.0$$

- период колебания  $P$ -волн  $T_0$  определяющего максимальное перемещение грунта, в сек

$$\text{для } M < 3 \quad \lg T = 0.47M - 1.79$$

$$\text{для } M > 5 \quad \lg T = 0.51M - 2.59$$

- энергия землетрясения  $E$ , в эрг

$$\lg E = 1.5M + 11.8$$

- интенсивность  $I$ , в баллах

$$I = 1.5M - 3.5 \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 3$$

$h$  – глубина очага, в км,  $\Delta$  – эпицентральное расстояние, в км.

- максимальное ускорение  $a$  (в долях  $g$ ) и скорость  $v$  грунта (в  $\text{см/сек}$ )

$$a/g = 5.7 e^{0.8M} (\Delta + 40)^{-2}, \quad v = 32 e^M (\Delta + 25)^{-1.7}.$$

### 13. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ.

Прогноз землетрясений всегда является одной из актуальных проблем науки о Земле. Предсказание землетрясений представляет собой не только решение комплексной научной проблемы естествознания, но имеет и огромное социально-экономическое значение, так как связано с безопасностью жизни сотни тысяч людей и сохранностью неисчислимого количества материальных ценностей. В сейсмологии прогноз землетрясений по своей значимости делится на три вида: **долгосрочный (несколько лет)**, который дает возможность планировать вопросы землеиспользования и застройки городов и населенных пунктов в сейсмоопасных районах; **среднесрочный (несколько месяцев)**, позволяющий привести в готовность аварийно-спасательные службы и обеспечить накопление продовольственно-медикаментных товаров; **краткосрочный (дни и часы)** – для принятия неотложных мер по эвакуации



населения, приостановки химико-бактериологически опасных производств, подготовки спасательных бригад, отрядов медицинской помощи и защите национальных духовно-культурных ценностей.

Начало широкомасштабных исследований по предсказанию землетрясений относится к 60-м годам XX столетия. Эти исследования были сосредоточены в основном в Японии, бывшем СССР, США и Китае. Заинтересованность великих держав к разрешению проблемы предсказания землетрясений в эти годы, по-видимому, была обусловлена также разработкой основных положений договора о запрещении подземных испытаний атомного оружия. Дело в том, что ряд экспертов считают, что на больших расстояниях во время атомных взрывов *записи колебания грунта* нельзя однозначно различить от записей реальных слабых землетрясений. Поэтому считалось, что разрешение проблемы предсказания землетрясения поможет сближению точек зрения по идентификации подземных взрывов (атомным взрывам, в отличие от землетрясений, не предшествуют предвестники). Были разработаны и внедрены обширные национальные научно-исследовательские программы с участием крупных специалистов и была большая уверенность в положительном разрешении проблемы прогноза. И на самом деле в 1969 году впервые китайские сейсмологи 18 июля 1969 года утром по необычным поведением животных местного зоопарка сообщили администрации г. Тяньцзинь о предстоящем землетрясении. В полдень произошло сильное землетрясение с магнитудой  $M=7.4$  в Бохайване-заливе к востоку от Тяньцзиня. В 1975 году в г. Хайчэне китайские сейсмологи осуществили самый удачный прогноз сильного землетрясения. В течение длительного периода времени территория города находилась в центре внимания сейсмологов. Были установлены приборы для регистрации наклонов земной поверхности, изменения магнитного поля, электросопротивления грунтов, уровня грунтовых вод в колодцах, а также наблюдения за поведением животных. Было зарегистрировано большое количество слабых землетрясений. На основании анализа всех этих явлений было решено объявить о предстоящем землетрясении. Через пять с половиной часов после объявления общей тревоги в 7 часов 36 минут вечера 4 февраля 1975 года произошло сильное землетрясение с магнитудой 7.3. Были разрушены сотни домов и фабрик, но поскольку жители города с 100-тысячным населением заранее эвакуировались из зданий, число жертв было небольшим. В дальнейшем в 1976 году в Китае были еще три удачных прогноза по землетрясениям: 29 мая в провинции Юньнань, 16 августа в провинции Сычуань и 7 ноября на границе Сычуань и Юньнань, в основном по признакам увеличения числа слабых землетрясений. Удачные прогнозы землетрясений имели место также в США – в августе 1973 года на севере штата Нью-Йорк, в январе 1976 года в Сан-Хосе, в СССР в ноябре 1978 года, в 150 км восточнее Гарма, спустя 6 часов после оповещения.



Детальная программа по предсказанию землетрясений была составлена в Японии. В 1962 г. Исследовательская группа в составе Т. Цубои, К.Вадаи и Т.Хагивары составила отчет под названием “Прогноз землетрясений: достигнутый прогресс и планы дальнейшего развития”. В последующие годы по некоторым землетрясениям на территории Японии, таким, как землетрясения в Немуро-Ханто-оки 1973г. ( $M=7.4$ ) в Миягикен-оки 1978 г. ( $M=7.4$ ), перед землетрясением были накоплены достаточные предвестниковые данные для предсказания их силы и места, но определенная дата их возникновения не была установлена. Поэтому К.Моги в своей известной монографии [44] отмечает: “До сих пор в Японии не было ни одного примера успешного предсказания землетрясения в практическом смысле».

Полноценное предсказание землетрясения означает дать правильную оценку трех параметров: *времени, места и силы* прогнозируемого землетрясения.

Естественно для предсказания того или иного явления необходимо располагать полноценными представлениями о характере его возникновения. Обычно все происходящие в природе явления обуславливаются предшествующими другими явлениями. В настоящее время сейсмология располагает достаточными сведениями о механизме возникновения землетрясения как в его начальной стадии, так и в стадиях дальнейшего развития и свертывания. Мы можем составить уравнения, которые описывают все этапы развития очага землетрясения, включая само возникновение. Возникает вопрос: можно ли на основании этих уравнений произвести точные расчеты и предсказать место, время и силу землетрясения. Ответ многих сейсмологов на этот вопрос *пока “нет”*. Они говорят: да, мы достаточно хорошо знаем физику землетрясения, но не располагаем точными сведениями о физических свойствах материалов, из которых состоит Земля, о процессах и стадиях их деформирования за длительный период времени. Эти свойства и процессы очень сложны и не постоянны. Особенно сложна связь между напряжениями и большими деформациями, которая в большинстве случаев зависит от истории их геологического развития и от теплового режима внутри Земли. Следовательно, для разработки достоверной теории предсказания необходимо провести, с одной стороны, комплексные теоретические и экспериментальные исследования физико-механических свойств горных породах, находящихся под большим давлением и температурой, а с другой – создать плотную сеть систематических инструментальных наблюдений по выявлению и сопоставлению предвестников параметров процессов “созревания” будущих землетрясений.

В научной среде по предсказанию землетрясений существуют две основные противоположные тенденции: *крайне пессимистическая*, отрицающая какие-либо позитивные результаты, и *оптимистическая*,

надеющаяся на успешный прогноз, основанный на различных физических процессах, наблюдаемых в период подготовки землетрясения. Любопытно, что обе тенденции основаны на механике процесса землетрясения как внезапное (хрупкое) разрушение среды. Сторонники пессимизма считают, что раз землетрясение связано с внезапным разрушением материалов и так как даже у материалов с макроскопически совершенно идентичным составом имеются *большие различия в значениях прочности (до 30%) и времени, проходящего до момента разрушения (десятки и сотни лет)*, то сам процесс разрушения проходит без “предупреждения”, как случайное явление, предсказание которого с необходимой точностью (до дня и часа) крайне сложная задача. Однако земная кора не однородный материал, она обладает гетерогенной структурой с множеством ослабленных мест – возражают сторонники оптимизма предсказания. *В неоднородной среде перед образованием крупной трещины отмечаются различные предваряющие этот процесс явления (предвестники)*, наблюдая и измеряя которые можно приближаться к пониманию процесса возникновения землетрясения – времени его свершения и его мощи.

Таким образом, сторонники обеих тенденций предсказания землетрясения справедливо обуславливают его главной причиной их возникновения *с процессами механического разрушения горных пород*. С этой целью рассмотрим современные концепции разрушения материалов и, в частности, горных пород.

**Теория дилатансии.** Эта теория разрушения горных пород при очень высоких давлениях впервые была выдвинута в 1960 году У. Брейсом и получила дальнейшее развитие со стороны А. Нура в 1972 году. Дилатансия означает увеличение объема горной породы при ее деформировании. Принимается, что в зацепленных областях между двумя литосферными плитами при их противоположных движениях горные породы подвергаются большим механическим напряжениям. При определенных значениях напряжений в породах образуется множество распространяющихся микроскопических трещин. Они (трещины) меняют физико-механические параметры пород и увеличивают их объем. В дальнейшем вода, проникая в эти трещины, еще увеличивает их объем, что может привести к поднятию (разбуханию) поверхности Земли на эпицентральных зонах. Вследствие этого вода распространяется по всей расширяющейся зоне, повышая поровое давление в трещинах и понижая прочность пород, тем самым вызывая землетрясение. После землетрясения снижается тектоническая напряженность, вода вытекает из пор и породы восстанавливают свои первоначальные свойства. Среда переходит в новое слабонапряженное равновесное состояние. Описанные выше процессы разрушения горных пород известны также как *дилатансионно-вода-диффузионная модель разрушения*.

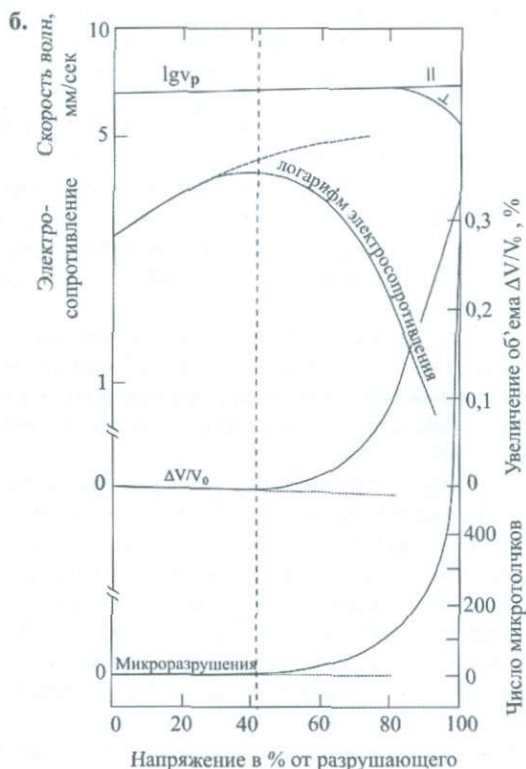
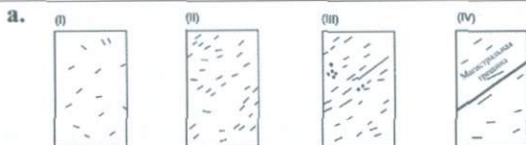


Рис. 56.

а. Развитие процессов разрушения пород на четырех основных стадиях сейсмического цикла (модель ИФЗ) (I) – межсейсмическая, (II) – предсейсмическая, (III) – косейсмическая (землетрясение), (IV) – постсейсмическая [42].

б. Изменение физических свойств гранита под действием сжимающего напряжения. Символы || и ⊥ обозначают соответственно компоненты скорости волны, параллельную и перпендикулярную оси сжимающего напряжения [49, 42], **вертикальная пунктирная линия соответствует началу дилатансии.**



Сотрудниками Института физики Земли (Москва) В.И.Мячкиным, Б.В. Костровым, Т.А. Соболевым и О.Г. Шаминой была предложена аналогичная схема подготовки землетрясений под названием *лавино-неустойчивая модель разрушения*, которая основывается на современных представлениях разрушения твердых тел.

Согласно этой схеме или модели ИФЗ, которая исключает роль воды, дилатансия способствует развитию хаотично распространённых в породах старых трещин и появлению новых (рис. 56). Когда число трещин достигает определенной величины, их взаимосвязь существенно осложняется. Крупная трещина препятствует росту малых трещин, если они расположены на определенной стороне от него, и, наоборот, быстро развиваются те малые трещины, которые расположены по траектории роста крупной трещины.

На последней стадии этот процесс принимает лавинообразный характер, образуя огромную магистральную (главную) трещину, внезапный разрыв противоположных бортов которой и становится причиной землетрясения. В дальнейшем, варианты этой модели разрушения, которую в отличие от первой *“влажной модели”* называют также *“сухой моделью”*, были предложены Б. Брейди, К. Моги и В. Стюарт [42].

Основанием для разработки обеих моделей служили не только теоретические предпосылки механики разрушения твердых тел, но и исследования по измерению напряжений вблизи области очага и модельные испытания образцов горных пород в лабораторных условиях, близких к реальным условиям в Земле. Иллюстрация модели дилатансии, полученная экспериментально на гранитных образцах под действием всесторонних сжимающих напряжений, заимствованная из [42, 49], показана на рис. 56. Теперь рассмотрим те физические явления и данные наблюдений, которые используются для стратегии предсказания землетрясений.

**Статистический прогноз.** Самым старейшим и обычным способом предсказания землетрясений является статистический, основанный на анализе исторических сейсмологических событий данной территории. Принимая, что сейсмическая активность данной территории со временем имеет статистически неменяющийся характер, мы можем по числу, силе, повторяемости прошлых землетрясений оценить вероятность времени возникновения будущих землетрясений, их мощи и масштабов последствий. Этот метод предсказания наиболее эффективен для тех стран и территорий, которые располагают содержательными историческими сведениями о прошлых землетрясениях за довольно длительный период (сотни лет) времени. Те страны, у которых отсутствуют такие сведения или они очень скудны, часто пользуются методами современной палеосейсмологии (*заложение шурфов поперек разлома и изучение*

расположение вскрытых слоев) для выявления неотмеченных историками сильных землетрясений или для уточнения интенсивности и магнитуды известных прошлых землетрясений. В частности, такой положительный опыт имеется для территории Калифорнии, где этим методом установлено, что в течение последних 1200 лет здесь произошло восемь крупных землетрясений со средним интервалом между ними 140 лет. Несмотря на то, что статистический метод не дает возможности предсказать конкретное место и конкретное время землетрясения, он имеет огромное значение для оценки уровня сейсмического воздействия на существующие и вновь проектируемые здания и сооружения в течение срока (50-100) их эксплуатации.

Действительно, карты сейсмического районирования (рис. 1.14), используемые в нормах сейсмостойкого строительства всех сейсмоактивных стран, составлены в основном на принципах статистического прогноза землетрясений. Изучение результатов статистического анализа прошлых землетрясений дает возможность также выделить у активных разломов так называемые зоны "*сейсмического затишья*", которые в действительности являются наиболее вероятными "*кандидатами*" мест будущих землетрясений.

**Тектоническое прогнозирование**, которое последует статистическому, в первую очередь преследует цель – оценки величины магнитуды будущего землетрясения по накопленным деформациям (подвижкам) и напряжениям в окрестностях разломов разной степени активности [42]. Так, согласно нормам сейсмостойкого строительства США [84], активные разломы на территории США по сейсмической опасности разделяются на три типа – А, В, С с максимальной скоростью подвижки по разлому 5 и более мм/год и ожидаемым магнитудами 7 и более (тип А), и минимальной скоростью подвижки по разлому менее 2 мм/год, и ожидаемой магнитудой меньше чем 6.5 (тип С). В зависимости от типа активного разлома и расстояния от него сейсмическая опасность строительной площадки (воздействия на сооружения) может увеличиться от 1.2 до 2 раз.

**Предвестники землетрясения.** Как сказано выше, статистические и тектонические прогнозы не дают ответа на главный вопрос прогнозирования – времени, места и силы землетрясения. Ответ на эти вопросы может дать только физическое или детерминистическое прогнозирование. Как было отмечено выше, процесс "подготовки" землетрясения сопровождается изменениями параметров ряда физических полей. Те физические параметры Земли, величины которых регулярно изменяются перед землетрясениям, называются *предвестниками* землетрясения, а сами отклонения от нормальных значений – *аномалиями*. Современные



технические возможности измерения параметров физических полей Земли дают возможность с определенной точностью зафиксировать эти аномалии, и в целом вселяют надежду на установление надежной корреляции между величинами аномалий и ожидаемым землетрясением. Кратко рассмотрим принимаемые в настоящее время для предсказания землетрясения физические предвестники.

**Сейсмическая активность.** Распределение и число зарегистрированных слабых землетрясений разной магнитуды на данной территории может служить как характеристикой общей сейсмической опасности территории, так и индикатором приближающегося сильного землетрясения. Для такого прогноза необходимо иметь густую сеть сейсмических наблюдений, оснащенную высокочувствительными сейсмографами.

**Форшоки.** Один из наиболее надежных признаков для предсказания сильного землетрясения считается предварительная регистрация слабых сейсмических толчков – форшоков на данной территории. Физическая природа форшоков все еще не ясна, хотя, в принципе согласно вышеописанным теориям разрушения неоднородной хрупкой среды с множеством мелких трещин такая возможность не может быть исключена. По данным К. Моги, из 1500 землетрясений с магнитудой 4 и более, которые происходили на территории Японии, только в 60 случаях основным толчкам предшествовали форшоки, с интервалом времени между ними от нескольких минут до сотен дней. Кстати, разрушительному Спитакскому землетрясению 7 декабря 1988 года в 11 часов 41 мин. по местному времени в Армении тоже предшествовал форшок 6 декабря в 19 часов 27 мин. Но, к сожалению, его не приняли за предвестник для прогноза основного толчка и принятия соответствующих мер по безопасности населения. Разделение любого сейсмического события на форшок и основной толчок очень сложный и неопределенный процесс, поэтому предсказание по такому предвестнику не имеет большой достоверности. Видимо, не без основания Ч. Рихтер отмечает, что *“форшоки редко позволяют предсказать сильные землетрясения, так как форшоки ничем не отличаются от обычных слабых толчков”*. По мнению же К. Касахара и других, большинству землетрясений, если не всем, предшествуют форшоки. И все же, после любого несильного толчка всегда следует проявлять *некоторую озабоченность* в смысле проследования сильного толчка, особенно на тех территориях, которые длительное время были сейсмически неактивными.

**Предсейсмические движения поверхности Земли.** Использование этого предвестника для целей предсказания землетрясения связано с организацией систематических геодезических съемок с помощью триангуляционной сети на поверхности Земли. Эти съемки дают возможность



выявить места крупных деформационных изменений земной коры, которые, как уже неоднократно было отмечено, предшествуют сильным землетрясениям. Наиболее надежным предвестником приближающегося землетрясения считается изменение направленности движения, когда подъем поверхности земли сменяется ее опусканием (землетрясения в Ниигата 12.06.1964 г., Ташкент 25.04.1966 г., Сан-Фернандо 9.02.1971 г.). По данным Т. Рикитак, перед отдельными землетрясениями на территории Японии имел место аномальный морской отлив, из-за локального поднятия земной поверхности относительно уровня моря. В настоящее время такие съемки осуществляются также с помощью искусственных спутников Земли и с использованием лазерных источников света. Очевидно, что влияние этого предвестника потребует внедрения больших финансово-материальных средств и длительных наблюдений, которые не по силам многим сейсмоактивным странам.

● **Наклоны земной поверхности.** Аномалии этого предвестника фиксируются непрерывными наблюдениями с помощью специальных приборов – *наклономеров*. Они обычно устанавливаются около активных разломов в специальных подземных сооружениях с определенной базой. Большое распространение, в частности, в Японии, получили водотрубные наклонометры длиной в несколько десятков метров, а также скважинные наклонометры с базой от 10 до 100 см. В Гарнийской геофизической обсерватории в Армении установлена автоматическая сейсмо-наклономерная станция АСНС. Выявление этого предвестника также связано с установкой большого числа приборов и длительными непрерывными наблюдениями.

● **Предельная деформация пород.** Систематически измеренные данные о величинах деформации горных пород имеют важное значение для прогноза землетрясения. Для этого бурят скважины и устанавливают в них высокочувствительные деформографы, фиксирующие относительные смещения двух точек среды. В Гарнийской геофизической обсерватории установлены два штанговых деформографа с базисом 47 и 43 м. Как было отмечено выше, горные породы разрушаются при относительной сдвиговой деформации порядка  $10^{-4}$ . При достижении показаний деформографов к этой величине следует ожидать приближения землетрясения.

● **Уровень воды в колодцах и скважинах.** Наблюдения показывают, что уровень грунтовых вод перед землетрясением поднимается или понижается. Это явление особенно ощутимо должна выражаться в эпицентральной зоне, где механическое напряженное состояние горных пород перед землетрясением существенно изменяется. Фиксация стабильных отклонений от обычных уровней воды может служить пред-

вестником ожидаемого землетрясения. Такой предвестник наблюдался перед землетрясением в Канто (9.05.1974г.) и в Пржевальском (июнь 1970г.), перед рядом землетрясений на территории Китая [49].

На поверхности Земли имеется огромное количество колодцев и скважин для других технических задач. По мнению ряда специалистов, организация телеметрических наблюдений по изменениям уровня воды в них и системная компьютерная обработка данных могут стать мощным средством для обнаружения этого предвестника землетрясений.

#### **Изменение химического состава и температуры подземных вод.**

Наряду с изменением уровня подземных вод перед землетрясением обнаружено также изменение их температуры и химического состава; изменения дебита источников. Воды в скважинах мутнеют, изменяется их химический состав и особенно *содержание радиоактивного газа – радона*. Этот предвестник наиболее ярко проявился перед Ташкентским землетрясением 1966 г. и при его афтершоках (А.Г. Мавлянов, В.И. Уломов и др.). В дальнейшем этот предвестник был обнаружен при землетрясении в Идзу-Осима-кинкай в 1978 года в Японии. Наряду с этим на территории Калифорнии в 1981 году, несмотря на существенное возрастание концентрации радона в некоторых скважинах, землетрясения не произошло [39].

**Изменение магнитного и электрического полей Земли.** Перед некоторыми землетрясениями обнаружены изменения геомагнитного поля Земли, геоэлектрических токов и электропроводности горных пород. Сообщались даже сведения, что якобы перед землетрясением обычный магнит теряет свою способность притягивать (землетрясение 1855 г. в Токио; за два часа перед землетрясением падение железных предметов, притянутых к подковообразному магниту размером около 1 м, служившему в качестве рекламы у магазина по оптике, что конечно мало вероятно, так как геомагнитное поле Земли гораздо слабее, чем создаваемое магнитом, следовательно, причина падения железных предметов надо искать в другом [49]). Заметные изменения геомагнитного поля как предвестника землетрясений обнаружены при землетрясениях в Маусиро (1965-1967), Акита (1970), афтершоках землетрясения в Идзу-Осима-кинкай (1978), Холлистере (1974), в районах Гарма и Ташкента (1967), Зангезурского землетрясения (Армения) 1968 года. В конце XIX и первой половины XX веков было обнаружено большое количество случаев заметного изменения геомагнитного поля (нормальная напряженность около 0.5 *гаус*) в связи с землетрясениями. В 1960 годах в связи с применением усовершенствованного высокочувствительного протонного магнитометра уровень этих отклонений существенно снизился до нескольких гамм ( $1 \text{ гамм } \gamma = 10^{-5} \text{ Гс}$ ). Поэтому к результатам ранних



наблюдений стали относиться скептически [49]. Изменение геоэлектрических потоков наблюдалось при афтершоках землетрясений в Тоттори и Фукуи. В Гармской области Таджикистана обнаружено изменение (падение) электрического сопротивления горных пород, которое интерпретировалось как следствие поступления воды в трещины пород и тем самым подтверждающее принципы дилатантно-диффузионной модели разрушения горных пород. По мнению многих специалистов, из-за сложности строения недр флуктуации магнитных и электрических полей Земли могут быть *соизмеримы с их нормальными аномалиями* независимо от землетрясения, поэтому затруднительно их принимать как предвестники надвигающегося землетрясения [49].

**Изменения отношений скоростей распространения сейсмических волн.** Экспериментальные исследования показывают, что при приложении к образцу горной породы внешних сил скорости распространения в ней упругих продольных и поперечных волн  $v_p$  и  $v_s$  меняются. Значения  $v_p$  и  $v_s$  меняются также в зависимости от влажности и водонасыщенности образцов. Другими словами, скорости  $v_p$  и  $v_s$  в земной коре могут меняться с изменением в ней уровня механических напряжений. Если это так, и так как в процессе подготовки землетрясения в породах очаговой зоны происходит активное нарастание напряжений и проникновение воды в поры пород (“мокрая” дилатансия), то в принципе степень изменения величин скоростей сейсмических волн  $v_p$  и  $v_s$  перед землетрясением могут служить предвестником будущего землетрясения. Эти соображения японские специалисты высказали еще в 40-х годах прошлого столетия [44]. Но впервые об этом предвестнике достоверные сведения получили советские специалисты (М.А. Садовский, И.Л. Нерсесов, А.М. Кондратенко, А.Н. Семенов и др.) в 1960 годах, на основе сейсмологических исследований на территории Таджикистана. При этом в качестве предвестника принимается не изменение абсолютных величин  $v_p$  и  $v_s$ , а изменение их отношения, т.е.  $v_p/v_s$ . По сейсмограммам сотни слабых землетрясений были вычислены отношения  $v_p/v_s$ . Их статистическая обработка показала, что перед сильным толчком (до 2-3 месяцев) они подвергаются значительным изменениям в пределах 10-15%. Заметим, что такое изменение  $v_p/v_s$  должно быть вызвано существенным изменением – до 30% упругих свойств пород. Причем землетрясение наступает, когда отношение  $v_p/v_s$  снова возвращается к номинальной (обычной) величине 1.73 (от нескольких дней до месяцев). Продолжительность



аномалии (отклонения от 1.73) зависит от силы прогнозируемого землетрясения, но ее величина не зависит от силы землетрясения. При этом, изменение отношения  $v_p/v_s$  происходит в основном за счет изменения  $v_p$ .

В 1960-1980 годах с этим предвестником прогнозирования связали большие надежды. И так как отношения  $v_p/v_s$  можно определить не только по сейсмограмме слабого землетрясения, но и при помощи обработки сейсмограммам немощных, специально организованных взрывов на прогнозируемой территории, этому методу уделялось большое внимание в смысле его практического воплощения. Однако выяснилось, что относительно этого предвестника среди специалистов имеются большие разногласия. Оказалось, что не всегда перед землетрясениями с магнитудой  $M=4\div 5$  отношения  $v_p/v_s$  подвергаются изменению. Такие изменения  $v_p/v_s$  не обнаружены также при обработке сотни сейсмограмм, полученных в течение 10 лет во время взрывных работ на рудниках в центральной Калифорнии [39, 83]. Поэтому многие американские сейсмологи считают, что этот предвестник не приемлем для территории Калифорнии, где землетрясения в основном имеют сдвиговой характер в отличие от землетрясений на территории Таджикистана, где землетрясения имеют взбросовый (сбросовый) характер [49].

Кроме того, некоторые исследования показывают, что значительные изменение отношения  $v_p/v_s$  обнаруживаются в породах в перпендикулярном к трещине направлении, чем в параллельном к трещине направлении. Поэтому сейсмические волны, генерированные из глубин Земли при реальных землетрясениях, более чувствительны относительно пути их распространения со множеством трещин, чем генерированные из приповерхностных слоев Земли во время подземных взрывов.

С другой стороны, этот предвестник хорошо обнаруживался во время многих землетрясений на территориях бывшего СССР, США и Японии, в том числе при очень сильном ( $M=7.4$ ) Ниигатском землетрясении 1964 года. Таким образом, несмотря на более или менее физическую обоснованность, практическое применение предвестника отношения  $v_p/v_s$ , связанное со множеством неопределенностей аналогично другим предвестникам, тоже не обеспечивает должную надежность прогноза.

И еще одно важное замечание по применению этого предвестника. Чтобы измерения  $v_p/v_s$  при специальных взрывах имели практическое значение для прогноза, необходимо выяснить, где для данного региона

следует их систематически произвести (на одном и том же месте) и с каким интервалом времени в течение скольких лет, так как землетрясения могут повторяться с 20, 50 или 100-летними интервалами [39]. А это непомерно большие финансовые и материальные затраты сейсмоактивных стран с большими сейсмоопасными территориями.

**Биологические предвестники.** В течение сотни лет постоянно поступают сообщения о необычных поведениях животных (коты, собаки, крупнорогатый скот, домашние животные, рыбы, змеи, лягушки, пчелы и др.) перед землетрясениями. Но в дальнейшем часто выясняется, что эти изменения в поведении животных происходят *после* землетрясения, *а не до него*. Причем не всегда удается выяснить поведение животных (не важно до или после) на самом деле связано с землетрясением или это связано с изменением погоды, качеством принятой пищи или общего состояния здоровья животных. Другая неопределенность заключается в том, что часто такие сведения поступают через вторых и третьих лиц, после неоднократных “редактирований” и не внушают доверия сами содержания сообщений. В принципе возможно, что в отличие от человека некоторые животные способны реагировать на изменения электромагнитного поля Земли и очень слабые низкочастотные колебания почвы перед землетрясением. По этим вопросам в последние годы в разных странах проводятся интересные экспериментальные исследования (особенно по поведению рыб). Но в действительности, как воспользоваться этим предвестником для предсказания землетрясения пока остается неопределенным.

**Необычная погода, радуга и таинственное излучение.** В странах с частыми землетрясениями, особенно в Японии, распространено мнение, якобы перед сильным землетрясением происходит необычная перемена погоды, становится душно, воздух наполняется необычным черным дымом и рядом облаков, появляется трехцветная радуга и необычайное цветное освещение небосклона. По мнению большинства ученых сейсмологов, все эти явления, связанные с изменением погоды и другими атмосферными явлениями перед землетрясением, являются легендами и просто вымыслами и что по ним нельзя прогнозировать землетрясение.

**Суеверия.** Наряду с вышеизложенными реальными физическими предвестниками часто выдвигаются отдельные легенды и предрассудки, не имеющие ничего общего с наукой и реальностью. Люди во все времена боялись землетрясений, и естественно, что в далеком прошлом они старались их объяснить какими-то сверхъестественными силами. Но, к сожалению, и в настоящее время, в стадии бурного развития науки, еще появляются люди и даже “образованные” личности, кото-

рые считают, что они обладают особым даром предвидения и могут предсказать землетрясения. Когда эти “предсказания” иногда случайно совпадают с каким-либо реальным землетрясением (обычно слабым, вероятность которых на сейсмоактивных регионах очень большая) они, воодушевленные этим “предсказанием”, начинают с еще большим упорством настаивать на свою “сверхспособность” и объявляют о новых прогнозах. Ясно, что такие предсказания не имеют никакого отношения к реальным причинам и временам возникновения землетрясений и могут только ввести в заблуждение легковверных. Об одном таком Непальском лжепророке недавно сообщала газета “The Times”. Некий бывший строитель Чадхари, провозгласив себя “святым”, распространил среди населения несколько тысяч брошюр, в которых утверждал, что 22 июня 2007 года в 6 часов 15 минут в Южной Азии начнется сильное землетрясение, которое продлится до 10 июля и унесет жизни 300 тысяч человек. Предсказание “святого” привело к панике среди большей части населения Непала. Поэтому после того, как за весь день начала предсказанной катастрофы не случилось ни малейшего толчка, разозленные местные жители ворвались в дом Чадхари, избили его и потребовали наказать шарлатана. Полиции пришлось арестовать шарлатана за нарушение общественного спокойствия.

**Спусковой механизм.** Так как землетрясение результат внезапного вспарывания сильно деформированной среды, из-за медленных движений плит (блоков) возникает естественный вопрос: существуют ли другие физические явления, которые могут дополнительно влиять на процесс деформирования и таким образом ускорить наступление момента разрушения пород. В таких случаях говорят о существовании некоторого “*спускового механизма*” землетрясения. Самым наглядным примером спускового механизма является *заполнение водохранилищ*, вследствие чего происходит внезапное изменение напряжений в породах. Имеются много случаев, когда возникновение землетрясений было связано с заполнением искусственных водохранилищ *высотой более 100 м*: Койна в Индии, 10.XII.1967,  $M=6.4$ , Кремаста в Греции, 5.II.1965,  $M=6.2$ , Синфын в Китае, 19.III.1962,  $M=6.1$  и др. Известны также случаи, когда землетрясения возникали *после закачки или откачки воды* в глубокую скважину (близ Денера, США, 1962; Мацусиро, Япония, 1966).

Форшок землетрясения, о котором шла речь выше, фактически можно считать спусковым механизмом для главного толчка. В принципе не исключена возможность, что землетрясение в данном месте может служить “спусковым механизмом” для землетрясения в другом не очень удаленном месте.



Большое распространение получило мнение, что в качестве спускового механизма могут служить атмосферные явления, в частности, обусловленные гравитационными притяжениями Луны и Солнца (земными упругими приливными воздействиями), когда кора Земли, как твердого тела, подвергается неравномерным (локальным) деформациям. Напряжения и деформации в земной коре, вызванные гравитационным притяжением Луны и Солнца, достигают своих наибольших величин, когда Солнце, Луна и Земля выстраиваются на одной прямой – в дни *новолуния и полнолуния*. Эти дни даже получили название “*сейсмические окна*”. Именно в эти дни вероятность происхождения землетрясения наибольшая,

Несмотря на то, что относительное расположение Солнца, Луны и Земли, как спускового механизма землетрясения, выглядит правдоподобным и имеет много сторонников во многих странах (в том числе в Армении), по данным исследователей Геологической службы США, между временами происхождения сотни прошлых землетрясений на территории Калифорнии и временами выстраивания Солнца, Луны и Земли хорошей корреляции не наблюдается. Как показывают расчеты, влияние расположения других планет на увеличение напряжений и деформаций в земной коре значительно меньше, чем Солнца и Луны. Поэтому не случайно, что во время последнего так называемого “*парада планет*” в 1981-1982 годах, когда Венера, Марс, Сатурн, Юпитер, Земля и Солнце оказались почти на одной прямой (один раз в 180 лет), на Земле не наблюдались признаки увеличения сейсмической активности [39].

Могут ли подземные ядерные взрывы провоцировать землетрясения. Этот вопрос заинтересовал многих, особенно граждан Армении после Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года, когда стало известно, что за 3 дня до землетрясения на острове Новая Земля был осуществлен мощный ядерный подземный взрыв. По наблюдениям сейсмологов за последние 30-40 лет, когда были произведены интенсивные ядерные подземные взрывы, на Земле не наблюдалось какого-то общего повышения сейсмической активности. Если подземные ядерные взрывы осуществляются на сейсмоактивных территориях, то провоцирование местных землетрясений будет иметь большую вероятность. В частности, в штате Невада (США) в 1968 году после подземного ядерного взрыва с магнитудой 6.3 на территории с площадью 10x10 км<sup>2</sup> были зарегистрированы слабые землетрясения – афтершоки с магнитудой не более 5. Естественно, что чем глубже место установки заряда и его мощность, тем такой взрыв имеет большие шансы провоцировать землетрясение на близлежащих территориях. При ядерных взрывах только очень незначительная часть (1-5%) всей энергии распрост-

раняется в виде сейсмических волн (основная часть энергии превращается в тепловую, распространяющуюся на территории с радиусом в несколько десятков метров), которые на расстоянии 1000 км (Спитак находится на расстоянии около 4000 км от Новой Земли) вызывают деформации грунта всего около 1 микрона, которые вряд ли могут стать причиной (провоцировать) непосредственно или ускорить время возникновения землетрясения на таком расстоянии (Природа, №12, 1989).

**Неудачный прогноз и его последствия.** Естественно, число нереализованных прогнозов по сильным землетрясениям оказалось больше, чем удачных. Типичный пример неудачного прогнозирования имел место в 1981 г., когда два американских сейсмолога предсказали у берегов Перу и северной части Чили три очень крупных землетрясения с магнитудами 8.5, 9.4 и 9.9 [39]. Вполне можно представить необычайно тревожную реакцию со стороны общественности и сейсмологических научных кругов на такой прогноз, учитывая то обстоятельство, что максимальное, когда-либо зарегистрированное приборами землетрясение к этому моменту имело магнитуду не более 8.9. По поручению перуанского правительства группа из 12 американских специалистов после двухдневного совещания пришла к заключению о научной необоснованности этого прогноза. И действительно у берегов Перу и северной части Чили в 1981 году сильного землетрясения не было. Несмотря на значительные достижения китайских сейсмологов, не было прогнозировано катастрофического землетрясения на территории Китая в Таншане 27 июля 1976 года ( $M=7.8$ ), при котором погибло около 650 тыс. человек [83]. Причем оно произошло на том же миграционном “деформационном фронте” [44] всего за 1.5 лет после самого удачно прогнозированного землетрясения 1975 года на территории северного Китая, на расстоянии 400 км от Таншаня в районе Хайчена. Неудачные прогнозы были также и в других странах, в частности в СССР, Китае, США, Японии.

В принципе, что даст обществу положительное решение задачи прогнозирования землетрясения. Оно не спасет нас от землетрясения. Землетрясение все же произойдет и станет причиной разрушения зданий и сооружений, средств жизнеобеспечения, историко-культурных памятников. Даже при самом удачном предсказании место эпицентра землетрясения можно указать лишь с точностью до десятка километров, время – от нескольких дней до месяца и года, силу – магнитуду – в пределах 1-2 единиц, возникнут много вопросов, имеющих неоднозначные ответы относительно главного защитного мероприятия – **эвакуации населения**. Если предсказанный эпицентр находится около крупного густонаселенного центра, возникнет масса неурядиц: на сколько времени



эвакуировать людей, приостановить промышленное производство, транспортные средства, социальные и медицинские услуги, приостановить миграцию людей. Кто будет возмещать убытки и компенсации в случае несбывшегося прогноза? Будут ли оправданы экономические потери только тем, что землетрясение могло произойти? Прозвучат призывы, направленные на привлечение к ответственности специалистов, сделавших неудачный прогноз. Мероприятия по защите от прогнозируемого землетрясения станут причиной больших политических, экологических, социальных, финансовых и психологических потрясений общества.

В этой связи, нам кажется, не мешало бы вспомнить известное мнение Ч.Рихтера о проблеме предсказания землетрясений: *“Мне не нравится этот паталогический интерес к прогнозу. Он отвлекает нас от уже известного риска и от уже известных мер, которые следует предпринять для устранения этого риска. Мы знаем, где находятся места, которым угрожает опасность и какие постройки в этих местах ненадежны”*.

Таким образом, обобщая все вышеизложенное, можно констатировать, что землетрясение настолько сложное природное физическое явление, связанное с нерегулярными тектоническими движениями литосферных плит, прочностными и деформационными характеристиками пород земной коры и их водонасыщенности, непрерывными физико-химическими процессами, происходящими внутри Земли, с его сложными вращательными движениями и взаимодействием с другими космическими объектами и десятками других факторов, которые сильно отличаются друг от друга в разных сейсмоактивных регионах. В свете чего, уровень корреляции с каким-либо из предшествующих явлений, которое было бы достаточным для надежного прогноза землетрясения, должна быть очень низкая. В настоящее время просто отсутствует запас надежных данных какого-либо явления перед землетрясением, который позволил бы осуществить надежный прогноз. Пройдут долгие года, произойдет множество землетрясений, прежде чем эта цель будет достигнута. И все же, отступая перед этим грозным явлением природы, согласимся с мнением известных американских ученых Дж.Гира и Х.Шаха о том, что *“мы с уверенностью можем предсказать, что большинство будущих землетрясений предсказаны не будут”* [39].

**Об активном воздействии на землетрясение.** Как выяснилось выше, надежное прогнозирование землетрясений пока остается нерешенным. Наряду с этим в научных кругах нередко обсуждается *еще более смелая идея – как предотвратить землетрясения*. Речь в первую очередь, конечно, идет о предотвращении разрушительного землетрясения. Ставится вполне логичный вопрос: раз энергия землетрясения на-



капливается за очень длительный период времени, то почему же не постараться добиться ее постепенного освобождения. Несмотря на то, что такую постановку задачи многие ведущие ученые считают сомнительной (о невозможности компенсации энергии сильного землетрясения малыми порциями мы уже отмечали в 1.17), она все же рассматривалась неоднократно. Любопытно отметить, что идея предотвращения возникла от противоположного явления: оказалась, что путем закачки огромного количества воды в глубину земли можно провоцировать землетрясения умеренной силы. Это произошло в 1962 году вблизи Денвера (США – глубина скважины 3800 м), в Мацусиро (Япония – глубина скважины 1800 м). Аналогичное явление, как мы уже видели, имели место при заполнении искусственных водохранилищ. Все это позволяет предполагать, что можно управлять землетрясениям путем закачки и откачки воды.

По программе по уменьшению сейсмической опасности (EHRP-США) цели управления землетрясениями заключались в следующем [49]:

- определение возможности ограничения магнитуды землетрясения на активных разломах,
- специальное проектирование мест подземного сброса отходов и расположение резервуаров с целью предотвратить случайное возбуждение землетрясений.

Практически наиболее вероятным оказался вариант создания на поверхности земли, где в породах обнаружены напряжения соответствующей величины, т. е. где имеются реальные признаки подготовки землетрясения, специального экспериментального разрыва длиной в несколько десятков метров для откачки и закачки воды. По мнению авторов программы, здесь потребуется большая осторожность, чтобы искусственно не возбудить сильное землетрясение.

Более радикальный способ высвобождения энергии считалось применение ядерных взрывов. В этом случае вероятность ускорения времени подготовляющегося землетрясения очень большая, но и защита от него тоже сильно облегчается, ибо время возникновения искусственно возбужденного землетрясения зависит от времени производства ядерного взрыва (до этого все население можно эвакуировать). Здесь самый неразрешимый вопрос – защита от радиоактивных отходов, которые могут выделиться из-под земли. Поэтому управление землетрясением путем закачки воды считается более реальной, чем с помощью ядерных взрывов. Все эти аспекты искусственного управления землетрясением были выдвинуты более 40-50 лет назад. Судя по научной литературе и по сообщениям средств массовой информации за последние годы в этом направлении новых предложений и реальных результатов пока нет.

#### 14. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СООРУЖЕНИЯ, ПОДГОТОВКА К ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ

Наилучший способ защиты от землетрясений – это научно обоснованное и качественное сейсмостойкое строительство и превентивные мероприятия по подготовки землетрясения. Это осуществляется прежде всего путем систематического усовершенствования научных основ сейсмического воздействия, принципов проектирования и возведения сейсмостойких зданий и сооружений и их расчетных концепций. Другими словами главное внимание необходимо уделять вопросам безопасности сооружения, а не на установлению точного дня и часа его обрушения. *Ведь люди умирают не от самого землетрясения, а из-за разрушения зданий и сооружений вследствие землетрясения.* Для уменьшения уровня негативных последствий от землетрясения первоочередной научной проблемой становится прогнозирование не точного времени ожидаемого землетрясения, а *прогнозирование поведения сооружения* во время землетрясения. Цель любого прогноза – понижение уровня негативных последствий прогнозируемого явления. Цель прогнозирования поведения сооружения во время землетрясения (независимо когда оно произойдет) – разработать такие принципы проектирования и возведения зданий и сооружений, при реализации которых были бы гарантированы безопасность жизни людей, сохранность оборудования и имущества с минимальными расходами на антисейсмические мероприятия. Другими словами свести к минимуму величину *сейсмического риска*.

Задача прогнозирования поведения сооружения во время землетрясения включает в себя большой круг взаимообусловленных вопросов. Главными из них являются закономерности сложных пространственных колебаний приповерхностной неоднородной толщи (строительной площадки) с различными физико-механическими, акустическими и гидрологическими параметрами при сильных землетрясениях с одной стороны, и особенности конструктивных, объемно-пространственных решений, прочностных, деформационных и диссипативных свойств, применяемых строительных материалов и узлов сопряжений проектируемого сооружения - с другой стороны.

Как неоднократно отмечалось выше, механизм возникновения землетрясения имеет еще много не до конца выясненных аспектов. Еще сложнее прогнозирование особенностей его проявления на определенном расстоянии от очага на поверхности Земли с данным грунтовым условием на строительной площадке проектируемого сооружения.

Но все же следует констатировать, что за последние 50-60 лет благодаря регистрации большого количества акселерограмм сильных



землетрясений и достижениям в области механики деформированных твердых тел удалось разработать достаточно близкую к действительности теорию (модель) сейсмического воздействия на здания и сооружения. Это теория позволяет при наличии статистически полной информации об уровне сейсмической опасности данной территории, грунтовых условиях площадки строительства и прочностно-деформационных, диссипативных параметрах проектируемого сооружения, прогнозировать его поведение при будущих землетрясениях. Причем этот прогноз осуществим вплоть до выявления повреждений и разрушения отдельных его элементов и управления этими повреждениями в смысле их допустимости для безопасности жизни людей и сохранности имущества. Эта *так называемая спектральная теория сейсмического воздействия* в разных модификациях в настоящее время принята в нормативных документах по сейсмостойкому строительству почти всех сейсмоактивных стран мира. Таким образом в действительности основные положения норм сейсмостойкого строительства – это наш сегодняшний прогноз поведения проектируемых зданий и сооружений при будущих землетрясениях.

Естественно, что отдельные элементы этой теории систематически будут подвергаться изменениям и дополнениям после каждого сильного землетрясения, анализа повреждений зданий и сооружений, в том числе инструментально зафиксированных кинематических параметров по высоте поврежденных и неповрежденных сооружений.

Вопросы прогнозирования поведения сооружения можно существенно развить также на основе экспериментальных исследований натуральных объектов или их крупномасштабных моделей при искусственных воздействиях имитирующие землетрясение: при помощи мощных сейсмических платформ программного управления, с использованием вибрационных машин, при специальных подземных взрывах. Большую и неопределимую информацию о фактическом поведении сооружения дают обследования их физического состояния и характер *повреждений* после сильного землетрясения независимо от того, где они произошли. Мы здесь особо подчеркиваем роль повреждений зданий, потому что они содержат больше информации для совершенствования принципов проектирования, чем полностью разрушенные или, наоборот, полностью устоявшие здания. Здесь уместно вспомнить слова известного американского геофизика и геодезиста *Уильяма Боуи* о том, что *“Человечество от крупных природных катаклизмов получает частичную отдачу в виде тех поучительных уроков, которые вытекают от их изучения”*. Поэтому при каждом разрушительном землетрясении независимо от страны, где оно произошло, необходимо организовать специальную



экспедицию ученых в области сейсмостойкости и инженеров-проектировщиков (а не только сейсмологов как это бывает в большинстве случаев). Полноценные такие исследования, естественно, не обойдутся без крупных финансовых и материальных вложений, но они существенно малы, чем для работ по прогнозированию времени землетрясения, и можно с уверенностью утверждать, что они стократно окупятся.

Единственным источником информации о реальных кинематических параметрах движения грунта являются те инструментальные данные, которые зафиксированы во время сильных землетрясений. Естественно, что для надежной статистической оценки данных и построения на их основе моделей сейсмических воздействий для *сейсмостойкого строительства инструментальные данные должны быть добыты из густой сети наблюдений, организованной на пунктах с разными грунтовыми условиями на всей сейсмоопасной территории в течение десятка лет.* С сожалением приходится констатировать, что из-за отсутствия надежных акселерографов в сети сейсмических станций на всей территории бывшего СССР не было накоплено достаточного количества акселерограмм сильных землетрясений с магнитудой  $M > 5$ . Такие записи не были получены ни при Ашхабадском (1948), ни при Ташкентском (1966), ни при землетрясениях на Камчатке (1959), в Зангезуре (1968), в Дагестане (1970), Сахалине (1995), Ноемберяне (1994) и многих других. А при двух мощных землетрясениях 1976 г. в Газли и 1988 г. Спитаке было получено всего по одной акселерограмме. Даже во время мощного Спитакского землетрясения 1988 года с магнитудой  $M = 7.0$  всего была получена одна акселерограмма на расстоянии около 30 км от эпицентра. По нашим сведениям, неблагоприятно обстоит дело с регистрацией акселерограмм грунтов и сооружений при сильных землетрясениях в странах СНГ и в настоящее время. Для сравнения отметим, что во время Ломо-Приетского землетрясения 1989 года в Калифорнии в 125 пунктах на грунтах с радиусом 250 км были получены трехкомпонентные акселерограммы землетрясения. При этом акселерографы были установлены не только на грунтах, но и на разных по высоте уровнях жилых и общественных многоэтажных зданиях, мостах и плотинах – всего получено 690 акселерограмм грунтов и сооружений. Аналогичная картина имела место и при последующих землетрясениях в Нортридже (Northridge, США) в 1994 году и при сильных землетрясениях в Куширо-Оки и Кобе (Япония).

Мы специально это подчеркиваем, так как считаем, что сейсмическая безопасность будущих построек прямо обусловлена сегодняшним наличием большого количества записей *прошлых* сильных землетрясений.

Наряду с систематическим уточнением карт сейсмического районирования необходимо составить специальные локальные карты с расположением сейсмоактивных разломов и эпицентров прошлых разрушительных землетрясений, возможных оползневых зон, участков разжижения грунтов, участков вероятного затопления в случае обрушения плотин и других опасных для строительства зон.

Из сказанного следует, что нормы сейсмостойкого строительства должны систематически совершенствоваться в результате регистрации землетрясений, анализа их последствий и развития базы экспериментально-теоретических исследований строительных конструкций. Можно с уверенностью констатировать, что в этой области за последние десятилетия заметны неоспоримые достижения. Однако самые современные и строгие нормы сейсмостойкого строительства не могут гарантировать безопасность сооружений, если они проектировались с их грубыми нарушениями, строительно-монтажные работы при их возведении осуществлялись некачественно, не по проекту, и во время эксплуатации со стороны жителей конструктивное решение сооружения подвергалось различным самовольным изменениям. Здесь уместно привести отрывок из древних “Законов Хаммурапи” (11750 г. д. н. э.), заимствованный из книги Дж. Гира и Х. Шаха [39]: *“Если строитель построил дом для человека и не сделает его прочным, а дом падает и приносит смерть его владельцу, этот строитель заслуживает смерти. Если при этом погибает имущество, он должен возместить то, что уничтожено, и, раз он не сделал дом прочным, он должен построить его заново за свой счет. Если строитель построит дом для человека и не сделает его по правилам и стена упадет, тогда строитель должен укрепить стену за свой счет”*. К сожалению, такие нарушения в прошлом имели место в сейсмоактивных районах бывшего СССР. Поэтому многие здания и сооружения в этих районах имеют большую уязвимость уже при землетрясениях с магнитудой  $M > 5$ .

Как бы горько не звучало, гарантировать полную безопасность сооружения во время землетрясения практически невозможно. Да и с экономической точки зрения она нецелесообразна. Полное исключение поврежденных во время землетрясения стоит много денег. Мы сознательно идем на **определенный риск** при строительстве зданий и сооружений. **Этот риск велик для территории со старой застройкой, на территориях с высокой плотностью населения.** Следовательно, необходимо всегда быть готовым к возможным чрезвычайным событиям. В этом деле наиболее важным шагом должна быть **аттестация** эксплуатируемых зданий и сооружений – периодическое обследование технического состояния и выявления уровня их сейсмостойкости.



На этой основе необходимо принять решение о сносе неудовлетворительных и усилении ослабленных объектов. Для этого необходимо иметь общую государственную и местную долговременную программу уменьшения уровня сейсмического риска. В первую очередь необходимо усилить здания и сооружения с большим накоплением людей (школы, больницы, объекты массовых спортивных и культурных мероприятий) и объекты жизнеобеспечения. Более предпочтительны те методы повышения уровня сейсмовооруженности эксплуатируемых объектов, которые позволяют осуществить это без прекращения эксплуатации. К таким методам относятся сейсмоизоляция существующего сооружения путем поэтапной установки резино-металлических подушек на уровне верхнего обреза фундаментов, возведением над существующим зданием верхнего неэксплуатируемого гибкого этажа, играющего роль гасителя колебания во время землетрясения; соединение верха существующего здания с вновь построенным жестким консольным сооружением и др. [75,82].

**Основные принципы сейсмостойкого строительства.** Опыт и последствия разрушительных землетрясений показывают, что при строительстве новых, усилении и реконструкции существующих зданий и сооружений необходимо придерживаться общепризнанных принципов сейсмостойкого строительства, которые в обеспечении сохранности зданий и сооружений и жизни людей являются наирешающими:

- Объемно-планировочные и конструктивные решения зданий и сооружений должны удовлетворять условиям симметрии и равномерного распределения жесткостей и масс. Предпочтение следует отдать конструктивным системам с малым шагом несущих элементов, меньшим количеством проемов, их малым размером и симметричным расположением. Здания сложной, неправильной формы при землетрясениях подвергаются дополнительным крутильным воздействиям, что резко увеличивает их повреждаемость.
- Вертикальные несущие элементы должны проходить по высоте здания от фундамента до крыши без разрывов и смены материала.
- Конструктивное решение здания должно обладать определенной "адаптивностью" для исключения его хрупкого и внезапного разрушения и создания возможности его пластического деформирования без обрушения. С этой целью сжимающие усилия в несущих вертикальных элементах от постоянных статических нагрузок должны быть ограничены по сравнению с их реальной несущей способностью. Сталь – самый надежный строительный



материал для сейсмостойкого строительства. Следует отдать предпочтение многократно статически неопределимым конструктивным системам.

- Основные несущие элементы конструкции должны быть однородными и монолитно связанными между собою в единую прочную и гибкую конструкцию. Здание по высоте должно быть гибким, на уровнях перекрытий – жесткими. В сборных железобетонных конструкциях следует стремиться к укрупнению размеров элементов, обращая особое внимание на надежность и прочность стыков соединения и их расположения вне зон максимальных усилий. Соединения должны быть равнопрочными с соединяемыми элементами; их конструктивное решение должно обеспечивать возможность качественного выполнения строительно-монтажных работ. Болтовые соединения предпочтительны по сравнению со сварочными соединениями. С целью предотвращения возможных аварий необходимо предусмотреть гибкие соединения между элементами коммуникаций внутри сооружения и магистральными - в грунте.
- Необходимо никогда не забывать, что разница начальной стоимости здания с минимальной и высокой сейсмостойкостью составляет всего 5% и что позднее вынужденное усиление уже готового или поврежденного здания может обойтись в 50 и более процентов его первоначальной стоимости. Как говорят в народе “скупой платит дважды”.
- Многие здания и сооружения старой постройки имеют декоративные фасады, скульптурные украшения и карнизы, которые во время землетрясения могут представлять большую опасность. Их или надо удалить, или дополнительно укреплять со зданием на основании новых норм.
- Вблизи активных разломов, на крутых склонах, оползневых зонах, участках возможного разжижения и проседания грунтов, зонах возможного затопления в случае обрушения плотин необходимо наложить ограничение на строительство. На таких территориях лучше разбить парки, зоны отдыха и другие аналогичные объекты.
- При разработке проектов застройки территорий городов необходимо стремиться к простой застройке с возможно широкими улицами и проездами и меньшей плотностью заселения. Этажность жилых зданий рекомендуется не более 9, больниц и школ не более 3.
- Скальные грунты всегда предпочтительны для обеспечения

сейсмостойкости. Причиной повреждений и обрушений зданий, возведенных на аллювиальных грунтах, в большинстве случаев, является генерирование в них резонансных колебаний во время землетрясения. Поэтому значение периода основного тона свободных колебаний проектируемого сооружения должно отличаться не менее в 1.5 раза от преобладающего периода грунтовой толщи, на которой оно должно быть возведено.

- Последствия разрушительных землетрясений показывают, что индивидуальные жилые дома в сельских местностях не менее уязвимы, чем другие здания и сооружения. Поэтому вопросы их проектирования и строительства также обязательно должны регламентироваться нормами.
- Нормы сейсмостойкого строительства устанавливают лишь минимальные требования для обеспечения сопротивления сооружения землетрясению. Они не могут предусмотреть все возможные случаи. Поэтому инженер-проектировщик обязан нести также индивидуальную ответственность за сейсмостойкость своего проекта.

Общепризнанными критериями сейсмостойкого проектирования с точки зрения обеспечения безопасности людей и экономии материальных ресурсов считаются:

- при слабых землетрясениях ( $M < 5.5$ ) здания должны остаться неповрежденными или получить небольшие повреждения;
- при умеренных землетрясениях ( $5.5 < M < 7.0$ ) допускаются некоторые повреждения, однако здания должны сохранять целесообразность их восстановления;
- при сильных землетрясениях ( $M > 7.0$ ) здания должны сохранять жизни людей и не обрушиться, хотя позже могут быть снесены.

Известно, какая суэта и неразбериха появляются среди населения и органов управления сразу после разрушительного землетрясения. От ужаса и страха люди, естественно, немедленно покидают свои жилища независимо от степени их поврежденности. Часто из-за отсутствия соответствующих инструктивно-нормативных указаний и объяснений люди покидают совсем неповрежденные или с незначительными повреждениями дома. Причем это происходит не только в первые часы и дни после землетрясения, а многие месяцы и даже годы спустя. Такая обстановка приводит к тяжелым последствиям. Люди остаются без крыши, а их жилища, оставленные на произвол судьбы, постепенно приходят в негодность. Поэтому нормы сейсмостойкого строительства должны содержать специальную шкалу (рекомендацию) по уровню получивших во время землетрясения повреждений зданий различных конструктивных

систем, на основании которой можно оперативно решить вопросы пригодности того или иного объекта к дальнейшей постоянной, или временной эксплуатации или же необходимости немедленной эвакуации людей из данного объекта. При этом степень повреждения объекта можно установить также инструментально [24] путем сравнения величины измеренного периода свободных колебаний поврежденного здания с величиной периода измеренного до землетрясения (неповрежденного).

**Подготовка общества.** В деле защиты от землетрясений огромное значение имеет общественное сознание о негативных последствиях землетрясений. Очень важно работникам органов управления, проектировщикам, архитекторам, строителям и всему населению систематически напоминать о горьких уроках прошлых разрушительных землетрясений. С этой целью на видных местах и фасадах наиболее уязвимых зданий и сооружений необходимо поместить предупредительные специальные объявления-дощечки об их опасности в случае землетрясения. Люди, не переживающие необычные ситуации, во время землетрясений могут подвергаться большому нервным потрясениям и прибегать к неразумным действиям. Поэтому все население сейсмоактивных зон должно иметь элементарные знания о землетрясениях и о способах защиты от них. Школьникам в обязательном порядке необходимо обучать, готовить их преодолевать чувство страха и спокойно переживать само землетрясение. Широкие слои населения необходимо систематически обучать элементарным навыкам обеспечения как собственной безопасности, так и других членов общества как в течение всего землетрясения, так и непосредственно после землетрясения. Для этих целей необходимо использовать все средства массовой информации и в первую очередь телевидение. Среди населения необходимо систематически проводить учебные сейсмические тревоги с привлечением всех аварийно-спасательных служб. В первые часы и дни землетрясения на *средства массовой информации* возлагается большая ответственность. Обычно после сильного землетрясения распространяются всякого рода необоснованные слухи о вымышленных причинах землетрясения, об ожидаемых более мощных ударах, о большем количестве жертв и огромных масштабах повреждений (несоответствующих действительности), которые становятся причиной дополнительной дестабилизации и без того нарушенного общественного сознания. Средства массовой информации не только не должны способствовать распространению таких слухов, но и в тесном сотрудничестве с представителями властей и специалистами в области сейсмологии и строительства способствовать доведению до сознания широких слоев населения истинной информации о происшедшем.



Землетрясения всегда становятся причиной огромного материального ущерба. Поэтому людям надо убедить заранее *страховать свои жилища*, как это делается в случае пожара, засухи и других природных стихийных явлений. Государственные и частные страховые компании должны гарантировать немедленную выплату гражданам страховых компенсаций непосредственно после землетрясения.

И, наконец, для быстрой ликвидации негативных последствий и лечения ран *необходимо постоянное функционирование государственных специальных, оснащенных современными техническими средствами, профессиональных отрядов по спасательным работам, по быстрому восстановлению линий жизнеобеспечения, соблюдению общественного порядка, организации медицинского обслуживания и снабжения населения продуктами питания и других неотложных мер.* Для координации и организации этих мероприятий необходимо также наличие соответствующих законодательных актов данной страны. В некоторых странах подготовка к землетрясениям считается эквивалентным подготовке к войне. Этот путь спасения жизни людей и сохранения материальных ценностей считается более надежным и рациональным, чем их эвакуация и последующее возвращение. Землетрясение, без сомнения, страшное природное явление. Оно происходит неожиданно, проявляя порою вероломство и беспощадность. Но с научной точки зрения с ним можно “сотрудничать”, против него можно сражаться и сдерживать его разрушительные “посягательства” и даже можно “победить”. Да. Можно победить землетрясение, если каждый ответственный за это государственный чиновник и ученый, инженер-проектировщик и строитель с надлежащей ответственностью возьмется за это общенациональное дело. Говорят *природа наказывает неосведомленных и недобросовестных.* Следовательно, изучать природу и знать закономерности его прогнозируемых и непрогнозируемых явлений – долг каждого из нас.

\* \* \*

Нам показалось, что все, что мы хотели сказать о землетрясениях, уже сказано на вышеприведенных страницах этой работы. Но в душе у нас осталось что-то недосказанное. Речь идет о следующем. Исторически сложилась такая ситуация, что с самого начала развития сейсмологии как самостоятельной науки, с конца XIX века, причинам возникновения землетрясений уделяли больше внимания, чем причиненным им огромным негативным последствиям. Научные аспекты причин возникновения землетрясений и их прогноз в иерархии актуальности

занимали более высокое положение, чем аспекты практического обеспечения сохранности зданий и сооружений (сейсмостойкости) при землетрясениях и подготовка населения и государства к ним. На сейсмологические научные исследования во всех странах уровень государственного финансирования всегда в десятки раз выше, чем на исследования по сейсмостойкому строительству. Чисто сейсмологическими вопросами всегда занималось большое количество титулованных ученых и именитые академические организации, тогда как вопросы обеспечения сейсмостойкости сооружений и снижения уровня сейсмического риска были как бы “наукой второго сорта” и стали достоянием ученых отраслевых научных организаций. Косвенно об этом свидетельствует сравнение количества и качества опубликованных во всем мире научных трудов по сейсмологии и сейсмостойкому строительству.

Нам кажется пришло время резко изменить свое отношение к этим двум аспектам землетрясений. *О землетрясениях мы знаем даже “слишком много”, пора научиться надежно защищаться от них.* XXI век должен стать веком всемерной защиты от пагубных последствий землетрясений. Только тогда мы можем быть уверены, что при будущих землетрясениях число жертв и уровень ущерба станут минимальными.

## Литература

1. *EERI* "Armenia Earthquake Reconnaissance Report" Earthquake Spectra, Special Supplement, Editors Loring A. *Wyllie*, John R. *Filson*, August, 1989, p.175.
2. *СПИТАК-88*, Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, 503 p.
3. *Filson J., Borchardt R., Langer C., Simpson D.* 1. Seismology. Armenian Earthquake Reconnaissance Report. Earthquake Spectra, Special Supplement, August, 1989, pp. 1-12.
4. *Yegian M.K., Ghahraman V.G.* The Armenian Earthquake of December 1988, Northeastern University, Boston, Massachusetts, October, 1992, 216 p.
5. *Sharp R.V.* Surface Faulting: A preliminary view. Earthquake Spectra, Special Supplement, August, 1989, pp. 12-33.
6. *Трифонов В.Г., Караханян А.С., Кожурин А.И.* Активные разломы и сейсмичность. "Природа", 1989, №12, с.32-38.
7. *Wells D.L. and Coppersmith K.I.* New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin the Seismological Society of America, vol.84, № 4, pp. 974-1002, August, 1994.
8. *Каранетян Н.К.* Сейсмогеодинамика и механизм возникновения землетрясений Армянского нагорья. Ереван: Издательство АН Армянской ССР, 1990, 264 с.
9. *Borchardt R., Glassmoyer G., Andrews M. and Granswick E.* Effect of Site Condition on ground motion and Damage. Earthquake Spectra, August 1989, pp. 23-42.
10. *Cisternas A. et al.* The Spitak (Armenia) earthquake of 7 December 1988; field observations, seismology and tectonics. Nature, 339 (6227) U.K., pp. 675-679.
11. *Трагедия Спитака* не должна повториться. (к 10-летию Спитакского землетрясения). Отв. ред. академик НАН РА Э.Е. Хачиян. Ереван: Воскан Ереванци, 1998, 246 с.
12. *Боммер Дж.* Сохранилась единственная запись основного толчка в ближней зоне. "Природа", 1989, № 12.
13. *Мартirosян Р.П., Мхитарян Л.А., Тоноян К.А., Григорян Е.К.* Анализ инструментальных данных сильных движений Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года. Изв. АН Арм.ССР, "Науки о Земле", т. XLII, 1989, № 4, с. 67-73.
14. *Der-Kiureghian A.* Strong-Motion Records. Earthquake Spectra. August, 1989. Special Supplement "Armenia Earthquake Reconnaissance Report" pp. 43-53.



15. *Хачиян Э.Е., Мелкумян М.Г.* Запись Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года инженерно-сейсмическими станциями города Ереван. Уроки землетрясения, Ереван, 1989, 34 с.
16. *Arakelian F.O., Darbinian S.S., Hakopian H.A., Mnatsakanian V.L., Mikaelian A.N., Poghosian O.K.* Macroseismic Investigation of Power Plants and Instrumental records of the Spitak-88 Earthquake. Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp. 447-451.
17. *Ambraseys N.N. and Adams R.D.* Long-term seismicity of North Armenia. EOS, Trans.Am.Geoph.Union, 70 (10), 145, 1989, pp. 152-154
18. *Хачиян Э.Е.* Прикладная сейсмология. Ереван, Гитутюн, 2008, 518 с.
19. *Karapetian B.K., Martirosian R.P., Mkhitarian L.A., Tonoyan K.A., Grigorian F.K., Arakelian F.O., Pogossian O.K., Mnatsakanian V.L., Akopian G.A.* Instrumental Date for Basic Shocks of the Spitak-88 Earthquake. Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp. 21-29.
20. *Hadjian A.H.* The Spitak, Armenian Earthquake of 7 december 1988 – why so much destruction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 12 (1993) 1-24.
21. *Ishihara K.* Effects of Ground Condition on the Damage the Spitak-88 Earthquake. Spitak-88, Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp.107-121.
22. *Kobayashi H., Ohtani K.* Dynamic Properties of Ground and Buildings in Armenia Based on Measurements of Microtremors. Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp. 141-153.
23. *СНиП II-7-81.* Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. М., 1982.
24. *СНРА II-6.02.2006.* Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. Ереван, 2006, 120 с.
- 24а *СНРА II-6.02-94.* Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. Ереван, 1995, 70 с.
25. *Окомто М.* Сейсмостойкость инженерных сооружений. М., 1980, 342 с.
26. *Халтурин В.И., Геодакян Э.Г., Мхитарян Л.А., Саргсян И.М., Шомухмедов А.М.* Усиление макросейсмического эффекта в г.Ленинакане. Изв. НАН РА, Наука о Земле, 1990, XVIII, №1, с. 47-55.
27. *Suyehiro S., Okada T., Kobayashi H., Hiroswawa M., Murakami M., Sugano S.* Evaluation of the Results Obtained by the Japenese Mission of Armenia. Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp. 87-106.

28. *Многоаспектное изучение бедствий* и планированное управление ими в Армении. Миссия ЮНДРО в Армению 11-30 сентября, 1989. Организация объединенных наций, Нью-Йорк, 1990 (рукопись).
29. *Трагедия Спитака* не должна повториться. (к 10-летию Спитакского землетрясения). Отв. ред. академик НАН РА Э.Е. Хачиян. Ереван: Воскан Ереванци, 1998, 246 с.
30. *Армения: беда, милосердие, возрождение*. М.: Прометей, 1989, 174 с.
31. *Армения, декабрь 88*. Ереван: "Айастан", 1990, 558 с.
32. *Гай Д.Н.* Унесу боль твою... М.: Юридическая литература, 1989, 272 с.
33. *Айзенберг Я.М.* Строительная наука против стихии. Природа №12, 1989.
34. *Никонов А.А.* Земля землетрясений. Природа, 1989, № 12, с. 39-46.
35. *Заключение* государственной комиссии о качестве проектирования и строительства жилых и общественных зданий массовых серий в северных районах Армянской ССР, причинах их разрушений и предложения по совершенствованию практики проектирования и строительства в районах с высокой сейсмичностью. М., 1989.
36. *Khachian E.E.* Spitak Earthquake 1988 (Intensity and Effects on Structures) ARMNIISA Report, Yerevan 1989, 11 p.
37. *Khachian E.E. and Melkounian M.G.* Recording of Spitak Earthquake on December 7, 1988 by the Seismic Station of Yerevan. Lesson of the Earthquake (Trans. with addition from Russian Edition 1989). Yerevan 1994, p. 38.
38. *Хачиян Э.Е.* Спитакское землетрясение 7-ого декабря 1988 года, основные характеристики. В кн. "Трагедия спитака не должна повториться". Изд. "Воскан Ереванци", Ереван, 1998, с. 7-29.
39. *Гир Дж., Шах Х.* Зыбкая твердь. М.: Мир, 1988, с. 224.
40. *Добровольский И.П.* Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1984, 88 с.
41. *Друмя А.В., Шебалин Н.В.* Землетрясения: где, когда, почему? Кишинев: Штиинца, 1985, 196 с.
42. *Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир, 1985, 264 с.
43. *Клячко М.А.* Землетрясения и мы. Санкт-Петербург. РИФ "Интеграф", 1999, 234 с.
44. *Мози К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988, 382 с.
45. *Назаров А.Г.* К проблеме прогноза землетрясений. ДАН АрмССР, т. 53, 1971, №1.
46. *Ньюмарк Н., Розенблюэт Э.* Основы сейсмостойкого строительства. М.: Стройиздат, 1980, 344 с.
47. *Окомото М.* Сейсмостойкость инженерных сооружений. М., 1980, 342 с.
48. *Райс Дж.* Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982, 217с.

49. *Рикитаке Т.* Предсказание землетрясений. Издательство М.: Мир, 1979, 388 с.
50. *Ризниченко Ю.В.* Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985, 408 с.
51. *Рихтер Ч.Ф.* Элементарная сейсмология. М.: Издательство иностранной литературы, 1963, 670 с.
52. *Саваренский Е.Ф.* Сейсмические волны. М.: Недра, 1972, 294 с.
53. *Сидовский М.А., Нерсесов И.Л.* Вопросы прогноза землетрясений. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1978, № 9, с. 13-29.
54. *Сейсмический риск* и инженерные решения. М.: Недра, 1981, 376 с.
55. *Семенов А.Н.* Изменение отношения времен пробега поперечных и продольных волн перед сильными землетрясениями. Изв. АН СССР, Физика Земли, т. 72, 1969, № 4.
56. *Соболев Г.А.* Основы прогнозирования землетрясений. М.: Наука, 1993, 313 с.
57. *Степанян В.А.* Землетрясения в Армянском нагорье и прилегающих окрестностях (на арм. яз.). Ереван, 1964, 248 с.
58. *Тазиев Г.* Когда земля дрожит. М.: Мир, 1968, 252 с.
59. *Тёркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика М.: Мир, т.1-2, 1985, 730 с.
60. *Физика очага* землетрясения. М.: Наука, 1985.
61. *Ходжсон Дж.* Землетрясения и строение земли. М.: Мир, 1966, 194 с.
62. *Эйби Дж.* Землетрясение. М.: Недра, 1982, 264 с.
63. *Ярар Р., Айзенберг Я., Смирнов В.* Краткий обзор землетрясения в Эрзинджане (Восточная Турция) 13 марта 1992 года и некоторый анализ-инженерные аспекты. "Сейсмостойкое строительство". 1992, № 1, ЮНЕСКО, ЕАСС, М.: Сервиспрогресс, с. 30-37.
64. *Annali di Geofisica.* The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992-1999, volume 42, № 6, December, 1999.
65. *Bolt В.А.* Earthquakes. A Primer, W.H. Freeman and San Francisco, 1978, 241 p.
66. *European Macroseismic Scale.* 1992. Editor G. Grunthal, Luxemborg, 1993, 78 p.
67. *Hanks T.C. and Kanamori H.* A moment-magnitude scale. I.Geophys.Res. 84, 1979, pp. 2348-2350.
68. *Richter Ch.F.* Elementary Seismology. W.H. Freeman and Co., San Francisco, 1958, 768 p.
69. *Rikitake T.* Earthquake Predction. Elsevier Scientific Publishing. Co Amsterdam, 1976, 357 p.
70. *Guidoboni E. and Traina G.* A new catalogue of Earthquakes in the historical Armenia Area from Antiquity to the 12<sup>th</sup> Century. "Annali di Geofisica", vol.XXXVIII, № 1, March 1995, pp. 85-147.



71. *Пьер Руссо*. Землетрясения. Изд. Прогресс. М.: 1966, 248 с.
72. *ЮНЕСКО*, Курьер, июнь 1976. Землетрясение. 34 с.
73. *Робертс Э.* Когда сотрясается земля. М.: Мир, 1966, 176 с.
74. *Liquefaction of Soil During Earthquakes*. National Academy press, Washington, D.C. 1985, 240 p.
75. *Lessons Learned* from the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989. U.S. Geological Survey Circular, 1045, 48 p.
76. *Swiss Re*. Earthquake Risk Assessment. Printed in Switzerland TS/e 2500, 1980, 56 p.
77. *The Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) Earthquake*. January 17, 1995 Preliminary Reconnaissance Report. Oakland, California. EERI, 95-04 February 1995, 116 p.
78. *Тёркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика М.: Мир, т.1-2 , 1985, 730 с.
79. *Annali di Geofisica*. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992-1999, volume 42, № 6, December, 1999.
80. *Խաչիյան Է.Բ.* Վերականգնողական երկրաշարժագիտություն: Երևան, «Գիտություն», 2002, 312 էջ.
81. *Аку К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. Т.1, М.: Мир, 1983, 520 с.
82. *Wells D.L. and Coppersmith K.I.* New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin the Seismological Society of America, vol.84, № 4, pp. 974-1002, August, 1994.
83. *Болт Б.А.* Землетрясения: общедоступный очерк. М.: Мир, 1981, 256 с.
84. *United States of America*. Uniform Building Code, vol. 2, Chapter 16, Division IV-Earthquake Design, California, 1997, 69 p.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИТАКСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 7 ДЕКАБРЯ 1988 ГОДА: ОСНОВНЫЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И АНАЛИЗ ЕГО РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ.....	5
1. Общая характеристика землетрясения.....	5
2. Форшок и афтершоки землетрясения.....	12
3. Геотехнические последствия землетрясения.....	16
4. Регистрация колебания грунта.....	20
5. Исследование влияния местных грунтовых условий .....	29
6. Разрушительные последствия землетрясения .....	35
7. Социально-экономические последствия землетрясения .....	63
8. Международная солидарность и неотложная помощь в зоне бедствия .....	66
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ.....</b>	<b>71</b>
1. Что такое землетрясение .....	71
2. Опасные явления, сопровождающие землетрясение .....	79
3. Причины землетрясений, литосферные плиты, сейсмоактивные пояса земли.....	86
4. Механизм возникновения землетрясения .....	94
5. Регистрация землетрясений .....	99
6. Сейсмические волны и определение параметров очага землетрясения .....	103
7. Скорости и лучи распространения сейсмических волн .....	107
8. Интенсивность землетрясения .....	110
9. Магнитуда землетрясения. Шкала магнитуд Рихтера .....	113
10. Сейсмический момент землетрясения .....	118
11. Энергия землетрясения.....	121
12. Некоторые статистические данные и эмпирические зависимости между параметрами землетрясения.....	124
13. Прогнозирование землетрясений.....	126
14. Прогнозирование поведения сооружения, подготовка к землетрясениям.....	144
Литература.....	154

ХАЧИЯН ЭДУАРД ЕФРЕМОВИЧ

**СПИТАКСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ  
7 ДЕКАБРЯ 1988 ГОДА**

(к тридцатилетию землетрясения)

Компьютерный набор Н. Эгнатосян

Компьютерная верстка С. Н. Оганесян

Оформление обложки А. Аствацатрян

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 10.

Тираж 200 экз.

Отпечатано в типографии «Антенор»



19620



### **ХАЧИЯН ЭДУАРД ЕФРЕМОВИЧ**

Доктор технических наук, профессор, академик НАН Армении, заслуженный деятель науки РА, лауреат Премии Президента РА, заведующий кафедрой строительной механики НУАСА, главный научный сотрудник Института геологических наук НАН РА. Признанный специалист в области прикладной сейсмологии и сейсмостойкого строительства, строительной механики и теории колебаний. Широко известны в странах СНГ и за рубежом его исследования по использованию акселерограмм сильных землетрясений в нелинейных, упруго-пластических, пространственных и волновых задачах сейсмического воздействия на различные здания и сооружения, а также для разработки основных положений норм сейсмостойкого строительства. Разработал метод определения величины энергии сильного землетрясения и величины предельной деформации пород земной коры по макросейсмическим параметрам его последствий на поверхности земли, и способ прогнозирования акселерограмм сильных движений различных грунтов при предположении землетрясения, как мгновенного разрыва земной коры. Автор более чем 250 монографий, научных статей, нормативных документов, авторских свидетельств. Под его руководством разработаны национальные нормы по сейсмостойкому строительству Республики Армения, защищены десятки кандидатских и докторских диссертаций. Он активный участник разработки норм сейсмостойкого строительства стран СНГ, международных конференций и семинаров, член редколлегии многих научных изданий.

Издательство  
**НААПЕТ**

ISBN 978-9939-856-49-0



9 789939 856490