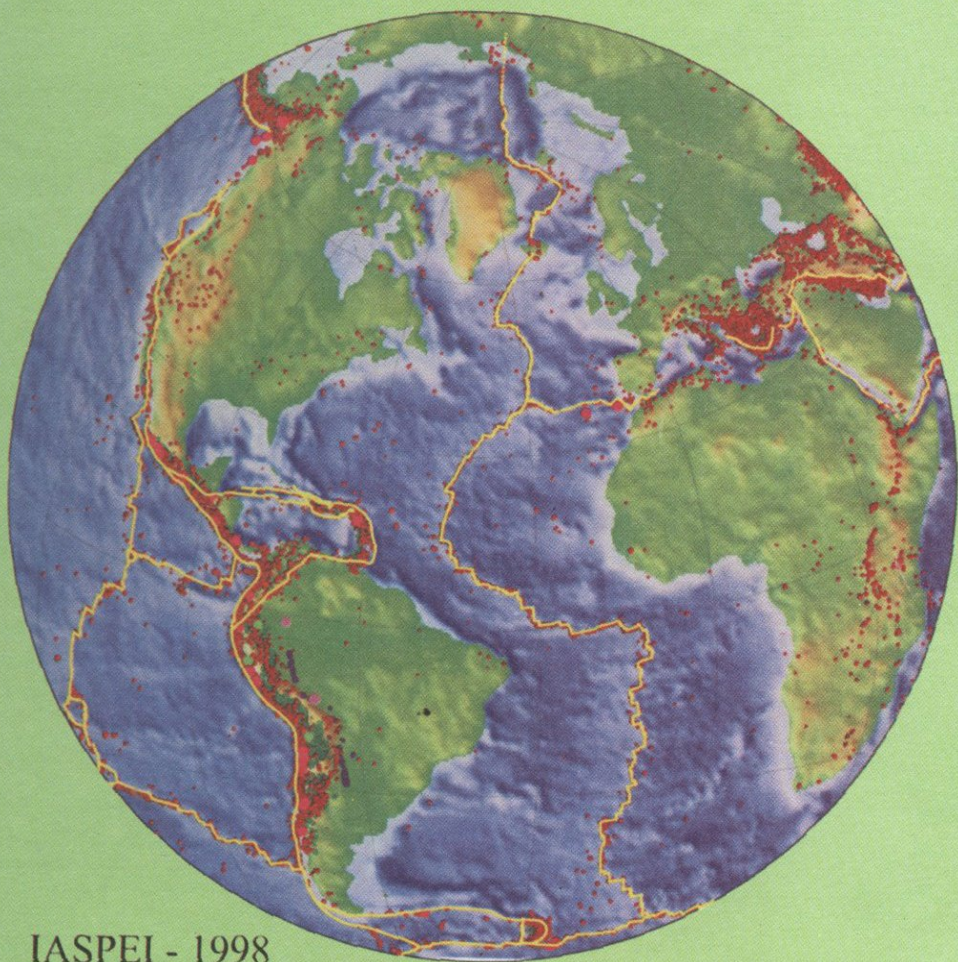


ЭДУАРД ХАЧИЯН

ПРИКЛАДНАЯ  
СЕЙСМОЛОГИЯ



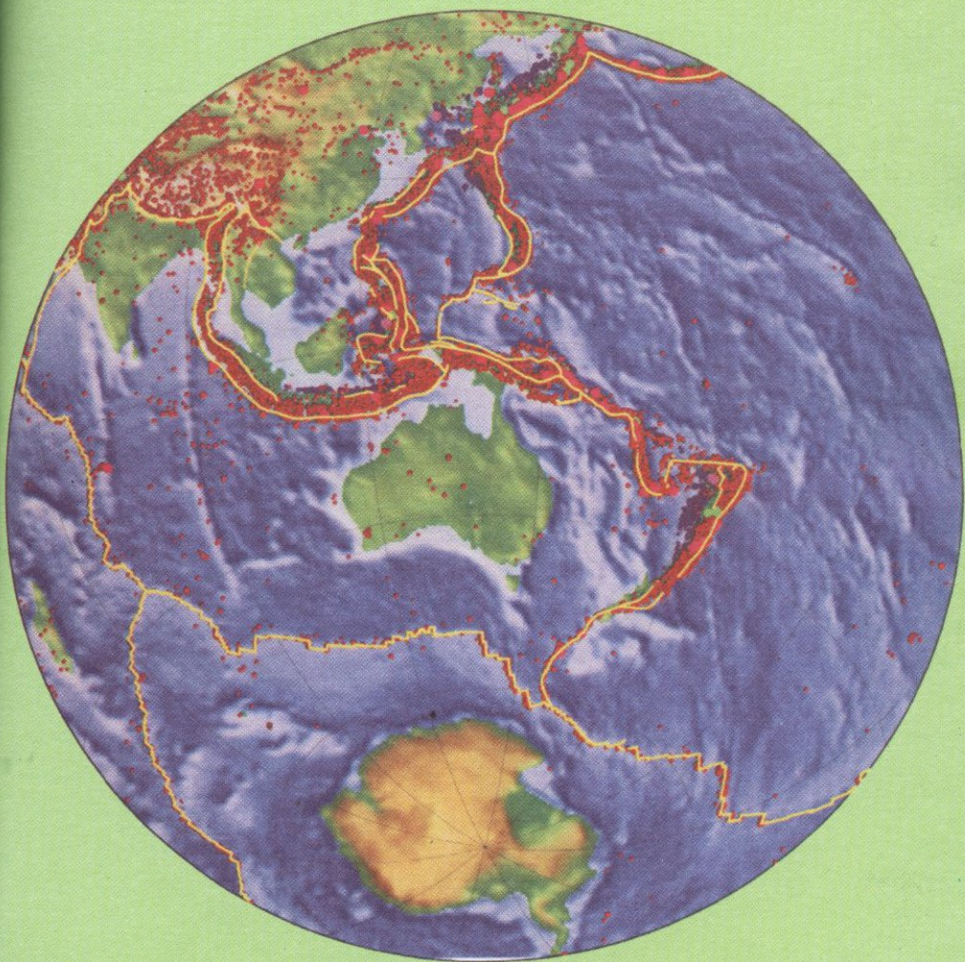




## IASPEI - 1998

Seismicity of the Earth, 1964-1995, magnitudes greater than 5.1.







# ПРИКЛАДНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ

ПРИРОДОЙ НЕ УПРАВЛЯЮТ,  
А ЛИШЬ ПОДЧИНЯЮТСЯ ЕЙ.

БЭКОН

СПОНСОР ИЗДАНИЯ



ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՇԻՆԱՐԱՐՆԵՐԻ ՄԻՈՒԹՅՈՒՆ  
UNION OF BUILDERS OF ARMENIA  
СОЮЗ СТРОИТЕЛЕЙ АРМЕНИИ



# ԷԴՈՒԱՐԴ ԽԱՉԻՅԱՆ - ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ԵՐԿՐԱՇԱՐԺԱԳԻ- ՏՈՒԹՅՈՒՆ, - Երևան, ՀՀ ԳԱԱ «Գիտություն» հրատ., 2008թ. 491 էջ

Մենագրությունը նվիրված է երկրաշարժագիտության հիմնարար հարցերին՝ երկրաշարժերի առաջացման պատճառներին, զրանցմանը, սեյսմիկ ալիքների տարածման առանձնահատկություններին, ուժգնությանը ու մագնիստուղին, էներգիային ու մեխանիկային, կամխազուշակմանը և նրանց ժամանակակից վերծանումներին: Գրքում զգալի մաս են կազմում երկրաշարժի ժամանակ զետեմի տատանման առանձնահատկությունների վերլուծությունները և դրանց կիրառման հարցերը սեյսմակայուն շինարարության նորմերի կատարելագործման գործընթացում: Բերված են ՀՀ տարածքում տեղի ունեցած երկրաշարժերի՝ և առանձնապես Սպիտակի երկրաշարժի նկարագրությունները և նրանց հետևանքների գիտական վերլուծությունները:

Մենագրությունը ուղղված է երկրաշարժագիտության և սեյսմակայուն շինարարության բնագավառի գիտաշխատողներին և՛ մասնագետներին: Այն կարող է գիտա-ուսումնական ձեռնարկ հանդիսանալ բարձրագույն ուսումնական հաստատությունների ուսանողների, մագիստրատուրայի ունկնդիրների ու ասպիրանտների համար:

Աղ. 50, նկ. 222, գր.ցանկ 233 անուն:

Տպագրված է «Էդիթ Պրինտ» ՍՊԸ տպարանում



## **EDUARD KHACHIAN - APPLIED SEISMOLOGY, - Yerevan, "Gitutyun" publisher NAS RA, 2008, 491 p.**

This monograph addresses the issues of present-day seismology such as: causes that generate earthquakes, methods applied to record earthquakes, distinct features of seismic waves, quantitative parameters of intensity, magnitude, source mechanics and energy of an earthquake, problems of earthquake prediction and earthquake protection. Much attention is paid to the regularities of ground vibrations during strong earthquakes and use of these regularities in developing standards of earthquake-proof construction. A brief analysis of the earthquakes that have occurred in Armenia is given along with detailed description of the destructive Spitak earthquake of December 7, 1988 and the effects it had.

The monograph is intended for use by researchers in the field of seismology and earthquake engineering. It can equally serve as a scientific tutorial for post-graduate and undergraduate students, students of higher education institutes.

Tables 50, il.222, reference 234 titles.

ЭДУАРД ХАЧИЯН

5-68  
ПРИКЛАДНАЯ  
СЕЙСМОЛОГИЯ

ЕРЕВАН  
ИЗДАТЕЛЬСТВО "ГИТУТЮН" НАН РА  
2008





УДК 550.34

ББК 26.21

X 292

**Монографию рекомендовали к опубликованию:**

Ученый совет Института геологических наук НАН РА,  
Ученый совет Ереванского государственного университета  
архитектуры и строительства.

**ХАЧИЯН ЭДУАРД**

**X 292 ПРИКЛАДНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ. – Ер.:**

Издательство “Гитутюн” НАН РА, 2008. 491с. + 27 цв.вкл.

Монография посвящена современным вопросам сейсмологии: причинам возникновения землетрясений, способам их регистрации, особенностям сейсмических волн, количественным параметрам интенсивности, магнитуды, механике очага и энергии землетрясения, проблемам прогнозирования землетрясений и защиты от них. Большое место в ней уделено закономерностям колебания грунтов при сильных землетрясениях и их использованию при совершенствовании норм сейсмостойкого строительства. Приводится краткий анализ землетрясений, произошедших на территории Республики Армения, подробное описание разрушительного Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года и его последствий.

Предназначена для научных работников и специалистов в области сейсмологии и сейсмостойкого строительства. Она может служить также в качестве научно-учебного пособия для аспирантов, слушателей магистратуры и студентов высших учебных заведений.

ISBN 978-5-8080-0726-0

© Э.Е.Хачиян, 2008

ББК 26.21

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Землетрясение — одно из самых грозных природных явлений. Они происходят во всех континентах Земли, становясь причиной смерти тысячи людей, разрушения сотни зданий и сооружений, историко-культурных памятников, уничтожения материальных ценностей. К сожалению, от негативных последствий землетрясений не гарантирована как территория Республики Армения, так и территории многих стран мира.

В настоящее время наука о землетрясениях во всем мире находится в стадии своего бурного развития. За последние годы в области сейсмологии отмечены значительные успехи как в вопросах объяснения физической сущности самого землетрясения, так и в области защиты общества от их негативных последствий. Спитакская трагедия 1988 года, Шикотанский “сейсмический гром” 1994 года и последующие за ними не менее трагичные и разрушительные землетрясения последних лет показали, что имеется настоятельная необходимость придать новый импульс вопросам дальнейшего развития в области сейсмологии и сейсмозащиты в Армении, странах СНГ и других развивающихся странах. Эту цель преследует и настоящая монография автора. Диапазон сейсмологических исследований очень обширный. Они применяются для изучения внутреннего строения Земли, поиска полезных ископаемых, обнаружения места и мощности ядерных взрывов и других вопросов. Естественно, что сейсмологические проблемы особенно интересуют специалистов в области градостроительства, проектировщиков, инженеров-строителей, архитекторов, бизнесменов и даже политологов. В пределах одной монографии освещать перечисленные все задачи и проблемы, причем с точки зрения одного автора, трудная задача. Поэтому, учитывая область научных интересов автора, в настоящей работе параллельно с изложением общих вопросов сейсмологии основной упор ставится на тех проблемах сейсмологии, которые в первую очередь связаны с обеспечением сейсмостойкости сооружений и усовершенствованием соответствующих нормативных документов в этой области. Основным материалом для содержания книги стали научные исследования, проведенные автором в Армянском НИИ сейсмостойкого строительства,



в Американском университете Армении, в Институте геологических наук НАН РА и лекции, прочитанные автором для студентов Ереванского государственного университета и Ереванского университета архитектуры и строительства.

Учитывая многосторонность содержания книги и то обстоятельство, что по затронутым в ней вопросам в настоящее время во всем мире проводятся интенсивные научные исследования, автор просит снисхождения у своих читателей за предпочтительное изложение отдельных разделов, подчеркивания собственных точек зрения по ним и применения отдельных словосочетаний и терминов.

Монография в первую очередь предназначена для научных работников и специалистов в области прикладной сейсмологии и сейсмостойкого строительства. Она может служить также учебным пособием для студентов, слушателей магистратуры и аспирантов высших учебных заведений.

Автор выражает свою глубокую признательность почетному президенту Американского университета Армении, иностранному члену Национальной академии наук РА Миграну Агбабяну за материальную и моральную поддержку при составлении книги. Первое издание книги на армянском языке вышло в 2002г. в Ереване и удостоилась Премии Президента Республики Армения в области технических наук с рекомендацией ее перевода на русский и английский языки. Настоящее русское издание книги выходит с существенными дополнениями и доработками многих разделов по сравнению с первым изданием. Выражаю свою искреннюю признательность С.С.Григоряну, В.Г.Трифонову, Я.М.Айзенбергу, В.И.Уломову, А.Д.Завьялову за совместное полезное обсуждение отдельных вопросов, затронутых в книге. Большое содействие по изданию монографии оказали председатель Союза строителей Армении, кандидат технических наук, лауреат Государственной премии Республики Армения Гагик Галстян и почетный председатель, кандидат технических наук, лауреат Государственной премии Республики Армения Вазген Погосян, которым автор выражает свою искреннюю благодарность.

Неоценимую помощь в компьютерном оформлении книги оказали Т.Петросян, А.Саркисян, Р.Ахмад. Им также выражаю свою благодарность.

**Эдуард Хачиян**  
**апрель 2008**

## 1.1. 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 кашмарное 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 сориентируетесь 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 кашмарный 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 3-5см, 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 [14]. 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 [77]. 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 [77]:

"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 отемнели, 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 родственников, 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 Головино 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 [27].

*"Землетрясение произошло после полудня в 7 часов 45 минут, с прерывающими подземными ударами, которые сопровождались волновыми колебаниями в течение примерно двух минут. Первые четыре удара, которые были наимоощными, 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 (1067м) образовалась вереница многочисленных трещин, которые от колебания грунта местами достигали ширины до 2 сажень (4.26м) и снова закрылись. От этих трещин и расщелин вытекали водяные*

фантаны высотой до 2 аршин (1.5м). 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 городах Маку, Байазет, Нахиджеван, Ордубад и др. Но большие 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.Акопа 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 истекли молокообразные грязные водяные струи, два других источника в два и более раз увеличили свой дебит.

Во время первого подземного удара жители села Кара-Асанлу 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”.

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 [62]:

“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, тщетно 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 панфлете, направленном против усложненности нашей 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 высмеянию 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 [67] 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 последующие 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.



## 1.2. 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 [21]:

*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 800 км/час;
- образование стоящих волн – сейшвов.

*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.

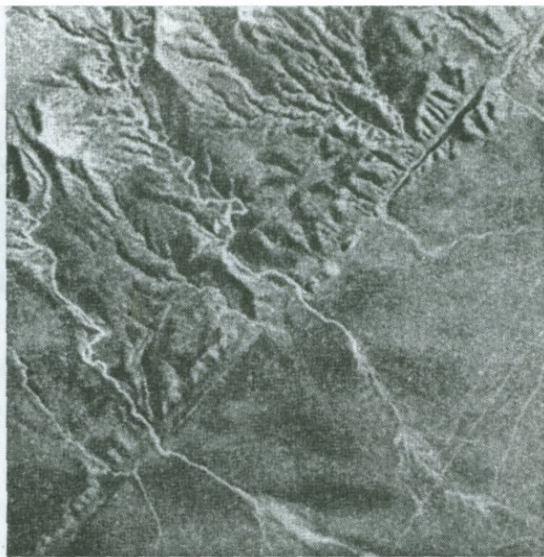
Иллюстрированные изображения некоторых из этих опасных явлений, сопровождающих землетрясение, показаны на рис. 1.1-1.10.



Рис.1.1. Надрывы (трещины) на поверхности земли у японского города Ниигата после землетрясения 16 июня 1964 года [110].



а.



б.

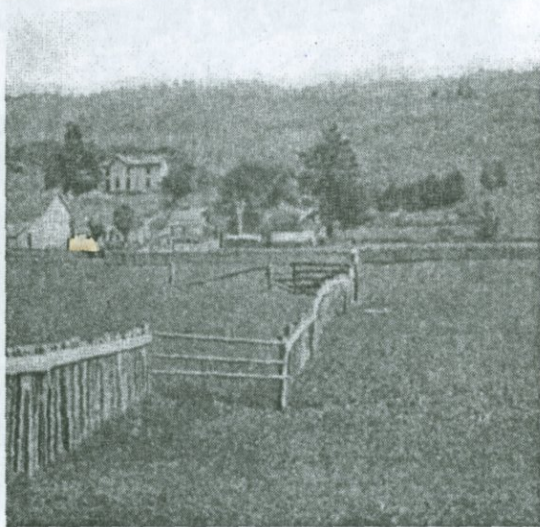


Рис.1.2.

- а. Разлом Сан-Андреаса 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 [68].
- б. Смещение забора на 2.6м во время Сан-Францисского землетрясения 1906 года [68].







Рис.1.5. Оползень, образованный в результате землетрясения [206].



а.



б.

Рис.1.6. Последствия землетрясения:

а. опрокидывание зданий из-за разжижения грунта (Ниитата,1964) [21 169].

б. разрушение газопровода (диаметр 1м) при землетрясении [206].

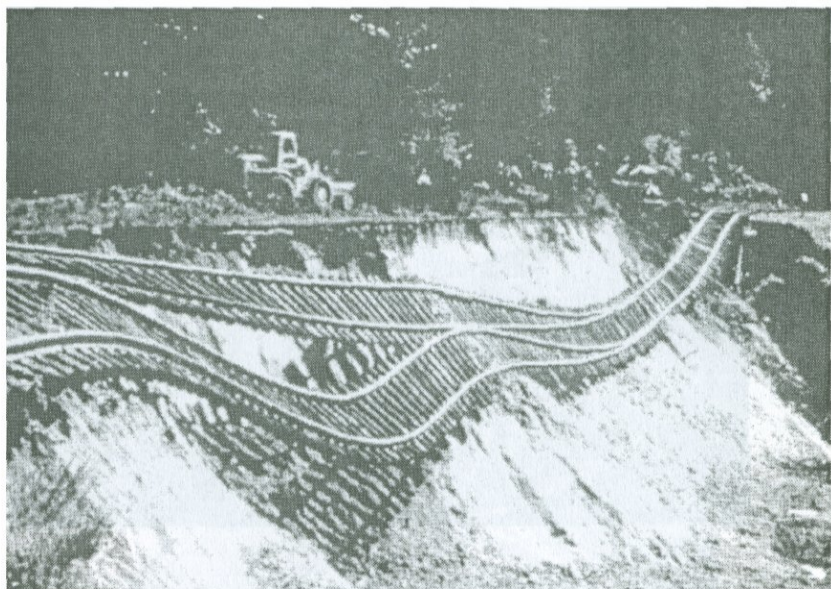


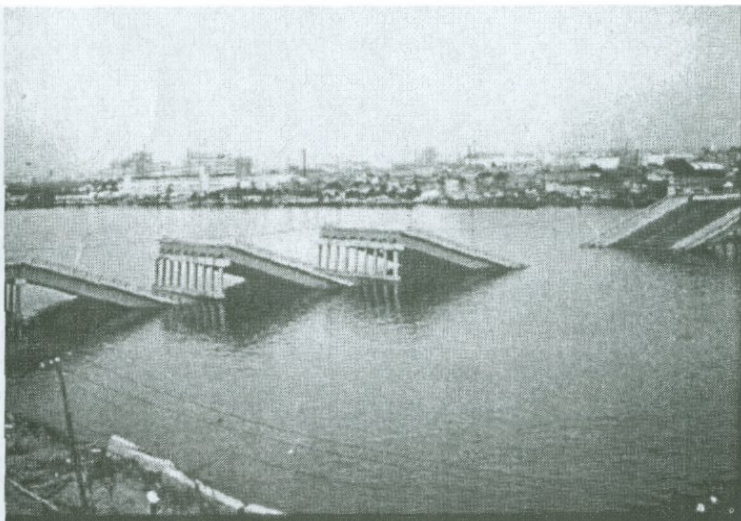
Рис.1.7. Искривленные железнодорожные пути повисли в воздухе во время землетрясения 1965 года в Олимпии, когда склон холма под ними сполз вниз [21].



Рис.1.8. Разрушения столбов линии электропередач при землетрясении 17 января 1995 года в Кобе [209].



а.



б.

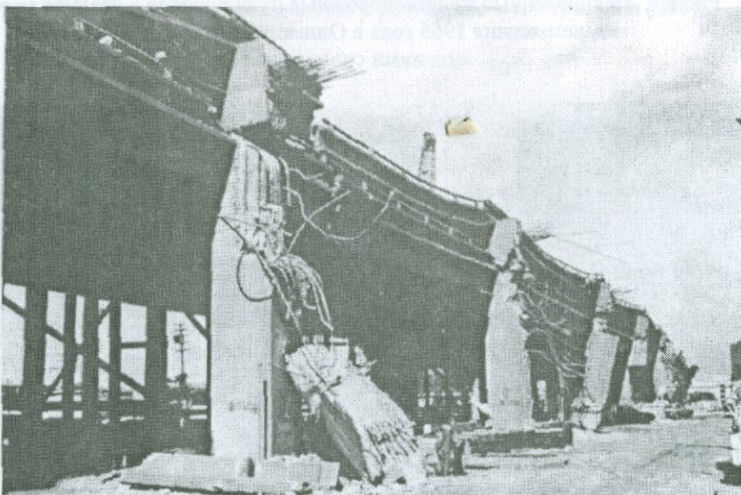


Рис.1.9.

- а. Разрушение моста при Фукуйском землетрясении 1948 года.
- б. Повреждения двухъярусного моста Интерстейт 880 (Interstate 880) во время землетрясения в Ломо Приетта 1989 года [168].



Рис.1.10. Последствия цунами на японских берегах от Чилийского землетрясения 1960 года.

При Нью-Мадридском (США) землетрясении 1811 года образовалось новое озеро с площадью  $10\text{ км}^2$  и глубиной в 1.5-7м, 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 Токийского 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.

### 1.3. 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 [21].

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.

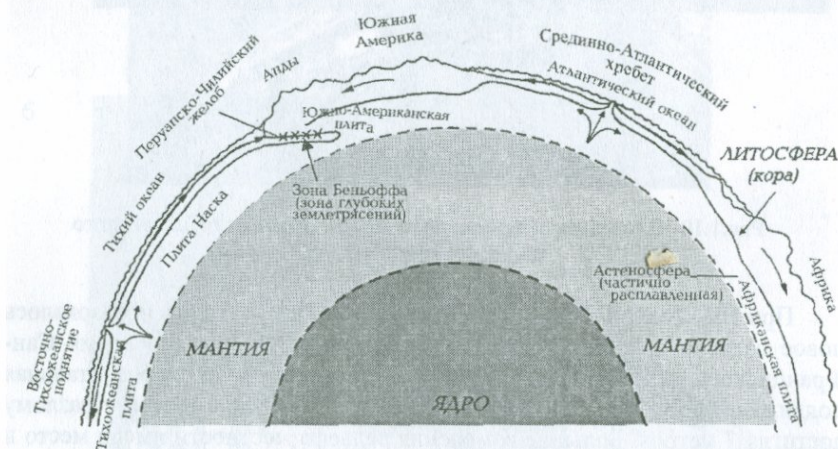


Рис.1.11. Земля в разрезе [21].

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.1.11). Оболочка Земли имеет очень маленькую толщину по сравнению с ее радиусом – 6378км. В континентальных участках толщина оболочки достигает до 150км, а под океанами – 70км. Если размеры Земли мысленно уменьшить до размеров яйца, то толщина коры литосферы окажется равной толщине скорлупы яйца.

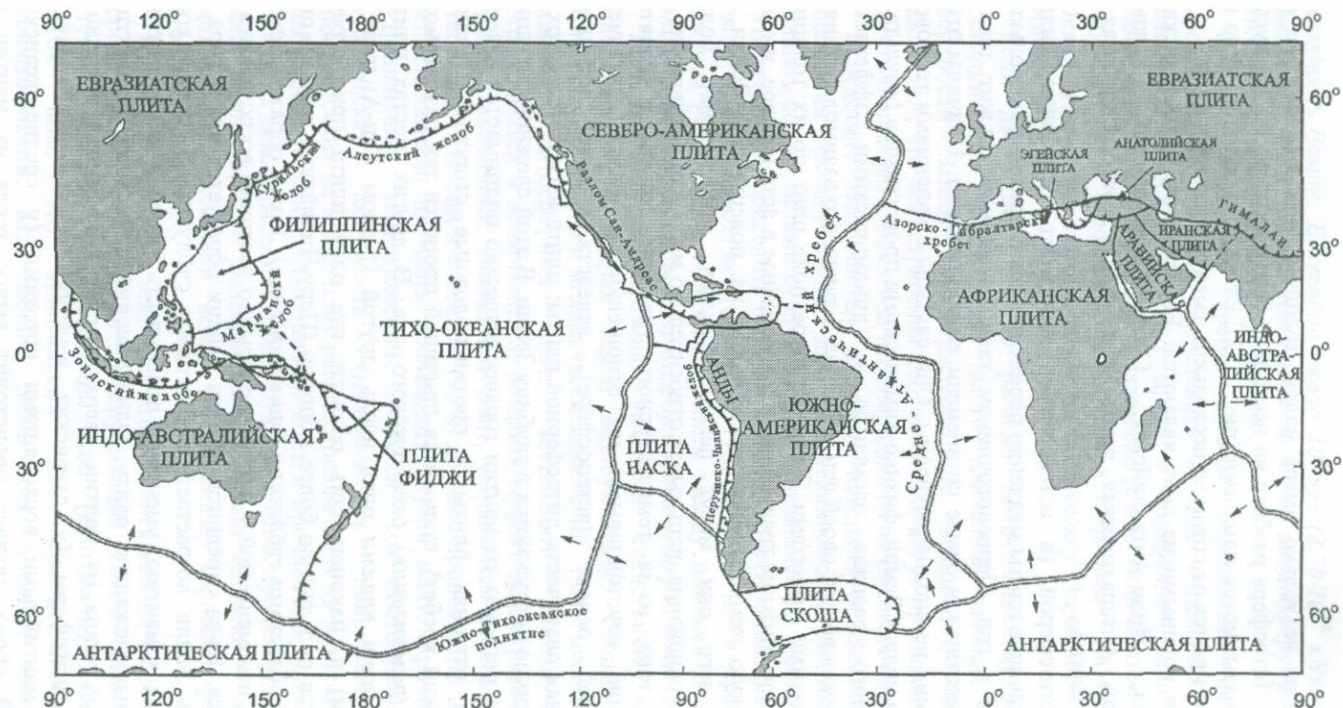


Рис.1.12. Литосферные плиты [21].

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



Литосфера не только имеет малую толщину: *она твердая, но не целостная*. Литосфера разбита на несколько больших кусков. Эти куски литосферы называются **плитами** (рис. 1.12). 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 конвекции 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 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 Бенъофа) 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 движения [79]. Таким образом, границы между плитами бывают *трех типов – хребты, желобы и трансформированные разломы* (рис. 1.12а).

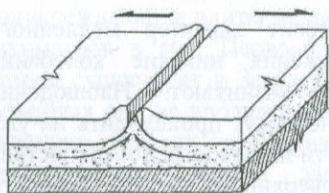
Землетрясения и вулканы являются следствием непрерывно происходящихся в недрах Земли вышеуказанных сложных физико-химических процессов и механических движений. Такие несогласованные движения литосферных плит заставляют каменную толщу растрескиваться и испариваться, создавая эффект землетрясения. Землетрясения, 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 Трансказиатский*, включающий 5-6% всех сильных землетрясений, протягивается от Средиземноморья на западе до Китая на востоке, через

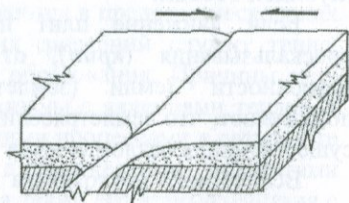


южную Европу, Турцию, Кавказ, Иран и Северную Индию. Остальные 4-5% землетрясений происходят в других местах и внутри плит.

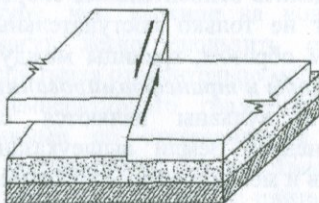
На цветном рис. 1.13 показана глобальная карта сейсмической опасности Земли, составленная в 1990-1999 гг. в пределах международной программы "Глобальная оценка сейсмической опасности Земли" под эгидой ЮНЕСКО в период международной декады снижения опасности катастроф, провозглашенной ООН.



**Хребет - спрединг**



**Желоб - субдукция**



**Трансформный разрыв - проскальзывание**

Рис. 1.12а. Относительные движения плит.

**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

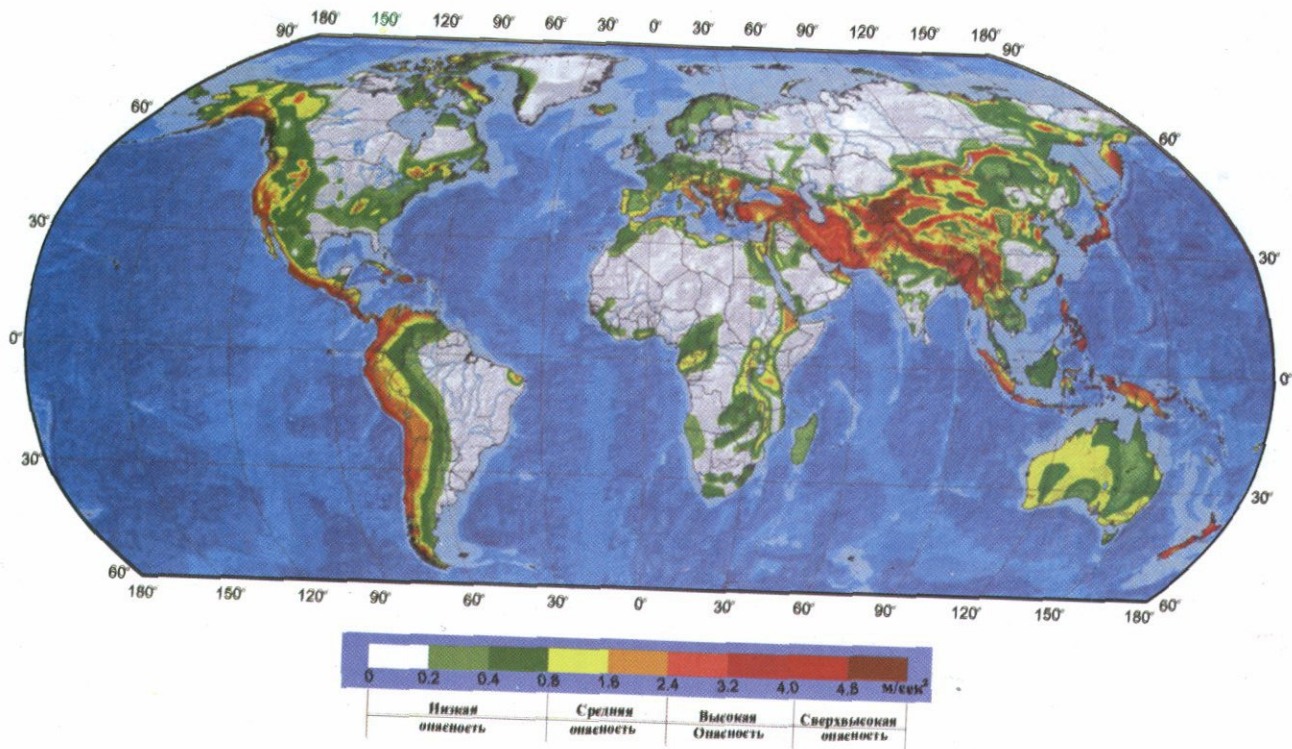


Рис.1.13. Глобальная карта сейсмической опасности Земли. Максимальные значения ускорения грунта (в м/сек) рассчитаны с 10%-ой вероятностью их превышения в течение 50-летнего отрезка (при периоде повторяемости землетрясения данной интенсивности, равной 475 лет) [117].



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  $I_0$ ) составляет (в процентах)

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

В табл. 1.1 вычислены значения вероятности  $P$  при различных сроках службы сооружения  $t$  и повторяемости  $T$  землетрясений данной интенсивности.

Таблица 1.1

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.

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, регистрируемые 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 рис. 1.14а-1.14е приведены карты сейсмического районирования Армении, Турции, Ирана, России, Японии и США.

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.

---

\* Детальный анализ акселерограмм сильных землетрясений приведен во второй части книги.



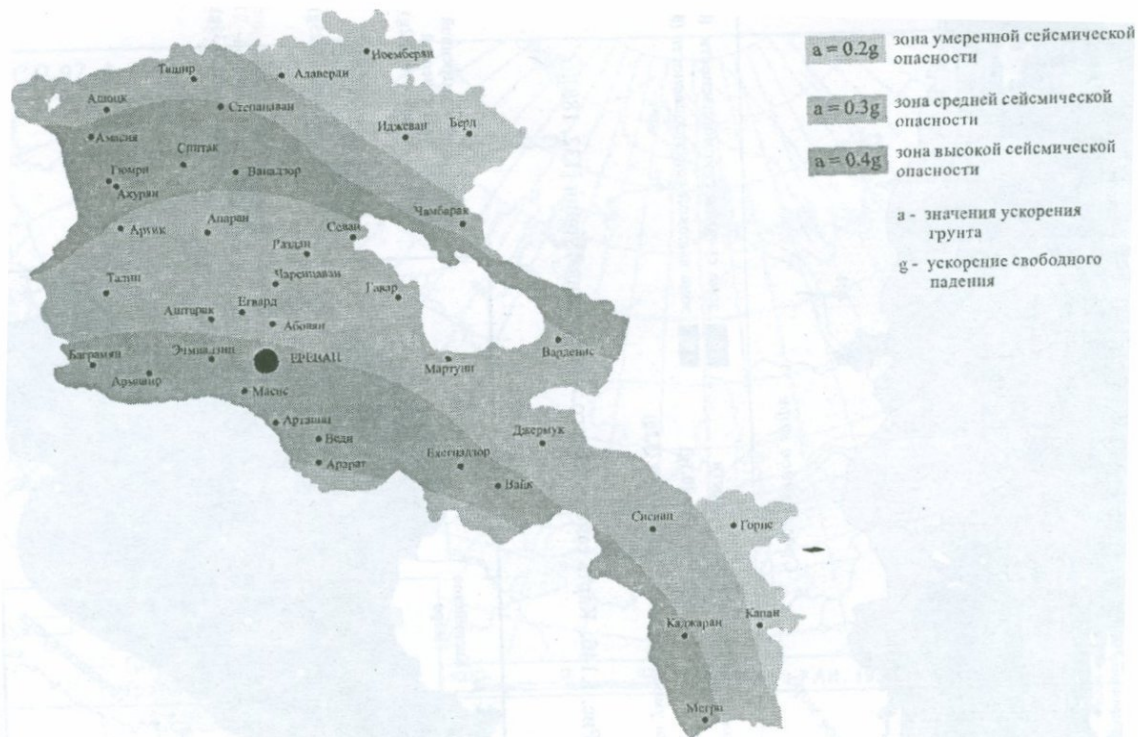
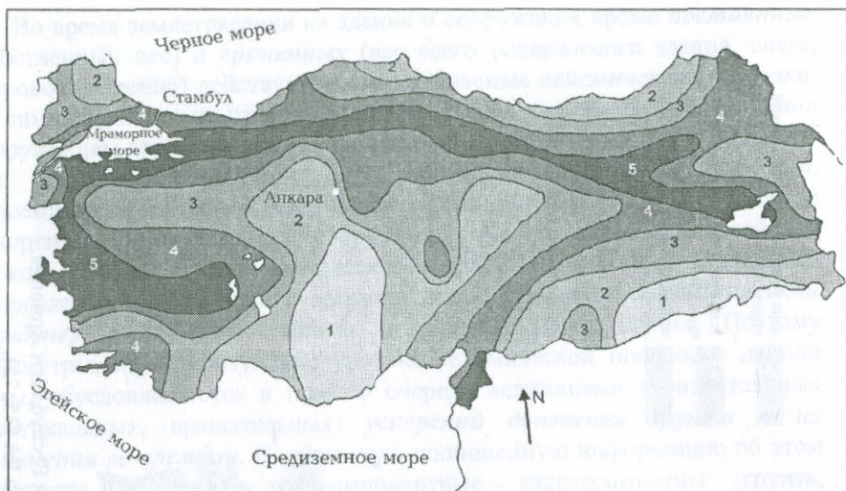


Рис. 1.14а. Карта сейсмического зонирования территории Республики Армения, согласно Нормам сейсмостойкого строительства РА [35, 75].



- |                                         |                                       |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 зона отсутствия сейсмоопасности       | 4 зона средней сейсмоопасности (0.3g) |
| 2 зона низкой сейсмоопасности (0.1g)    | 5 зона высокой сейсмоопасности (0.4g) |
| 3 зона умеренной сейсмоопасности (0.2g) |                                       |

Рис. 1.14б. Карта сейсмического зонирования Турции [132, 188].

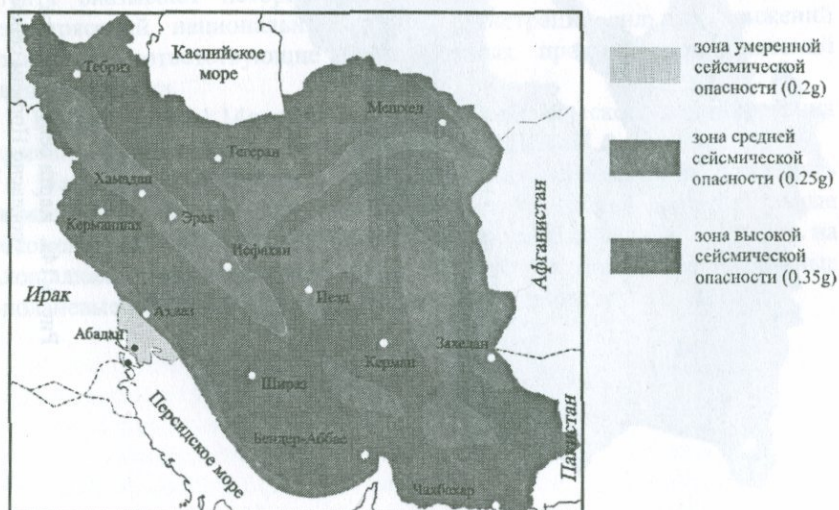


Рис. 1.14в. Карта сейсмического зонирования Ирана [150].



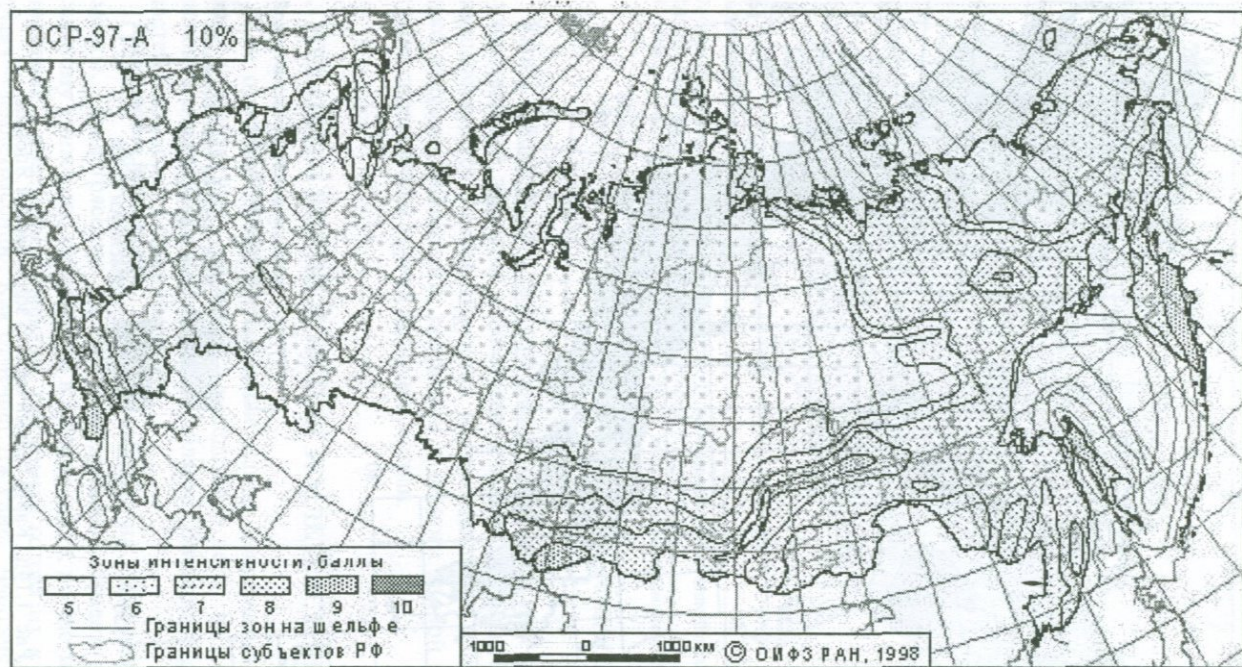


Рис. 1.14г. Карта сейсмического районирования России [86].

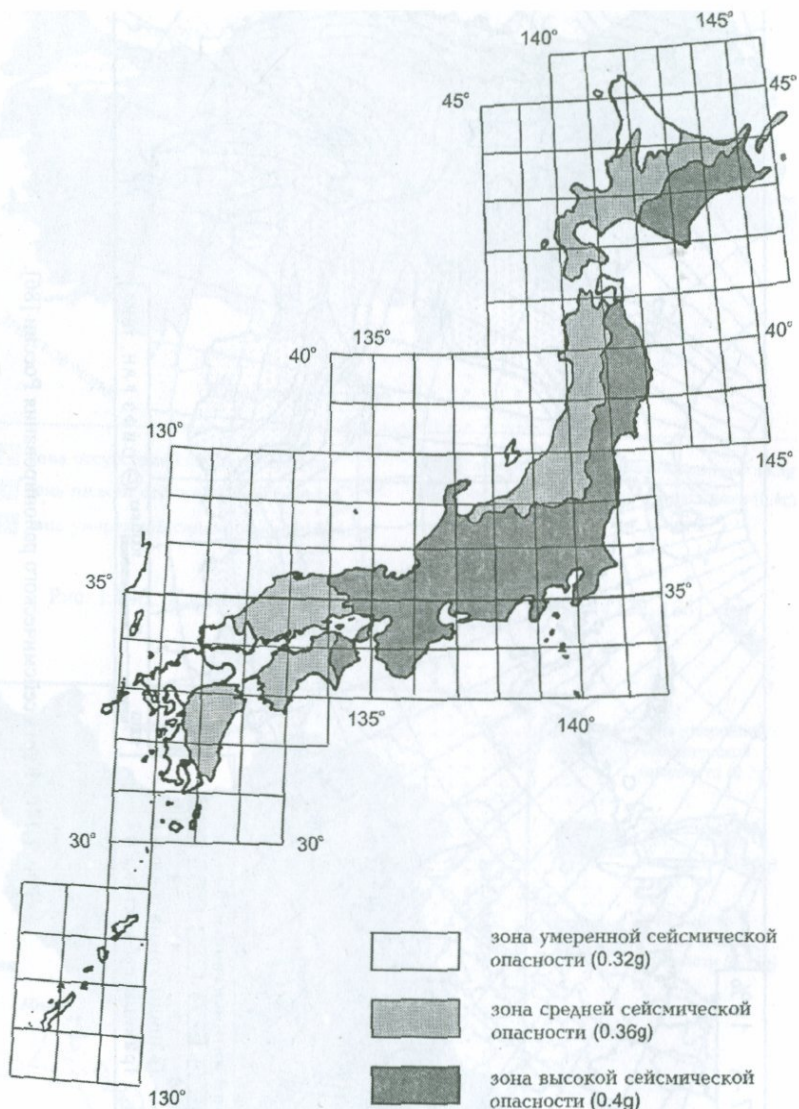
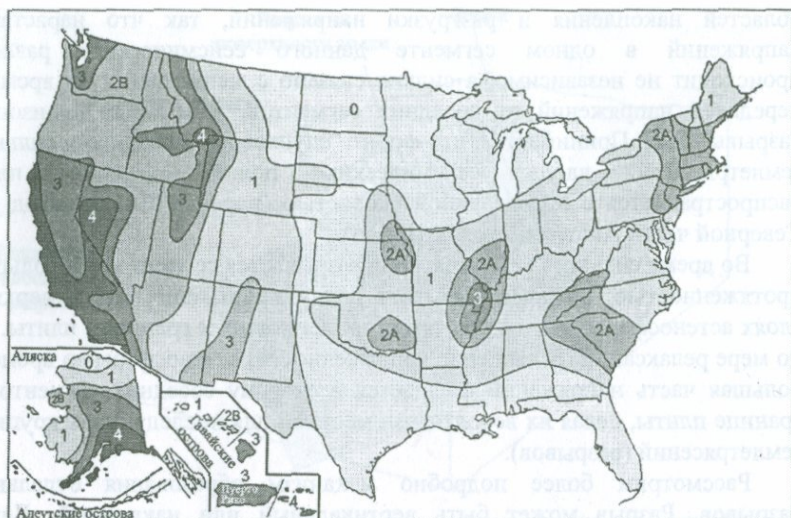


Рис. 1.14д. Карта сейсмического зонирования Японии.





0 - зона отсутствия сейсмической опасности, 1 - зона низкой сейсмической опасности (0.075g), 2A, 2B - зона умеренной сейсмической опасности (0.15g и 0.2g), 3 - зона средней сейсмической опасности (0.3g), 4 - зона высокой сейсмической опасности (0.4g)

Рис. 1.14е. Карта сейсмического зонирования США [212].

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.

#### 1.4. 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" [63]. 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 вспоровшейся 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.1.5).

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 *эпицентральной 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.1.16). 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.



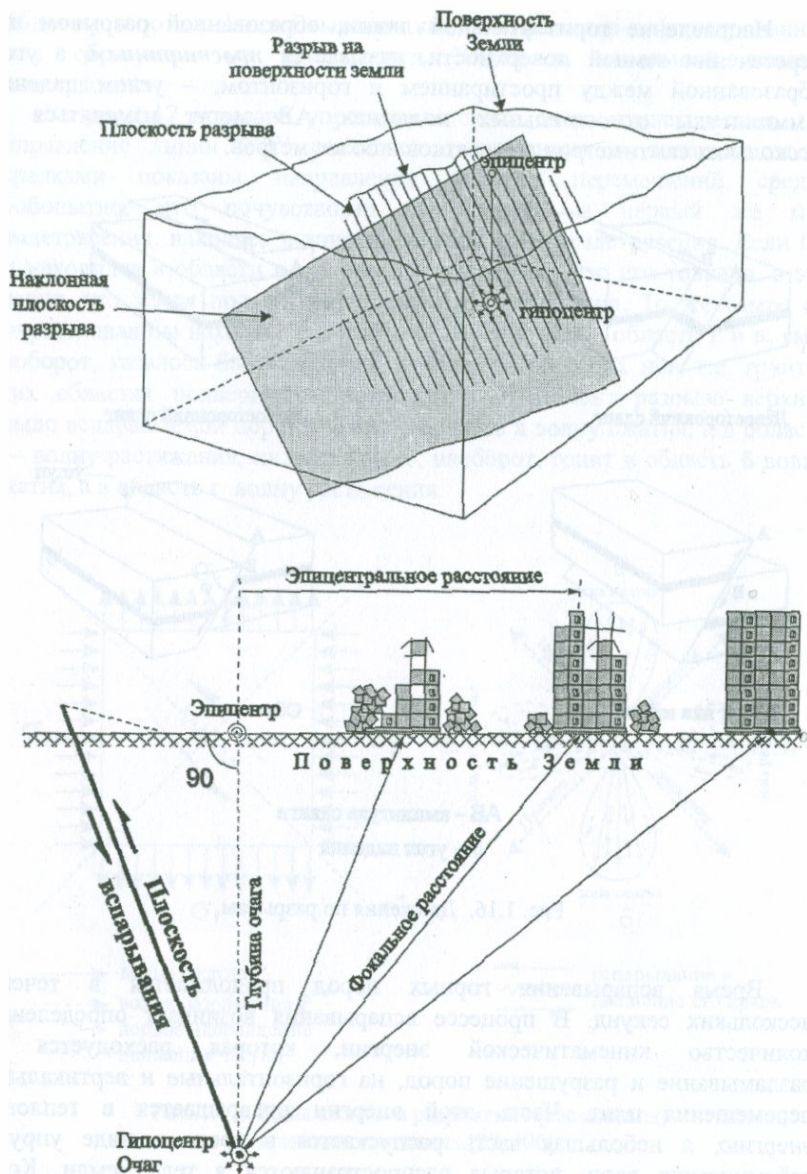
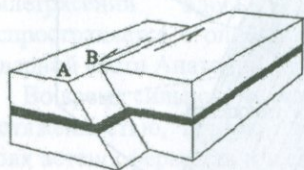
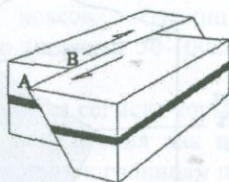


Рис. 1.15. Характерные параметры землетрясения.

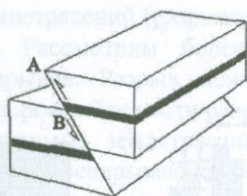
Направление горизонтальной линии, образованной разрывом при пересечении земной поверхности, называется *простиранием*, а угол, образованной между простиранием и горизонтом, – *углом падения*. Амплитуды относительных подвижек АВ могут измеряться от нескольких сантиметров до десятков и более метров.



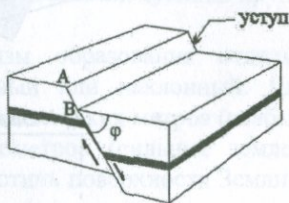
Левосторонний сдвиг



Правосторонний сдвиг



Надвиг или взброс



Сброс

АВ - амплитуда сдвига

φ - угол падения

Рис. 1.16. 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.

На рис.1.17 показана упрощенная схема очага землетрясения, где направление линии  $0'0''$  совпадает с направлением вспарывания, а стрелками показаны направления упругих перемещений среды. Любопытно, 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.

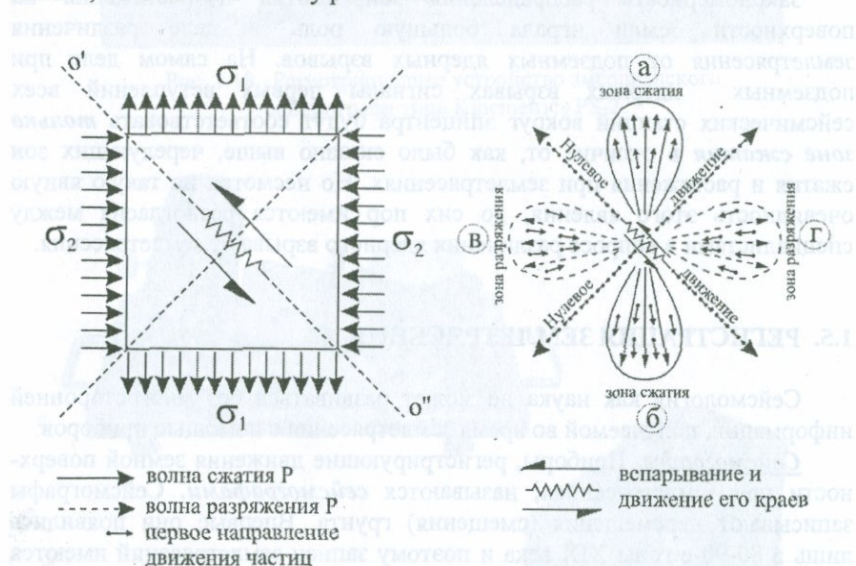


Рис. 1.17. Зоны сжатия и разряжения (растяжения) при землетрясениях [29, 106].

Таким образом, эпицентральной зону можно разделить на четыре диагонально расположенные зоны, в двух из которых первым вступает *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 привлекать 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.

## 1.5. РЕГИСТРАЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

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, регистра и записывающего устройства* (пера). *Регистр* (рис.1.18) – это обыкновенный барабан с фоточувствительной бумагой, завернутой на его внешней поверхности. Барабан вращается вокруг своей оси с постоянной скоростью.



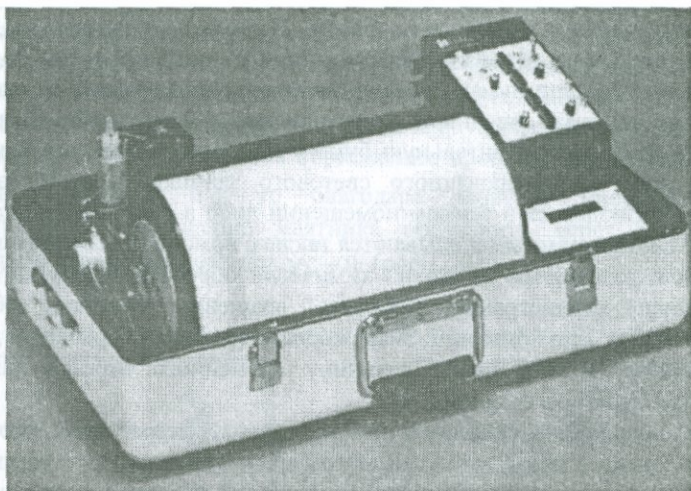


Рис. 1.18. Регистрирующее устройство американского сейсмографа типа Kinemetrics PS-2.

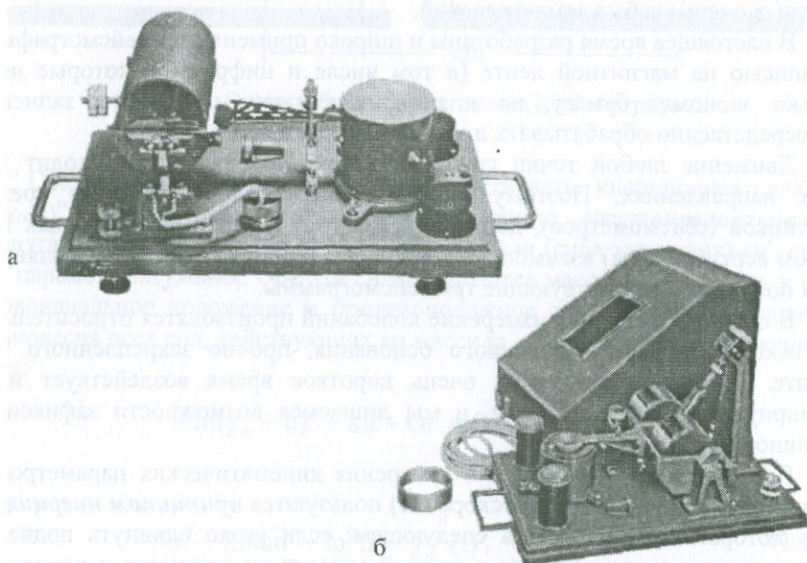


Рис. 1.19. Японский электромагнитный сейсмограф HES фирмы Akashi.

а. HES-H горизонтальный

б. HES-Z вертикальный.

Записывающее устройство — это *перо*, которое под прямым углом касается поверхности барабана, после каждого оборота которого сдвигается вперед с постоянным шагом. Если нет землетрясения, перо оставляет на бумаге барабана прямые линии с постоянным расстоянием между ними. Раньше бумаги делали из закопченного листа, на которой запись прочерчивало специальное острое перо. В дальнейшем начали использовать фоточувствительную бумагу или фотопленку, а в качестве пера — резко сфокусированного светового зайчика. Поэтому запись должна производиться в темном помещении либо в светонепроницаемом футляре. Сейсмограммы записываются также с помощью обычного пера и чернил или разогретым пером на химически обработанной бумаге, как при записи кардиограмм. Скорость вращения барабана обычно принимается от 7 до 60 мм/мин. Зная скорость вращения барабана и длину его диаметра, можно найти величину временного отрезка каждого сантиметра бумаги (в секундах).

Так как величины смещений при реальных землетрясениях, особенно слабых, очень малы, в сейсмографах применяются различные механические и оптические приспособления для увеличения результатов записей. В современных сейсмографах коэффициенты увеличения достигают до 100000. Обычно сейсмографы с большим коэффициентом увеличения используются для записи слишком дальних сильных и местных очень слабых землетрясений.

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 (сейсмометров), 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 вислячего 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.



Теперь рассмотрим закономерности движения маятника сейсмографа во время землетрясения. Допустим, что грунт, на котором жестко прикреплен сейсмограф, переместился на расстояние  $y_0(t)$  (рис.1.20). Так как инертная масса  $m$  маятника покоится на пружине с жесткостью  $k$  (сила необходимая для единичного сжатия или растяжения пружины), и присоединена к специальному устройству, тормозящему движение маятника (принимаям, что сила торможения пропорциональна скорости движения маятника  $u'$ ), то благодаря свойству инерции, если относительное перемещение маятника обозначить через  $u$ , то его абсолютное перемещение будет  $y_0 - u$  (рис.1.20).

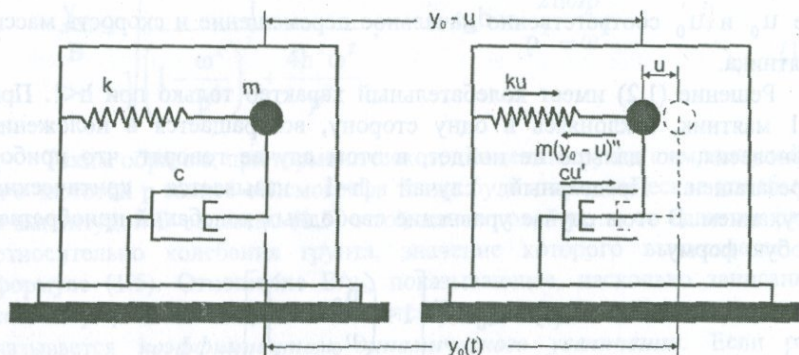


Рис. 1.20. Схема работы горизонтального сейсмографа.

Следовательно, на массу  $m$  будут действовать: инерционная сила -  $m(y_0 - u)''$ , направленная против движения грунта, *восстанавливающая* (упругая) сила пружины  $ku$  и *тормозящая* сила (сила затухания)  $cu'$ , где  $c$  – параметр затухания. Обе эти силы стараются массу  $m$  вернуть в ее первоначальное положение и противоположные силе инерции. Условие равновесия всех сил, действующих на массу  $m$ , в любой момент движения даст:

$$-m(y_0 - u)'' + ku + cu' = 0$$

или

$$u'' + 2h\omega u' + \omega^2 u = y_0''(t), \quad (1.1)$$

где  $\omega^2 = k/m$  – круговая частота свободных колебаний маятника,  $2h = c/m\omega$  – коэффициент критического затухания сейсмографа,  $T_c = 2\pi/\omega$  – период свободных колебаний маятника сейсмографа.

Если в уравнении (1.1) принимать  $y_0=0$ , получим уравнение свободных колебаний маятника, решение которого будет иметь вид:

$$u(t) = Ae^{-h\omega t} \sin(\sqrt{1-h^2}\omega t + \lambda), \quad (1.2)$$

где  $A$  и  $\lambda$  - постоянные интегрирования и определяются из начальных условий. С учетом начальных условий (1.2) примет вид:

$$u(t) = e^{-h\omega t} \left[ u_0 \cos \omega \sqrt{1-h^2} t + \frac{\dot{u}_0 + h\omega u_0}{\omega \sqrt{1-h^2}} \sin \omega \sqrt{1-h^2} t \right], \quad (1.2a)$$

где  $u_0$  и  $\dot{u}_0$  соответственно начальное перемещение и скорость массы маятника.

Решение (1.2) имеет колебательный характер только при  $h < 1$ . При  $h > 1$  маятник, отклоняясь в одну сторону, возвращается в положение равновесия, но дальше не пойдет, в этом случае говорят, что прибор перезагашен. Предельный случай  $h=1$  называется критическим затуханием. В этом случае уравнение свободных колебаний приобретает особую форму

$$u(t) = u_0 e^{-\omega t} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{u}_0}{u_0} + \omega \right) t \right].$$

Теперь допустим, что колебание грунта во время землетрясения имеет простой гармонический характер:

$$y_0(t) = y_0 \sin pt, \quad (1.3)$$

где  $p$  - круговая частота колебания грунта,  $T_0=2\pi/p$  - период вынужденных колебаний грунта и  $y_0$  - амплитуда этих колебаний. В сущности предназначение сейсмографа для воспроизведения записи этих колебаний в определенном масштабе.

Решение дифференциального уравнения (1.1) в этом случае представляется в виде:

$$u(t) = Ae^{-h\omega t} \sin(\sqrt{1-h^2}\omega t + \lambda) + B \sin(pt+b). \quad (1.4)$$

Первый член уравнения (1.4), благодаря затуханию  $h$ , быстро стремится к нулю, поэтому общее решение (1.4) в дальнейшем можно представить в виде:

$$u(t) = B \sin(pt+b). \quad (1.4a)$$



Что касается постоянных  $B$  и  $b$ , то, подставляя (1.4а) в основное уравнение (1.1) и приравнявая коэффициенты при функциях  $\sin pt$  и  $\cos pt$  в правых и левых частях уравнения, получим два уравнения относительно неизвестных  $B$  и  $b$ :

$$(\omega^2 - p^2) \cos b - 2h\omega p \sin b = \frac{y_0 p^2}{B}$$

$$(\omega^2 - p^2) \sin b + 2h\omega p \cos b = 0.$$

Из этих уравнений легко получить:

$$\frac{y_0}{B} = \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + \frac{4h^2 \omega^2}{p^2}}}, \quad \operatorname{tg} b = \frac{2h\omega p}{p^2 - \omega^2}. \quad (1.5)$$

Таким образом, при гармоническом движении грунта с амплитудой  $y_0$  и с частотой  $p$  запись сейсмографа также будет гармоническое колебание с амплитудой  $B$  согласно (1.5) с той же частотой  $p$ , но со сдвигом фаз  $b$  относительно колебания грунта, значение которого вычисляется по формуле (1.5). Отношение  $B/y_0$ , показывающее, насколько записанная сейсмографом амплитуда отличается от реальной амплитуды грунта, называется *коэффициентом динамического увеличения*. Если  $p = \omega$  (резонанс), то

$$B/y_0 = 1/2h.$$

Следовательно, если значение  $h$  очень большое, то коэффициент увеличения будет небольшим. Поэтому в первоначальном периоде производства сейсмографов их сознательно сконструировали с меньшим коэффициентом затухания  $h$ , но в этом случае записи (сейсмограммы) получились сильно искаженными (влияние первого члена уравнения (1.4) оказалось заметным).

На рис.1.21 построены зависимости  $B/y_0$  и  $b$  от отношения периодов колебания грунта  $T_0$  и собственного колебания сейсмографа  $T_c$  ( $T_0/T_c$  или  $\omega/p$ ) для различных значений  $h$ , которые соответственно называются амплитудно-частотными и фазовыми характеристиками сейсмографа.

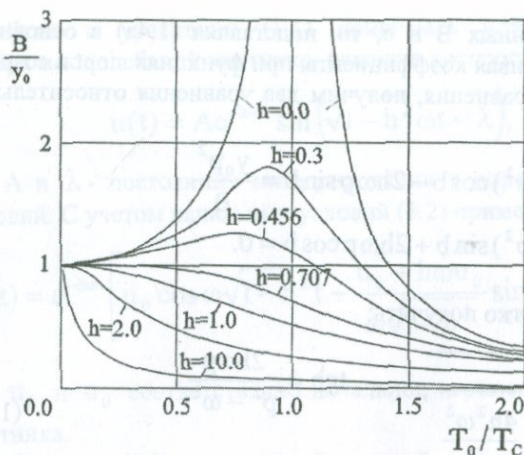
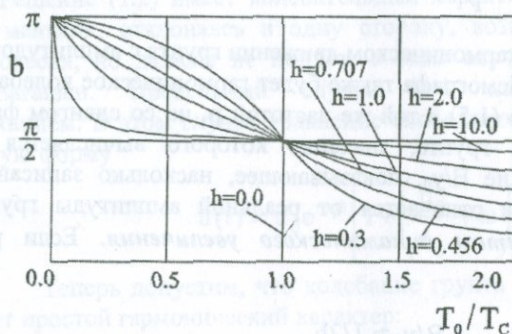


Рис. 1.21.  
Амплитудно-  
частотные спектры  
колебаний [67].



Таким образом, сейсмограф имеет следующие основные параметры:

- период свободных колебаний маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \frac{1}{\sqrt{1-h^2}},$$

- постоянная затухания  $h$  или отношение двух противоположно направленных соседних амплитуд при свободных колебаниях маятника

$$\varepsilon = e^{\frac{-\pi h}{\sqrt{1-h^2}}},$$

- коэффициент статического увеличения  $\nu$ , который вводится при конструировании сейсмографа. Это значит, что если отклонить маятник на величину  $u$  и оставить его в таком положении, то перо или луч света на записи (сейсмограмме) отклонится на величину  $u\nu$ .



Следовательно, если в грунте происходят простые гармонические колебания с амплитудой  $y_0$  и периодом  $T_0$ , то колебание маятника будет происходить с тем же периодом  $T_0$  и амплитудой  $B$ , а запись на сейсмограмме — с периодом  $T_0$  и амплитудой  $\nu B$ .

Так как сейсмограф предназначен для записи любого землетрясения, независимо от амплитуды и периода колебаний грунта, *коэффициенты его статического и динамического увеличения* должны быть постоянными независимо от параметров колебания грунта  $y_0$  и  $T_0$ .

В частности, из уравнения (1.5) при  $h=0$ , имеем:

$$\frac{B}{y_0} = \frac{T_c^2}{T_c^2 - T_0^2}. \quad (1.6)$$

Следовательно, чем больше период свободных колебаний маятника  $T_c$ , тем лучше, так как в этом случае

$$B/y_0 \rightarrow 1,$$

т.е. запись сейсмографа будет пропорциональна перемещению грунта  $y_0$ . Для случаев  $h \neq 0$ , исходя из рис.1.21, можно отделить то максимальное значение  $T_c$ , при котором можно будет записать колебания грунта с разными  $T_0$ , по одинаковым динамическим коэффициентам  $B/y_0$ . Как видно из рис.1.21, при  $h=0.707$  отношение  $B/y_0$  почти равно 1 до значения  $T_0/T_c \leq 0.5$ сек. Это означает, что если период свободных колебаний сейсмографа  $T_c=1$ сек, то для землетрясений с периодом колебания грунта  $T_0$  до  $T_0=0.5 \cdot 1=0.5$ сек и меньше все отношения  $B/y_0$  будет одинаковыми. Если же сейсмограф имеет период  $T_c=5$ сек, то он будет идентичным для всех землетрясений с периодом колебания грунта  $T_0=0.5 \cdot 5=2.5$ сек и ниже. Таким образом, для данного параметра затухания  $h$  чем больше период свободных колебаний  $T_c$ , тем сейсмограф обладает идентичностью для записи землетрясений с большим диапазоном периодов колебания грунта.

Землетрясение не простое гармоническое движение типа

$$y_0 \sin \frac{2\pi}{T_0} t.$$

В общем случае, согласно теореме Фурье, любое сложное движение грунта можно представить в виде суммы множества таких простых гармонических движений:

$$\sum y_{oi} \sin \left( \frac{2\pi}{T_{oi}} t + b_i \right).$$

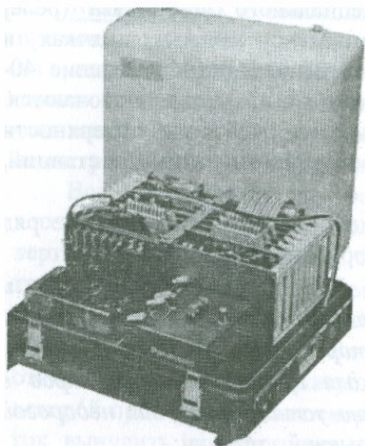
Так как сейсмограф все гармоники записывает одновременно и их суммирует, то при соблюдении вышеуказанных условий равенства коэффициентов динамического и статического увеличения для *всех вероятных гармоник* движения грунта в нем (сейсмографе) автоматически осуществляется гармонический анализ и суперпозиция движений.

Как видим, запись землетрясения довольно сложное дело. Она еще не достигло своего полного совершенства и требует постоянного внимания, чтобы для каждого прибора были правильно определены его параметры  $T_c$ ,  $h$  и  $v$ . Кроме этого, силы затухания должны быть строго пропорциональны скорости движения маятника  $u'$ , что тоже нелзякая техническая задачая. Поэтому постоянное регулирование работы сейсмографа и его таррировка являются первоочередной задачей работников сейсмических станций.

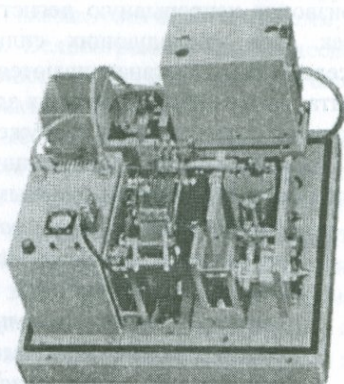
Современные сейсмографы имеют большую чувствительность. Коэффициенты их увеличения доходят до 100000 раз. Они могут записывать землетрясения, происходящие на сколь угодно большом расстоянии от места регистрации. Все сейсмографы настроены на непрерывный режим работы. Однако они «зашкаливают» при близких 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, как видим дальше, 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.1.22). 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.

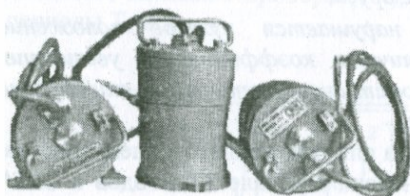




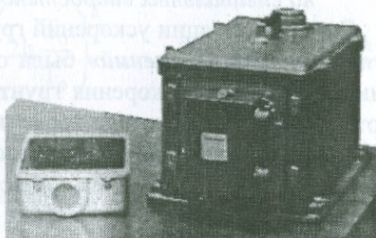
а. SMA-16 (три компонента)  
 $T_c = 0.02$  сек,  $h = 0.70$ ,  $y''_0 = 2g$   
 (Kinemetrics)



б. SMAC - E (три компонента)  
 $T_c = 0.05$  сек,  $h = 0.60$ ,  $y''_0 = 1g$   
 (Akashi)



в. ОСП-2 (одна компонента)  
 $T_c = 0.16$  сек,  $h = 0.135$   
 (Гюмри, Армения)



г. ССРЗ (три компонента)  
 $T_c = 0.05$  сек,  $h = 0.60$   
 (ИФЗ, Москва)

Рис. 1.22. Образцы распространенных акселерографов.

Кроме того, они при помощи специального устройства (реле) автоматически срабатывают при сравнительно сильных толчках и производят непрерывную регистрацию ускорения грунта в течение 40-50сек. 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.

Акселерографы, работающие в «ждущем» режиме, имеют ряд неудобств и недостатков, главными из которых являются:

- *отсутствие записи начальной фазы сотрясения грунта и вследствие этого отсутствие возможности фиксации времени начала землетрясения (в некоторых случаях для фиксации времени начала землетрясения для группы акселерографов в одном участке параллельно можно установить один недорогой контрольный сейсмограф с непрерывной записью);*
- *если порог интенсивности включения очень чувствительный, акселерограф может включаться в работу не только от землетрясения, но и от случайных или искусственных источников сотрясения грунта, вследствие чего ресурсы акселерографа (бумага) во время настоящего толчка могут быть исчерпаны;*
- *при регистрации ускорений грунта и разных уровней сооружения на одной ленте (бумаге) возникает ряд неудобств, так как их амплитуды перекрывают друг друга;*
- *часто до землетрясения нарушается нулевое положение записывающего пера и величина коэффициента увеличения прибора. Поэтому они подлежат систематической таррировке на специальных вибростендах.*

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 1933г). 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 200км от эпицентра землетрясения. Для инженеров-строителей такие записи представляют огромную ценность. Они способствуют совершенствованию методов расчета сооружений на сейсмические воздействия и нормативных документов по сейсмостойкому строительству.



**Велисографы.** В сейсмологии кроме сейсмографов и акселерографов применяются также приборы, записывающие скорости движения грунтов во время землетрясения. Такие приборы называются **велисографами**, а их запись — **велисограмма** землетрясения. Велисограммы землетрясения в основном используются для уточнения интенсивности (в баллах) землетрясения и его энергетической характеристики.

Все современные электромагнитные сейсмографы, велисографы и акселерографы, предназначенные для записи горизонтальных и вертикальных перемещений, скоростей и ускорений грунта, состоят из трех основных элементов: мощного постоянного магнита, инертной массы, закрепленной на пластинчатой пружине и из индукционной катушки вокруг массы. Во время землетрясения масса движется относительно магнита, в катушке генерируется электрический ток, сила которой пропорциональна скорости движения инертной массы. Если этот ток вынудить пройти через гальванометр, то можно осуществить его фотозапись с помощью зеркала гальванометра. Первый сейсмограф, основанный на этом принципе, был разработан Б.Б.Голицыным в 1906 году.

**Отличительные параметры приборов.** Теперь рассмотрим следующую виртуальную задачу: какими параметрами должен обладать такой прибор, чтоб он служил в качестве сейсмографа, велисографа или акселерографа.

Для этого обратимся к выражению (1.5) общего решения уравнения движения маятника прибора (1.4), заменим в нем частоты  $\omega$  и  $p$  через периоды  $T_c$  и  $T_0$ :

$$\frac{|u|}{y_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{T_0}{T_c}\right)^2\right]^2 + \left(2h \frac{T_0}{T_c}\right)^2}}, \quad (1.7)$$

где  $|u|$  — модуль амплитуды  $B$ , записанной прибором,  $y_0$  — амплитуда колебания грунта. Так как между перемещением, скоростью и ускорением грунта имеют место соотношения:

$$v_0 = \frac{2\pi}{T_0} y_0, \quad a_0 = \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 y_0,$$

где  $y_0$ ,  $v_0$ ,  $a_0$  и  $T_0$  соответственно перемещение, скорость, ускорение и период колебания грунта, то уравнение (1.7) можно переписать и в следующих видах:

$$\frac{|u|}{v_0} = \frac{\frac{T_0}{2\pi}}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_0^2}{T_c^2}\right)^2 + \left(2h \frac{T_0}{T_c}\right)^2}}, \quad (1.8)$$

$$\frac{|u|}{a_0} = \frac{\left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_0^2}{T_c^2}\right)^2 + \left(2h \frac{T_0}{T_c}\right)^2}}. \quad (1.9)$$

Формулы (1.7), (1.8) и (1.9) позволяют ответить на поставленный вопрос. Как было отмечено выше, единственное условие для идентичности прибора это постоянство правых частей уравнений (1.7), (1.8) и (1.9) для землетрясений с различными периодами колебания грунта  $T_0$ . Основные параметры при конструировании прибора – это период свободных колебаний маятника  $T_c$  и коэффициента затухания  $h$ .

Следовательно, для того, чтобы прибор служил сейсмографом, значения  $T_c$  и  $h$  необходимо так выбирать, чтобы правая часть уравнения (1.7) при всех ожидаемых значениях периода колебания грунта  $T_0$  была постоянна. Рассуждая аналогичным образом, можно констатировать, что для того чтобы прибор служил в качестве велесографа или акселерографа правые части уравнений (1.8) и (1.9) при всех ожидаемых  $T_0$  должны быть постоянными величинами.

В табл. 1.2 приведены значения правых частей уравнений (1.7), (1.8) и (1.9) при различных значениях коэффициента затухания  $h$  и *ожидаемых периодах колебания грунта  $T_0$  в диапазоне от 0.05 до 2.0 сек*, а на рис.1.23 показаны их графические зависимости.

Как видно из таблицы и графиков, чтобы регистрирующий прибор служил в качестве сейсмографа для записи землетрясений с периодами колебания грунта в диапазоне  $0 < T_0 \leq 2.0$  сек период свободных колебаний его маятника  $T_c$  должен быть равным 5.0 сек и больше, а коэффициент затухания около  $h=0.5$ . А для велесографа оптимальными являются  $T_c \geq 0.5$  сек,  $h=2.0$ . Что касается акселерографа, то, как видно из таблицы и графиков, для идентичной записи ускорения грунта с периодами  $0.05 < T_0 \leq 2$  период его собственных колебаний должен быть меньше, чем 0.1 сек, а  $h=0.25$ . Таким образом, чем больше период свободных колебаний маятника прибора, тем лучше он пригоден в качестве сейсмографа, и, наоборот, акселерограф должен иметь период собственных колебаний маятника не более чем 0.1 сек.



Таблица 1.2

| Период колебания<br>грунта $T_0$ в сек. | Сейсмограф<br>$T_c=1.0$ сек. |         |         | Сейсмограф<br>$T_c=5.0$ сек. |         |         | Велисограф<br>$T_c=0.5$ сек. |         |         | Акселеро-<br>граф<br>$T_c=0.1$ сек. |         |
|-----------------------------------------|------------------------------|---------|---------|------------------------------|---------|---------|------------------------------|---------|---------|-------------------------------------|---------|
|                                         | $u/y_0$                      |         |         | $u/y_0$                      |         |         | $u/v_0$                      |         |         | $u/a_0 \cdot 10^{-3}$               |         |
|                                         | $h=0.25$                     | $h=0.5$ | $h=1.0$ | $h=0.25$                     | $h=0.5$ | $h=1.0$ | $h=0.5$                      | $h=1.0$ | $h=2.0$ | $h=0.25$                            | $h=0.5$ |
| 0.05                                    | 1.002                        | 1.001   | 0.997   | 1.000                        | 1.000   | 0.999   | 0.007                        | 0.007   | 0.007   | 0.08                                | 0.07    |
| 0.1                                     | 1.004                        | 1.004   | 0.990   | 1.000                        | 1.000   | 0.999   | 0.016                        | 0.015   | 0.012   | 0.51                                | 0.25    |
| 0.2                                     | 1.004                        | 1.019   | 0.961   | 1.000                        | 1.000   | 0.998   | 0.034                        | 0.027   | 0.017   | 0.32                                | 0.28    |
| 0.4                                     | 1.158                        | 1.074   | 0.862   | 1.000                        | 1.003   | 0.993   | 0.048                        | 0.038   | 0.019   | 0.26                                | 0.26    |
| 0.6                                     | 1.414                        | 1.139   | 0.735   | 1.012                        | 1.007   | 0.985   | 0.074                        | 0.039   | 0.019   | 0.26                                | 0.25    |
| 0.8                                     | 1.826                        | 1.139   | 0.609   | 1.022                        | 1.012   | 0.975   | 0.056                        | 0.035   | 0.019   | 0.25                                | 0.25    |
| 1.0                                     | 2.000                        | 1.00    | 0.500   | 1.036                        | 1.019   | 0.961   | 0.044                        | 0.031   | 0.018   | 0.25                                | 0.25    |
| 1.2                                     | 1.344                        | 0.782   | 0.409   | 1.052                        | 1.028   | 0.945   | 0.035                        | 0.028   | 0.018   | 0.25                                | 0.25    |
| 1.4                                     | 0.841                        | 0.589   | 0.337   | 1.072                        | 1.038   | 0.927   | 0.030                        | 0.025   | 0.017   | 0.25                                | 0.25    |
| 1.6                                     | 0.570                        | 0.447   | 0.280   | 1.095                        | 1.049   | 0.907   | 0.025                        | 0.022   | 0.016   | 0.25                                | 0.25    |
| 1.8                                     | 0.414                        | 0.347   | 0.235   | 1.126                        | 1.061   | 0.885   | 0.022                        | 0.020   | 0.015   | 0.25                                | 0.25    |
| 2.0                                     | 0.316                        | 0.277   | 0.200   | 1.158                        | 1.074   | 0.862   | 0.020                        | 0.018   | 0.014   | 0.25                                | 0.25    |

Период свободных колебаний современных сейсмографов доходит до  $T_c=10.0$ сек, и они способны регистрировать самые ничтожные колебания грунта с амплитудой до 0.001мм, а акселерографы имеют период  $T_c=0.01$ сек и могут регистрировать очень мощные землетрясения с ускорением колебания грунта до 2g.

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, доходящие до нескольких сантиметров.

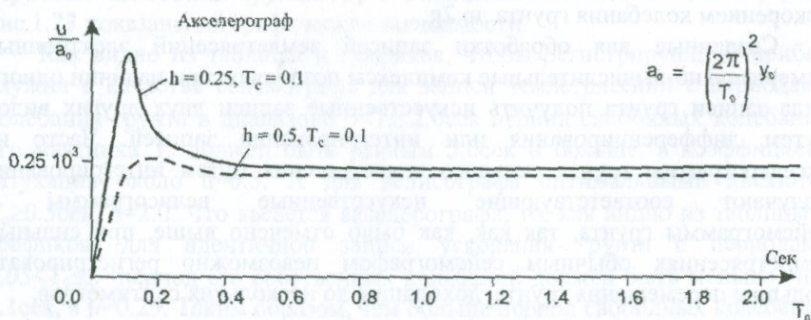
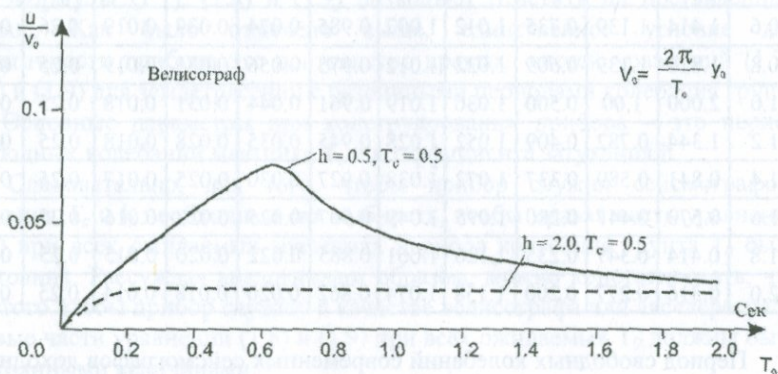
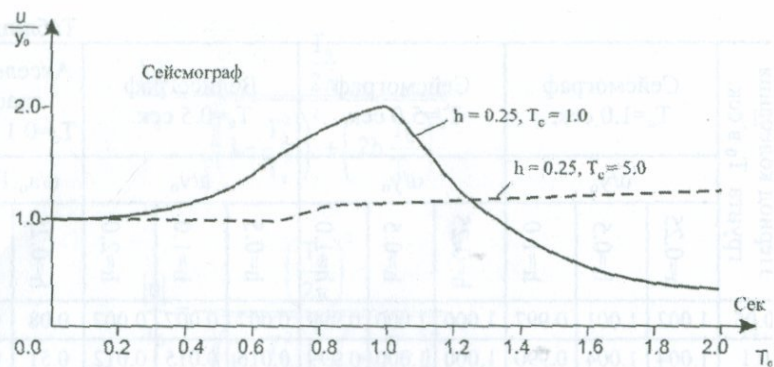


Рис. 1.23. Зависимости между параметрами прибора и периодами колебания грунта. Пунктиром показаны приемлемые для данного прибора варианты.



На рис.1.24 показана сейсмограмма землетрясения средней интенсивности, а на рис.1.25 акселерограммы двух сильных землетрясений и полученные от них путем интегрирования искусственные велисограммы и сейсмограммы землетрясений.

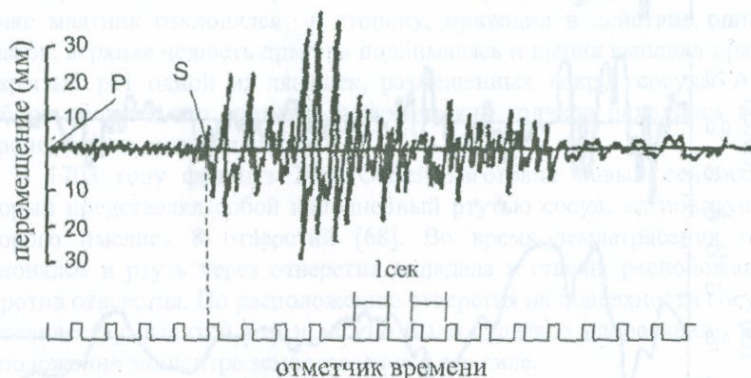


Рис. 1.24. Сейсмограмма землетрясения средней силы.

**Сейсмоскопы, сейсмометры, деформометры.** Кроме выше описанных приборов для записи кинематических параметров грунта при землетрясениях в сейсмологии в разные периоды ее развития принимались более простые приборы (сейсмоскопы, сейсмометры) с меньшими хлопотами, связанными с их обслуживанием и эксплуатацией.

Они часто с помощью механических приспособлений регистрировали какой-нибудь параметр, характеризующий наибольший эффект землетрясения, без отметки времени начала землетрясения и его конца. Показания таких сейсмоскопов значительно способствуют усилиям специалистов по оценке интенсивности происшедшего землетрясения и уровня его воздействия на сооружения. В последние десятилетия в связи с широким проникновением в измерительную науку методов компьютерной и электронной техники производство и применение сейсмоскопов сильно снизилось, однако для полного представления истории развития методов регистрации землетрясения приведем краткую хронологию создания сейсмоскопов.

Еще в древности людей интересовал вопрос, как регистрировать землетрясение. Первый прибор для регистрации землетрясения изобрел китаец Чжан Хен в 132г. [110].

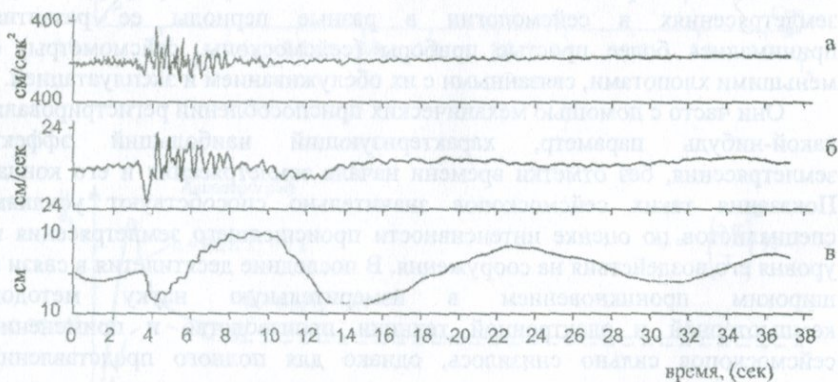
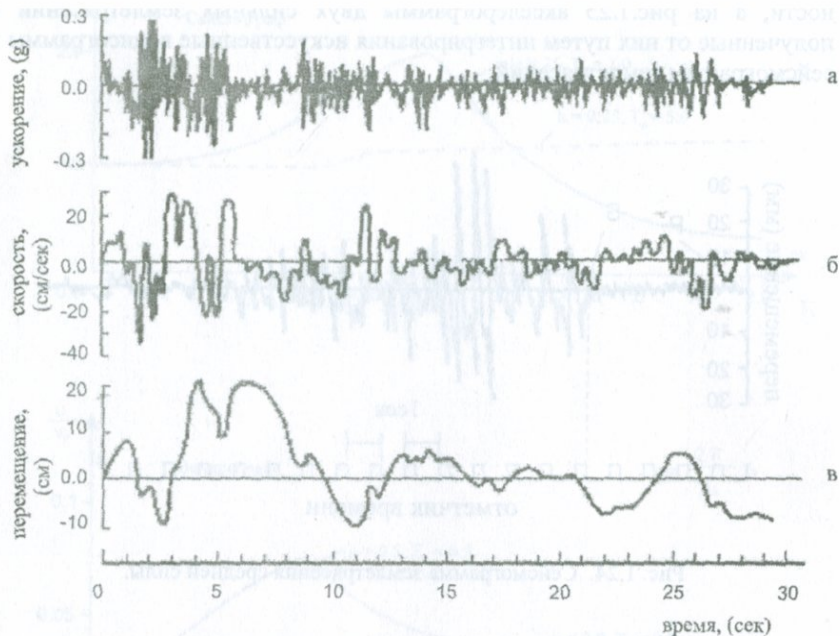


Рис. 1.25. Акселерограммы сильных землетрясений (а) и полученные от них путем интегрирования велесограммы (б) и сейсмограммы (в).



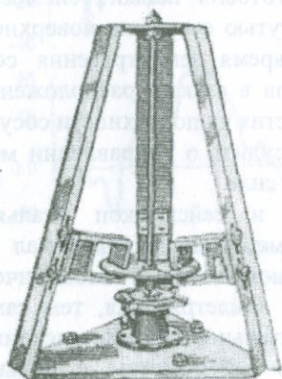
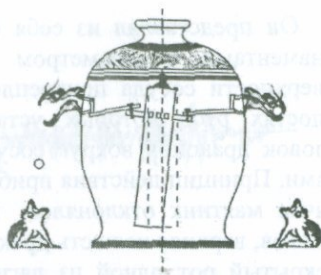
Он представлял из себя бочкообразный сосуд с художественными орнаментами с диаметром около 90см (рис.1.26а). На внешней поверхности сосуда прикреплены 8 символических головок дракона, в полостях ртов которых установлены по одному шарiku. Напротив головок драконов вокруг сосуда расположены 8 лягушек с открытыми ртами. Принцип действия прибора показан на рисунке. При сейсмическом толчке маятник отклонялся в сторону, приводил в действие один из рычагов, верхняя челюсть дракона поднималась и шарик выпадал прямо в раскрытый рот одной из лягушек, размещенных вокруг сосуда. Автор прибора полагал, что эпицентр сейсмических толчков находился в той стороне, откуда выпадал шарик.

В 1703 году француз Жан Отфей изготовил новый сейсмоскоп, который представлял собой наполненный ртутью сосуд, на поверхности которого имелись 8 отверстий [68]. Во время землетрясения сосуд наклонялся и ртуть через отверстия попадала в стакан, расположенный напротив отверстия. По расположению отверстия на поверхности сосуда и по количеству вылитой ртути можно было судить о направлении места расположения эпицентра землетрясения и его силе.

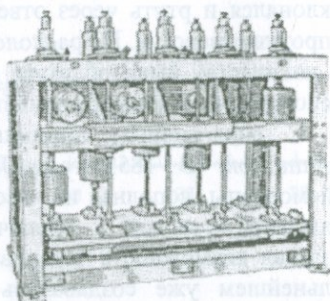
С аналогичным принципом работал и сейсмоскоп итальянца Каччиниори. В 1853 году Луиджи Пальмери совершенствовал эти сейсмоскопы, дополняя их часовым механизмом, который автоматически включался в начале и отключался в конце землетрясения, тем самым создавал возможность установить продолжительность землетрясения. В дальнейшем уже создавались маятниковые сейсмометры с большим периодом свободных колебаний (Милн, Омори, Вихерт), которые сыграли большую роль в деле изучения прошлых землетрясений. Из созданных в 50-х годах 20-го века сейсмометров следует выделить сейсмометр С.В.Медведева [45] и маятниковый сейсмометр А.Г.Назарова [54]. Сейсмометр С.В.Медведева – СБМ (сейсмометр балльности Медведева) представляет собой правильную трехгранную усеченную пирамиду высотой 62см и стороной основания 44 см (рис.1.26б). Главным элементом прибора является сферический упругий маятник, совершающий горизонтальные колебания при движении грунта во время землетрясения. Период свободных колебаний маятника  $T_c=0.25$ , коэффициент затухания – логарифмический декремент затухания 0.5 ( $h=0.08$ ). Прибор устанавливается непосредственно на свободном грунте или на грунте подвального этажа здания. Показания СБМ являются косвенными критериями для оценки интенсивности землетрясения по шкале MSK-64 (см.1.13, табл.1.5). Аналогичный американский сейсмоскоп Вилмота имеет период свободных колебаний  $T_c=0.75$ сек (рис.1.26г). А.Г.Назаровым совместно со своими сотрудниками были разработаны маятниковые сейсмометры АИС (Армянский институт сооружений) и ИГИС для непосредственного построения спектра реакции землетрясения без использования его акселерограммы (рис.1.26в).



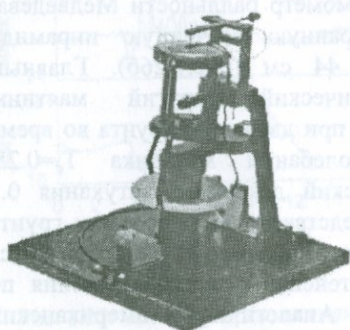
а. старейший китайский сейсмокоп



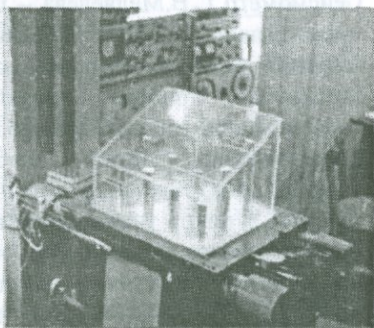
б. сейсмометр СВМ



в. сейсмометр типа АИС (ИГИС)



г. сейсмокоп Вилмота

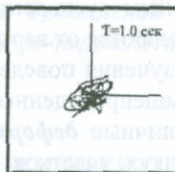
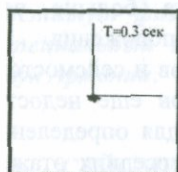
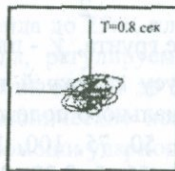
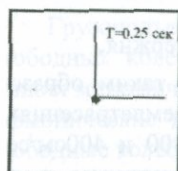
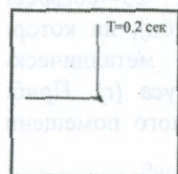
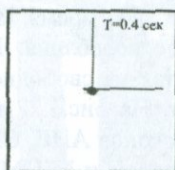
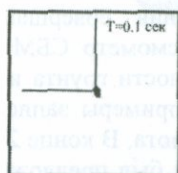


д. сейсмокоп, состоящий из 12 вертикальных цилиндров

Рис. 1.26. Сейсмокопы.



а.



б.



в.



Рис. 1.27. Примеры записей сейсмометров при землетрясениях.

- а. Запись Спитакского землетрясения 1988 года сейсмометром типа АИС на инженерно-сейсмометрической станции N1 г.Еревана АрмНИИСА (горизонтальные компоненты).
- б. Запись Спитакского землетрясения 1988 года сейсмометром СБМ на территории Института геофизики и инженерной сейсмологии в г.Ленинакане и в центральной части города.
- в. Запись землетрясения 1971 года в Сан-Фернандо сейсмоскопом Вилмота.

Сейсмометр снабжен серией упругих сферических горизонтальных и вертикальных маятников с различными периодами свободных колебаний от 0.05 до 1.2сек, которые во время землетрясения совершают горизонтальные и вертикальные колебания. Как и сейсмометр СБМ и сейсмометр АИС устанавливается на свободной поверхности грунта и в подвальном помещении здания. На рис.1.27 показаны примеры записи, полученные с помощью сейсмоскопов АИС, СБМ и Вилмота. В конце 20-го века Э.Е.Хачияном, А.М.Хачяном и М.Г.Мелкумянном был предложен новый экспресс-сейсмоскоп для установления величины максимального ускорения грунта при землетрясении в диапазоне 25-400см/сек<sup>2</sup>. Сейсмоскоп состоит из горизонтальной плиты (рис.1.26д), на которой свободно, изолированно друг от друга, стоят 9 металлических цилиндрических стержней разной высоты (h) и радиуса (r). Прибор жестко закрепляется на грунте или на грунте подвального помещения. Исходя из условия опрокидывания стержня:

$$a \frac{\pi r^2 h \gamma}{g} \cdot \frac{h}{2} \geq \pi r^2 h \gamma \cdot \frac{r}{2} \quad \text{или} \quad \frac{a}{g} \geq \frac{r}{h},$$

где  $a$  – максимальное ускорение грунта,  $\gamma$  – плотность стержня.

Отношения высот к радиусу стержней подобраны таким образом, чтоб они отклонялись от вертикального положения при землетрясениях с ускорением грунта равным 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300 и 400см/сек<sup>2</sup> (отношение  $h/r=40, 20, 133, 10, 66, 5, 3.33, 2.5$ ). Если, например, после землетрясения будут опрокинуты 4 стержня, это означает, что максимальное ускорение грунта было не больше чем 150см/сек<sup>2</sup>. При землетрясениях с максимальным ускорением грунта больше чем 400см/сек<sup>2</sup> все 9 стержней отклоняются от вертикального положения.

Для экспериментального изучения поведения грунтов и сейсмостойкости сооружения наличие вышеприведенных приборов еще недостаточно. Необходимы также различные **деформометры** для определения относительного перемещения двух участков грунта и соседних этажей зданий (перекос), остаточных деформаций в грунтах и в сооружениях, а также специальные приборы, определяющие давление подземных грунтовых вод и вод водохранилищ и плотин.

И наконец, отметим, что вышеуказанная вся сейсмологическая и инженерно-сейсмологическая аппаратура нуждается в систематической тарировке на специальных вибростендах, роль которых в деле обеспечения достоверности регистрации землетрясения нельзя недооценивать. Один из вариантов такого портативного вибростенда, разработанный АрмНИИ сейсмостойкого строительства (авторы М.Г.Хачиян, Э.Е.Хачиян, А.М.Хачян) и установленного во многих инженерно-сейсмометрических станциях бывшего СССР, показан на рис.1.28.



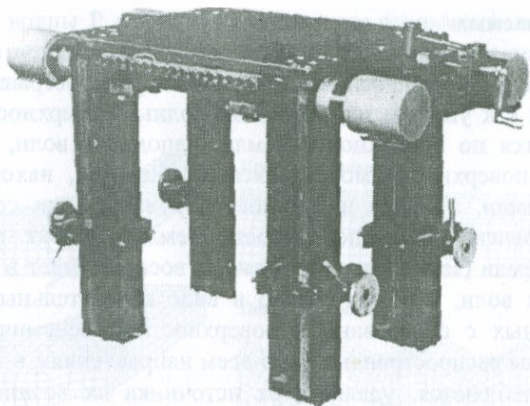


Рис. 1.28. Общий вид вибростенда АрмНIIСС-3Х.

Грузоподъемность стенда до 25кг, площадь стола 40х40см, диапазон свободных колебаний стола, регулируемых путем фиксации длин 4-х тонких металлических пластин от 0.05 до 2.0сек. Стенд может возбуждать гармонические и квазигармонические колебания амплитудой до 2см и свободные колебания при помощи ударного приспособления.

Главными производителями сейсмологической и инженерно-сейсмологической аппаратуры в мире являются американские фирмы *Kinematics*, *Teledyne Geotech*, ряд японских фирм, *Объединенный институт физики Земли Российской академии наук*, *Гюмрийский специальный конструкторско-технологический институт Академии наук Армении*.

## 1.6. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Как отмечено выше, землетрясение – результат внезапного вспарывания механически напряженных областей в земной коре. Вследствие вспарывания горных пород некоторая 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 в предыдущем параграфе, 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*. 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 вспарывания 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 ослабевают, 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 большей скоростью* 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*, чем продольные волны и достигают поверхности Земли с некоторым *опозданием*, но с более резкой силой удара и тем самым окончательно подтверждая, что на самом деле имело место землетрясение.

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.

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.1.29).

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 (рис.1.30).



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.

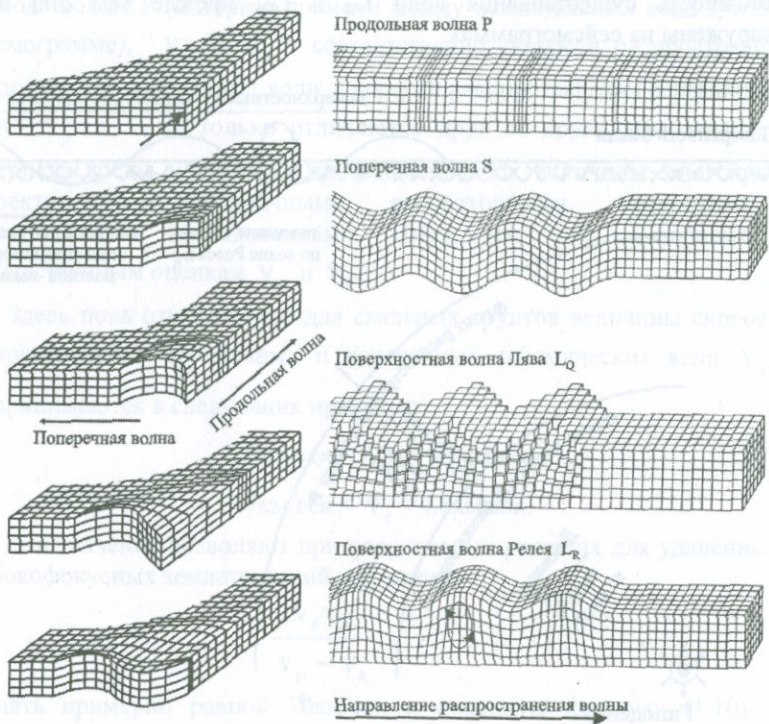


Рис. 1.29. Распространение волн в сплошной среде [14, 29].

**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, 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. Имеются несколько видов поверхностных волн, из которых наиболее основными считаются поверхностные *волны Релея*  $L_R$  и поверхностные *волны Лява*  $L_Q$ . В волнах Релея частицы грунта движутся в вертикальной плоскости с эллиптической траекторией оставаясь почти

на одном и том же месте. В распространяющихся волнах Лява частицы земной поверхности совершают обратно-поступательные движения в перпендикулярном направлении распространения волны (рис.1.29 и 1.30), но *только в горизонтальной плоскости*; вертикальная составляющая у них отсутствует. Релей (1885г.) и Ляв (1911г.) математически доказали возможность существования волн  $L_R$  и  $L_Q$ , прежде чем они были обнаружены на сейсмограммах.

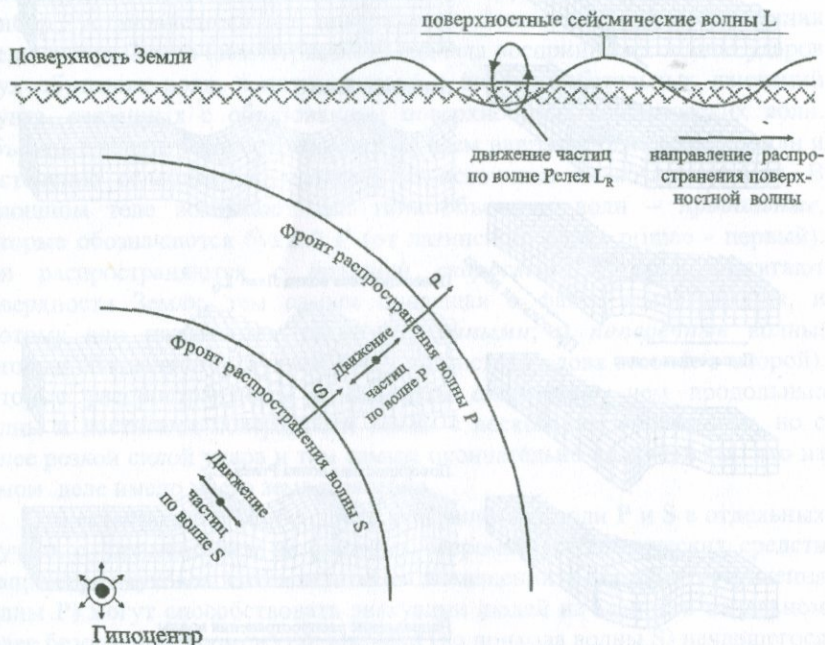


Рис. 1.30. Фронты распространения волн P и S и образование поверхностных волн L [21].

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.1.31а 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

$$\Delta = \Delta t \frac{V_s V_p}{V_p - V_s}, \quad (1.10)$$

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. Их величины многократно корректировались различными лабораторными, натурными и теоретическими исследованиями. Ниже мы еще вернемся к количественным оценкам  $V_p$  и  $V_s$ .

Здесь пока отметим, что 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 глубоководных землетрясений выражение

$$\frac{V_s V_p}{V_p - V_s}$$

принять примерно равной 10 км/сек и основную формулу (1.10) для вычисления эпицентрального расстояния представить в следующем упрощенном виде:

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

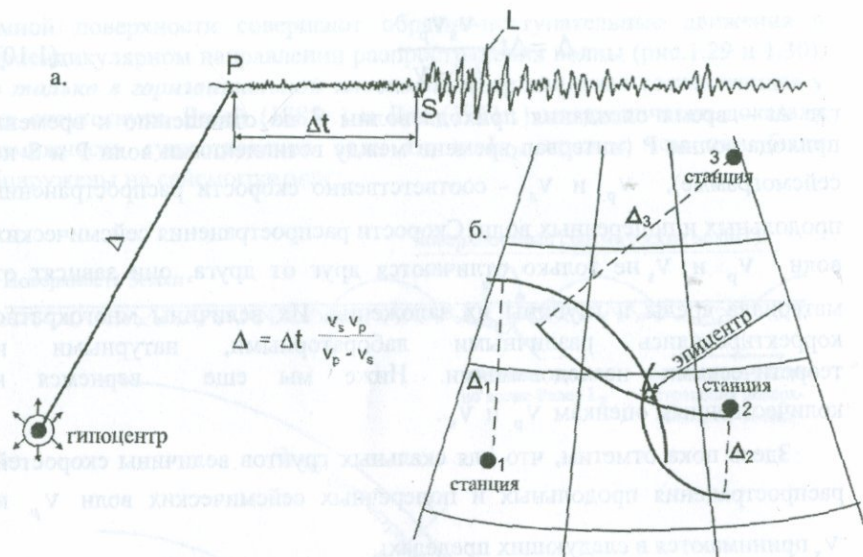
где  $\Delta$  – в километрах,  $\Delta t$  – в секундах.

Для примера: если допустим, что разность  $\Delta t$  времен вступления волн P и S на сейсмограмме составляет 61 сек, то эпицентральное (фокальное) расстояние будет примерно  $10 \cdot 61 = 610$  км.

Спитакское землетрясение 1988 года было зарегистрировано многими сейсмическими станциями мира, в том числе сеймостанцией, расположенной в итальянском городе Триест. По данным бюллетеня N23 (1-15 декабря 1988) этой станции, первые вступления сейсмических волн P и S, по Гринвичу, оказались:

P волна - 07.46.26.4

S волна - 07.50.39.9.



в.

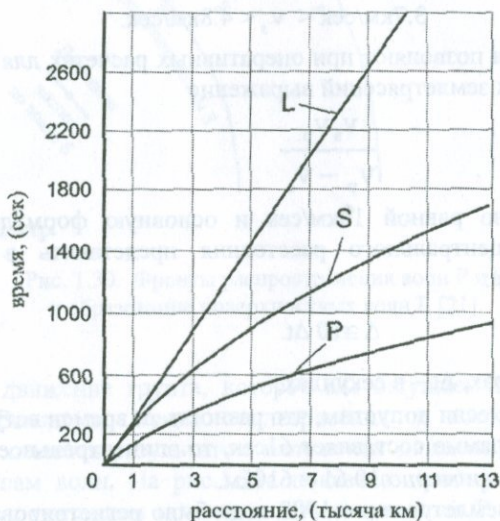


Рис. 1.31.

- Типичная сейсмограмма землетрясения (а),
- определение места и расстояния до эпицентра землетрясения (б)
- и годографы скоростей P, S и L сейсмических волн (в) [29].



Разность времени вступления волн будет:

$$\Delta t = 07.50.39.9 - 07.46.26.4 = 4 \text{ мин } 13.5 \text{ сек} = 240 + 13.5 = 253.5 \text{ сек},$$

а эпицентральное расстояние, согласно (1.11), примерно будет:  $\Delta = 10 \cdot 253.5 = 2535 \text{ км}$ . По уточненным данным бюллетеня N23,  $\Delta = 2550 \text{ км}$ . Как видим, погрешность в 15 км для таких расстояний можно считать несущественной.

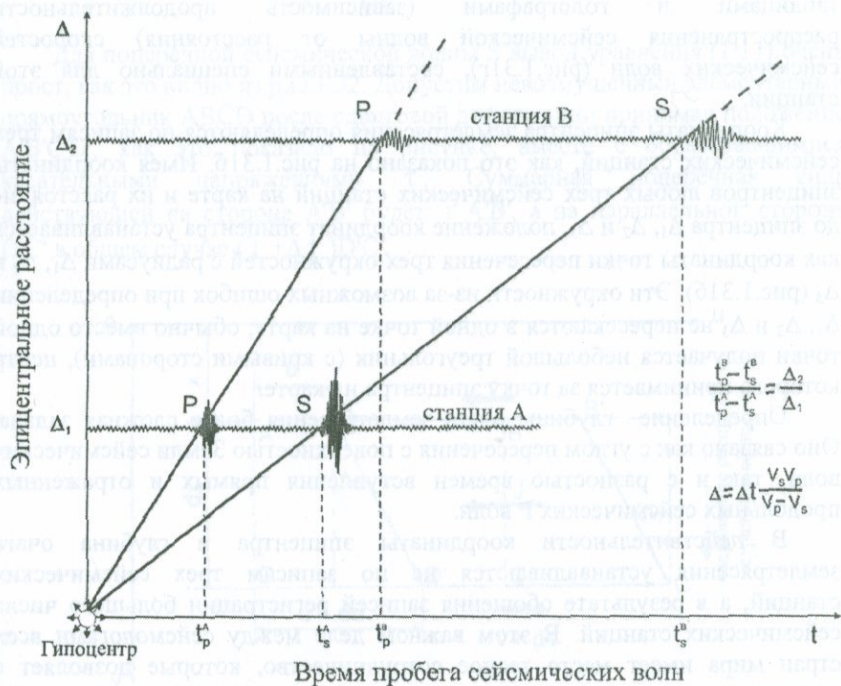


Рис. 1.31г. Определение эпицентрального расстояния.

Для местных землетрясений с неглубоким гипоцентром значение  $v_p v_s / (v_p - v_s)$  изменяется в пределах 7-9. В частности, при афтершоке 31.12.1988г. Спитакского землетрясения (см.рис.3.34) разности вступления S и P волн для пунктов регистрации в Кети, Гогаране, Ленинакане и Джрашене с соответствующими эпицентрными расстояниями 19.9, 23.5, 23.6 и 28.2 км, согласно [140], составили 2.64, 3.5, 3.505 и 3.825 сек. Если величину  $v_p v_s / (v_p - v_s)$  принять равной в среднем 7.1, то для эпицентральных расстояний соответственно получим:  $7.1 \cdot 2.64 = 18.74$ ,  $7.1 \cdot 3.5 = 24.85$ ,  $7.1 \cdot 3.505 = 24.88$  и  $7.1 \cdot 3.825 = 27.15 \text{ км}$ , которые не сущест-

венно отличаются от вышеприведенных реальных значений эпицентральных расстояний. Исходя из вышесказанного, для местных землетрясений на территории РА для величины  $v_p v_s / (v_p - v_s)$  рекомендуется принять 7.1 км/сек. По данным Ш.Окомото, для Японии эту величину можно принимать равной 8 км/сек [59].

Для более точного определения (вычисления) величины эпицентрального расстояния в каждой сейсмической станции пользуются таблицами и годографами (зависимость продолжительности распространения сейсмической волны от расстояния) скоростей сейсмических волн (рис.1.31г), составленными специально для этой станции.

Координаты эпицентра землетрясения определяются по записям трех сейсмических станций, как это показано на рис.1.31б. Имея координаты эпицентров 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  $\Delta_3$  (рис.1.31б). 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 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, которое позволяет с использованием современных средств передачи и обработки информации за короткое время с достаточной точностью определить параметры происшедшего землетрясения.

## 1.7. ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ

В общем случае любое распространяющееся возмущение, каковыми являются также сейсмические волны, удовлетворяет следующему дифференциальному уравнению:

$$v^2 \left( \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = 0, \quad (1.12)$$



где  $A(x,y,z,t)$  – величина распространяющегося возмущения в точке с координатами  $(x,y,z)$  в момент  $t$ ,  $V$  – скорость распространения возмущения (волны).

В случае плоских волн (величина возмущения  $u$  зависит только от одной координаты) уравнение (1.12) принимает более простой вид:

$$v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \quad (1.13)$$

Для поперечной сейсмической волны  $S$  вывод уравнения (1.13) очень прост, как это видно из рис. 1.32. Допустим невозмущенный элементарный прямоугольник  $ABCD$  после сдвиговой деформации принимал положение  $A'B'C'D'$ , как это показано на рисунке, вместе с образовавшимися касательными напряжениями  $\tau$ . Суммарная поперечная сила действующей на стороне  $A'B'$  будет  $\tau A'B'$ , а на параллельной стороне  $D'C'$  в общем случае  $(\tau + \Delta \tau) D'C'$ .

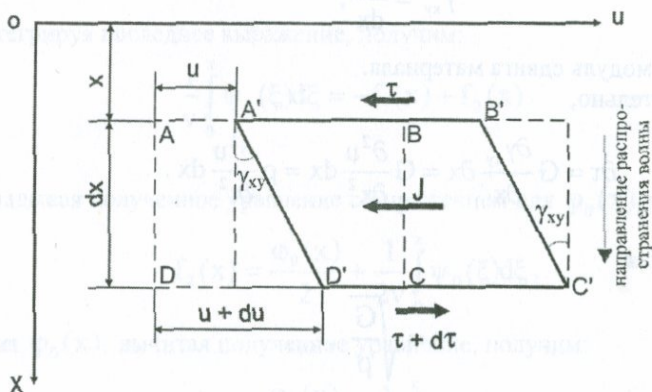


Рис. 1.32. Деформация сдвига.

Так как элементарный прямоугольник, подвергаясь знакопеременным деформациям сдвига, должен находиться в равновесном состоянии, то разность поперечных сил, действующих на двух гранях, должна равняться инерционной силе, образовавшейся в элементе  $A'B'C'D'$  (единичной толщины), которая выразится

$$J = \rho dx A'B' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (1.14)$$

где  $\rho$  - плотность среды,  $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$  - ускорение элемента по направлению перпендикулярному распространению волны. Следовательно, будем иметь:

$$(\tau + \partial\tau)D'C' - \tau A'B' = \rho dx A'B' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (1.15)$$

Так как  $A'B' = D'C'$ , то получим

$$\partial\tau = \rho dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (1.16)$$

С другой стороны известно, что

$$\begin{aligned} \tau &= G \gamma_{xy} \\ \gamma_{xy} &= \frac{du}{dx}, \end{aligned} \quad (1.17)$$

где  $G$  - модуль сдвига материала.  
Следовательно,

$$\partial\tau = G \frac{\partial\gamma_{xy}}{\partial x} dx = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx. \quad (1.18)$$

Обозначая

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

из уравнения (1.18) получим окончательное уравнение распространения поперечной волны S:

$$v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \quad (1.19)$$

Волновое уравнение (1.19) - это линейное дифференциальное уравнение второго порядка с частными производными и постоянными коэффициентами эллиптического типа. Такие уравнения решают двумя методами: волновым методом Даламбера и методом разделения переменных Фурье. Решение волнового уравнения (1.19) методом Даламбера представляется в следующем виде:



$$u(x,t) = f_1(x-vt) + f_2(x+vt)$$

или

$$u(x,t) = f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{v}\right). \quad (1.20)$$

Первые члены в этих выражениях соответствуют передаче движения (возмущение) в положительном направлении оси  $x$ , а вторые – в отрицательном направлении. Вид функций  $f_1$  и  $f_2$  произволен. Они лишь должны иметь конечные производные до второго порядка.

**При заданных начальных условиях:**

$$\begin{aligned} \text{начальное перемещение} & - u(x,0) = \varphi_0(x), \\ \text{начальная скорость} & - u_t'(x,0) = \psi_0(x) \end{aligned} \quad (1.21)$$

будем иметь

$$\begin{aligned} \varphi_0(x) &= f_1(x) + f_2(x) \\ \text{при } t=0 \quad \frac{\partial u}{\partial t} &= \psi_0(x) = -vf_1'(x) + vf_2'(x). \end{aligned}$$

Интегрируя последнее выражение, получим:

$$\frac{1}{v} \int_0^x \psi_0(\xi) d\xi = -f_1(x) + f_2(x).$$

Складывая полученное уравнение с выражением для  $\varphi_0(x)$ , получим

$$f_2(x) = \frac{\varphi_0(x)}{2} + \frac{1}{2v} \int_0^x \psi_0(\xi) d\xi,$$

а затем из  $\varphi_0(x)$ , вычитая полученное уравнение, получим:

$$f_1(x) = \frac{\varphi_0(x)}{2} - \frac{1}{2v} \int_0^x \psi_0(\xi) d\xi.$$

Заменяя в выражении  $f_1(x)$  переменную  $x$  на  $x-vt$ , а в выражении  $f_2(x)$  переменную  $x$  на  $x+vt$  и складывая их, получим окончательное решение Даламбера волнового уравнения (1.19):

$$u(x,t) = \frac{\varphi_0(x-vt) + \varphi_0(x+vt)}{2} + \frac{1}{2v} \int_{x-vt}^{x+vt} \psi_0(\xi) d\xi, \quad (1.22)$$

где  $\xi$  - переменная интегрирования.

Рассмотрим теперь решение задачи с учетом *граничных условий*.

Допустим, что

$$u(0, t) = u_0(t) \quad (1.20a)$$

при  $x=0$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \gamma_0(t).$$

Выполняя аналогичные преобразования, получим:

$$u(x, t) = \frac{u_0\left(t - \frac{x}{v}\right) + u_0\left(t + \frac{x}{v}\right)}{2} + \frac{v}{2} \int_{t - \frac{x}{v}}^{t + \frac{x}{v}} \gamma_0(\xi) d\xi. \quad (1.22a)$$

Теперь выясним, с какой скоростью распространяется возмущение по оси  $x$  или при каких условиях любая точка оси  $x$  через промежуток времени  $\Delta t$  будет иметь одно и то же самое возмущение (деформацию).

Допустим в момент  $t=t_k$  возмущение точки  $x=x_k$  равно (согласно (1.22) при  $\psi_0 = 0$ )

$$u_k(x_k, t_k) = \frac{\varphi_0(x_k - vt_k) + \varphi_0(x_k + vt_k)}{2}, \quad (1.23)$$

а в момент  $t=t_{k+1} = t_k + \Delta t$  возмущение точки  $x_{k+1}$  равно

$$u_{k+1}(x_{k+1}, t_{k+1}) = \frac{\varphi_0(x_{k+1} - vt_{k+1}) + \varphi_0(x_{k+1} + vt_{k+1})}{2}. \quad (1.24)$$

Чтобы имело место

$$u_k(x_k, t_k) = u_{k+1}(x_{k+1}, t_{k+1}),$$

согласно уравнениям (1.23) и (1.24) тождественно должны выполняться следующие условия:

$$x_k - vt_k = x_{k+1} - vt_{k+1}$$

$$x_k + vt_k = x_{k+1} + vt_{k+1}$$

или

$$\frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t} = v, \quad \frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t} = -v, \quad \Delta t = t_{k+1} - t_k. \quad (1.26)$$

Уравнение (1.26) означает, что возмущение любой точки на оси  $x$  в прямом и обратном направлении распространяется с одинаковой скоростью  $v$ .



## 1.8. УРАВНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Для выявления сущности объемных сейсмических волн рассмотрим основные уравнения динамической теории упругости и общие деформационные параметры сплошной среды. Уравнение динамической теории упругости (при пренебрежении массовыми силами) в общем случае (рис.1.33) имеет вид:

- в перемещениях

$$\begin{aligned}(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\end{aligned} \quad (1.27.1)$$

- в напряжениях (уравнения Коши)

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0,\end{aligned} \quad (1.27.2)$$

где  $u, v, w$  — перемещения по направлениям осей  $x, y, z$ ,  $\theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$  — *объемное расширение*, которое называется также *дивергенцией* вектора перемещений,  $\rho$  — плотность среды,  $\lambda$  и  $\mu$  — *коэффициенты Ламе*,  $\nabla^2$  — означает лапласиан, который в декартовых координатах является суммой вторых частных производных

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

*Шесть компонентов деформации* обычно определяются так:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}.\end{aligned}$$

**Шесть компонентов напряжений**  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}$  и  $\tau_{yz}$  связаны с компонентами деформации соотношениями:

$$\sigma_{xx} = \lambda\theta + 2\mu\epsilon_{xx}, \quad \sigma_{yy} = \lambda\theta + 2\mu\epsilon_{yy}, \quad \sigma_{zz} = \lambda\theta + 2\mu\epsilon_{zz}$$

$$\tau_{xy} = \mu\gamma_{xy}, \quad \tau_{xz} = \mu\gamma_{xz}, \quad \tau_{yz} = \mu\gamma_{yz}.$$

Из двух постоянных Ламе  $\mu$  имеет простой физический смысл, являясь мерой сопротивления упругого тела сдвиговым деформациям и называется **модулем сдвига**. Часто она означает также буквой  $G$  и легко можно определить прямо из опыта. Постоянная  $\lambda$  Ламе простым соотношением не связана с величинами, определяемыми из опыта. Ее вычисляют по значениям  $\mu$  и **модуля упругости**  $E$  (модуль Юнга) или **коэффициента Пуассона**  $\nu$ , представляющего собой отношение поперечного сужения к удлинению при одноосном растяжении образца.

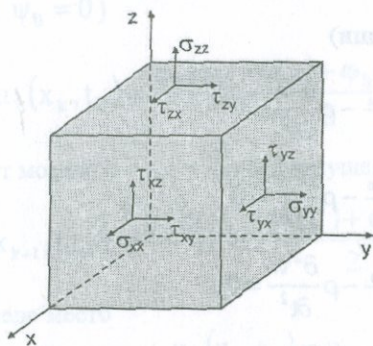


Рис.1.33. Нормальные и касательные напряжения в сплошной среде.

В любом учебнике по теории упругости приводятся доказательства справедливости следующих соотношений между упругими характеристиками  $E$ ,  $G$ ,  $\nu$  и коэффициентами Ламе  $\lambda$  и  $\mu$ .

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}.$$

Из приведенных выше формул для напряжений легко получить соотношение

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = \frac{E}{1-2\nu} (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}).$$

Сумма правой части, как уже отметили выше, есть объемная деформация  $\Delta v/v = \theta$  - **дивергенция** перемещений или **дилатация** среды в данной точке.



Если рассматривать небольшой элемент объема, который в недеформированном состоянии имеет форму куба с гранями, параллельными осям координат, то  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  будут *мерой расширения куба* в направлениях, параллельных осям. Мерой изменения объема куба будет сумма  $\theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ . *Мерами искажения формы куба при сохранении его объема* будут деформации сдвига  $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}$  и  $\gamma_{yz}$ .

При гидростатическом сжатии (давлении)  $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -\sigma$  из вышеприведенного равенства будем иметь:

$$\sigma = -\frac{E}{3(1-2\nu)} \theta.$$

Величина  $E/3(1-2\nu)$  - по аналогии с  $E$  называется *модулем объемного расширения*.

Значение *удельной (на единицу объема) потенциальной упругой энергии* среды представляется в следующем виде [81]:

$$W = \frac{1}{2} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{xz} \gamma_{xz} + \tau_{yz} \gamma_{yz}). \quad (1.28)$$

**Волны расширения и волны искажения.** Теперь, следуя Рихтеру, будем дифференцировать систему уравнений (1.27.1) соответственно по  $x, y, z$ : после их суммирования получим

$$(\lambda + \mu) \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 u + \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 v + \frac{\partial}{\partial z} \nabla^2 w \right] - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] = 0.$$

После некоторых преобразований будем иметь:

$$(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \theta - \rho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 0.$$

Обозначая 
$$\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} = v_p^2,$$

получим

$$v_p^2 \nabla^2 \theta - \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 0. \quad (1.29)$$

Таким образом, для скалярной величины объемного расширения  $\theta$  получили волновое уравнение в общем виде. Из этого уравнения видно,

что изменение объема (продольная сейсмическая волна растяжения-сжатия Р) распространяется со скоростью:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}. \quad (1.30)$$

Если, теперь, первое уравнение системы (1.27.1) продифференцировать по  $y$  и вычесть оттуда второе уравнение, заранее продифференцировав его по  $x$ , то получим:

$$\mu \nabla^2 \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (a)$$

Две аналогичные операции с уравнениями системы (1.27.1) дают:

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) &= \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ \mu \nabla^2 \left( \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) &= \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (б)$$

Выражения в скобках

$$2\varphi_x = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}, \quad 2\varphi_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \quad 2\varphi_z = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (c)$$

т.е.  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  являются компонентами вращения любого элемента среды [81], они называются также **роторами** вектора перемещения. В изотопной среде для любой плоской волны, распространяющейся по оси  $x$ , будем иметь:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \varphi_z = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) = -\frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial x},$$

следовательно, из равенства (с) получим  $\gamma_{xy} = -2\varphi_z$ .

Аналогично при рассмотрении плоской волны по осям  $y$  и  $z$  соответственно из уравнений (с) получим:

$$\gamma_{xz} = -2\varphi_y \text{ и } \gamma_{yz} = -2\varphi_x.$$

Следовательно, уравнения (а) и (б) равносильны следующим волновым уравнениям:



$$\begin{aligned}
\mu \nabla^2 \gamma_{xy} - \rho \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial t^2} &= 0 \\
\mu \nabla^2 \gamma_{xz} - \rho \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial t^2} &= 0 \\
\mu \nabla^2 \gamma_{yz} - \rho \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial t^2} &= 0.
\end{aligned}
\tag{1.31}$$

Из последних трех волновых уравнений видно, что искажения  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{xz}$  и  $\gamma_{yz}$  среды, обусловленные поперечными сейсмическими волнами S по всем трем направлениям распространяются с одинаковой скоростью:

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \tag{1.32}$$

Так как среду принимали изотропными, а направления осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  произвольными, то в данной среде невозможно существование других распространяющихся плоских волн. Таким образом оказывается, что произвольное начальное возмущение среды с компонентами  $u, v, w$  разделяется на два импульса, распространяющихся со специфическими скоростями  $V_p$  и  $V_s$ .

Приведем еще одно простое доказательство существования сейсмических волн P и S в однородной изотопной среде, которое показывает, что *это единственно возможные типы плоских волн*. Рассмотрим плоскую волну, фронт распространения которой перпендикулярно произвольной оси  $x$ , распространяется с некоторой, пока неизвестной, скоростью  $c$ . Это можно выразить так:

$$u = u(\xi), \quad v = v(\xi), \quad w = w(\xi), \quad \xi = x - ct,$$

где  $u, v, w$  — любые дважды дифференцируемые функции по  $\xi$ . Компоненты деформации и напряжений при этом будут:

$$\epsilon_{xx} = u', \quad \epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = 0, \quad \gamma_{xy} = v', \quad \gamma_{xz} = w', \quad \gamma_{yz} = 0,$$

$$\theta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \epsilon_{xx} = u'$$

$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu)u', \quad \sigma_{yy} = \lambda u', \quad \sigma_{zz} = \lambda u'$$

$$\tau_{xy} = \mu v', \quad \tau_{xz} = \mu w', \quad \tau_{yz} = 0.$$

Подставляя эти значения в общие уравнения равновесия (1.27.1) и учитывая, что для любого волнового движения со скоростью  $c$  имеет место:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = u'' c^2, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = v'' c^2, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = w'' c^2$$

получим следующие уравнения:

$$(\lambda + 2\mu - \rho c^2) u'' = 0$$

$$(\mu - \rho c^2) v'' = 0$$

$$(\mu - \rho c^2) w'' = 0.$$

Так как все эти три уравнения одновременно должны иметь место при заданном значении скорости  $c$ , то физически (математически тоже) это возможно в двух случаях:

$$\text{а) } \lambda + 2\mu - \rho c^2 = 0, \quad v = w = 0, \quad u \neq 0$$

$$\text{б) } \mu - \rho c^2 = 0, \quad u = 0, \quad v \neq 0, \quad w \neq 0.$$

В случае а) для значения скорости  $c$  получим:

$$c = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}},$$

которая, как мы видим выше, соответствует Р-волнам. Так как компоненты  $v$  и  $w$  при этом отсутствуют, смещение происходит по направлению  $x$  распространения волны, следовательно, волна является продольной.

В случае б) для значения скорости  $c$  получим:

$$c = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}},$$

которая соответствует S-волнам. Так как отсутствует компонента  $u$ , смещения происходят по направлениям  $y, z$ , перпендикулярным распространению волны, следовательно, волны являются поперечными. Таким образом, в упругой изотопной среде другие типы плоских сейсмических волн, кроме Р и S, не возбуждаются.

## 1.9. СКОРОСТИ И ЛУЧИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Принимая в уравнениях (1.30) и (1.32)

$$E = 2G(1 + \nu), \quad \nu = 0.25,$$

которое имеет место для большинства горных пород земной коры, для скоростей  $V_p$  и  $V_s$  получим следующее известное соотношение:

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



Для поверхностных землетрясений ( для поверхностных горных пород  $v=.022$ ) отношение  $v_p/v_s$  принимается равным 1.67, а для глубокофокусных ( $v=.027$ ) землетрясений - 1.78.

Обобщая результаты предыдущего параграфа, можно констатировать, что если любой точке упругой изотропной сплошной среды генерируется какое-либо возмущение, то из этой точки по всем направлениям начинают распространяться упругие волны. На большом расстоянии от источника возмущения (очага) все частицы среды движутся параллельно распространению волны (продольная волна Р) или в перпендикулярном направлении (поперечная волна S). Записи землетрясений показывают, что время пробега Р волны от очага до станции регистрации не зависит от наклона луча, а зависит только от фокального расстояния. Это значит, что скорости распространения сейсмических волн зависят только от глубины среды распространения считая от поверхности Земли. Исследования показывают, что скорости  $v_p$  и  $v_s$  по глубине Земли возрастают. Как видно из формул (1.30) и (1.32), значения  $v_p$  и  $v_s$  прямо зависят от упругих характеристик Е и G и обратно – от плотности среды  $\rho$ . Так величина плотности пород по глубине Земли возрастает, то из вышесказанного следует, что упругие характеристики среды Е и G по глубине должны расти в большей степени, чем ее плотность  $\rho$ . Здесь возникает несоответствие с изложенной выше теорией, так как существование волн Р и S было доказано только для однородной среды, когда уравнения движения (1.27.2) не содержат производных от коэффициентов упругости. Более точный анализ показывает, что выше принятое упрощение не существенно для волн, длина которых велика по сравнению с размерами локальных неоднородностей среды.

Многочисленные исследования показали, что в глубине Земли существует большая область, жесткость которой очень мала и ее механические свойства приближаются к свойствам жидкого (текучего) тела. Эта область имеет форму центрального ядра. Имеются прямые доказательства, что ядро не пропускает поперечные S волны, т.е. скорость  $v_s$  в ядре равна нулю. На границе ядра они могут только отражаться, превращаясь в продольные волны. В табл. 1.3 приведены значения скоростей распространения сейсмических волн в разных глубинах Земли, заимствованные из работы [67]. Для континентальной коры значения скоростей, приведенные в таблице, соответствуют их средним значениям. Как видно из таблицы, внутри Земли имеются *две основные разрывные границы* (рис.1.34) на расстояниях 30-60км и 2900км от поверхности Земли. На этих границах скорости распространения сейсмических волн претерпевают скачкообразные изменения.

Таблица 1.3

| Уровни                          | Глубина от поверх--<br>ности Земли, км | $v_p$ ,<br>км/сек | $v_s$ ,<br>км/сек |
|---------------------------------|----------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Поверхность Земли               | 0                                      | 5                 | 3                 |
| Континентальная<br>кора         |                                        | 6                 | 3.5               |
| Граница разрыва<br>Мохоровичича | 30 - 60                                | 6.7 - 8.2         | 3.8 - 4.8         |
| Мантия                          | 2900                                   | 13.5 - 8          | 8                 |
| Ядро                            | 5000                                   | 10                | -                 |
| Центр                           | 6370                                   | 11.5              | ?                 |

По этим разрывам Земной шар разделяется на *три* основные части: внешний слой – *кора* или *литосфера*, промежуточный слой – *оболочка* или *мантия* и центральный слой – *ядро*.

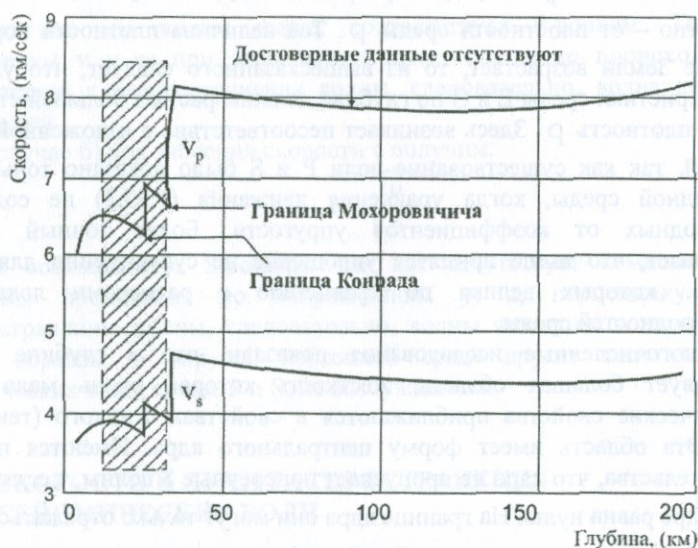
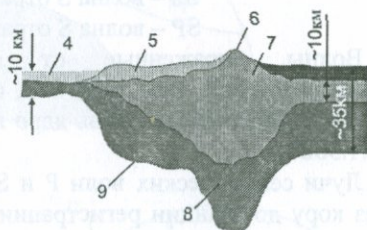
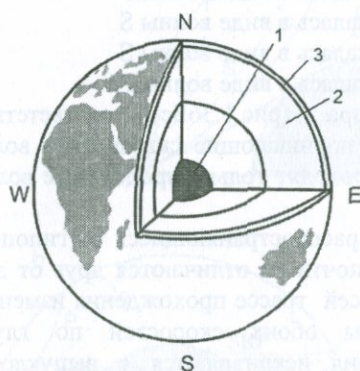
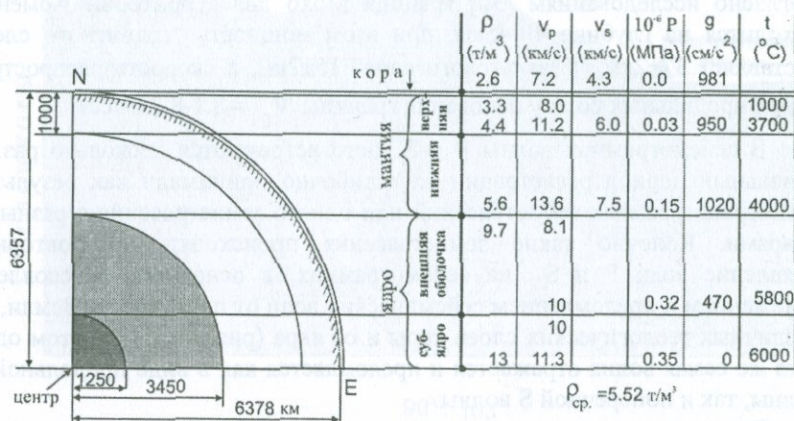


Рис. 1.34. Распределение скоростей сейсмических волн по глубине Земли [58, 67].

На рис.1.35 приведены подробные данные о строении и состоянии Земли, полученные геофизическими методами. Поверхность, разделяющая кору с более низкой скоростью распространения волн от оболочки с более высокой, называется *границей Мохоровичича* в честь хорватского



сейсмолога А.Мохоровичича, сделавшего в 1909 году свое фундаментальное открытие о скачкообразном изменении величин скоростей сейсмических волн при изучении сейсмограммы землетрясения с эпицентром в Хорватии, недалеко от станции Загреб [67].



- 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. 1.35. Строение Земли по геофизическим данным.

По разным исследованиям [67] граница Мохо под высокими и молодыми горами погружается до 60 км. Глубина 50–60 км обнаружена также на Кавказе и Средней Азии, в Южной Африке она на глубине 35 км, на Аляске 31–34 км, в Новой Зеландии около 20 км. В океанских районах граница Мохо определяется на глубине 10–11 км ниже уровня моря. Согласно исследованиям [30] граница Мохо для территории Армении находится на глубине 40–45 км, при этом мощность “гранитного слоя” составляет  $37 \pm 2$  км, “базальтового слоя”  $15 \pm 2$  км, а скорость распространения продольных волн у основания границы  $V_p = 8.1\text{--}8.2$  км/сек.

В сейсмограммах волны Р и S часто встречаются несколько раз. В начальный период регистрации их ошибочно принимали как результат регистрации разных землетрясений или одного землетрясения с разными ударами. Конечно такие землетрясения происходят, но повторное появление волн Р и S на сейсмограммах, в основном, обусловлено отражением и преломлением сейсмических волн от поверхности Земли, от различных геологических слоев коры и от ядра (рис.1.36). При этом одна и та же самая волна отражается и преломляется как в виде продольной Р волны, так и поперечной S волны.

Волны, отраженные от поверхности Земли обозначаются символами (рис.1.36Ба):

PP – волна Р отражалась в виде волны Р

PS – волна Р отражалась в виде волны S

SS – волна S отражалась в виде волны S

SP – волна S отражалась в виде волны Р.

Волны, отраженные от ядра (рис.1.36Бс) соответственно обозначаются PcP, PcS, ScP, ScS, а проникающие сквозь ядро волны – PKP, PKS, SKP, SKS. Сквозь ядро проходят только продольные волны Р (рис.1.36Бб).

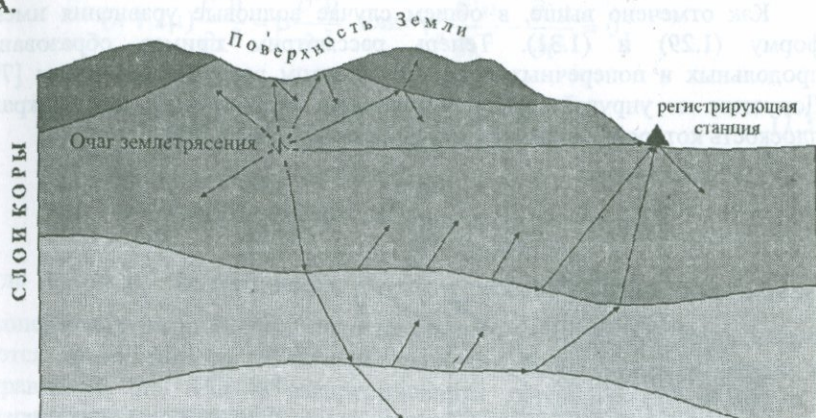
Лучи сейсмических волн Р и S распространяющиеся от гипоцентра через кору до станции регистрации почти не отличаются друг от друга, так как отношение их скоростей по всей трассе прохождения изменяется незначительно. Так как величины обеих скоростей по глубине увеличиваются лучи распространения искривляются с выпуклостью, направленной вниз (см.рис.2.5).

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  $103^\circ$  (рис.1.36Ба). При больших центральных углах чем  $103^\circ$  волна Р уже пересекает ядро. Прямой луч волны Р при нулевом угле падения совпадает с диаметром Земли и

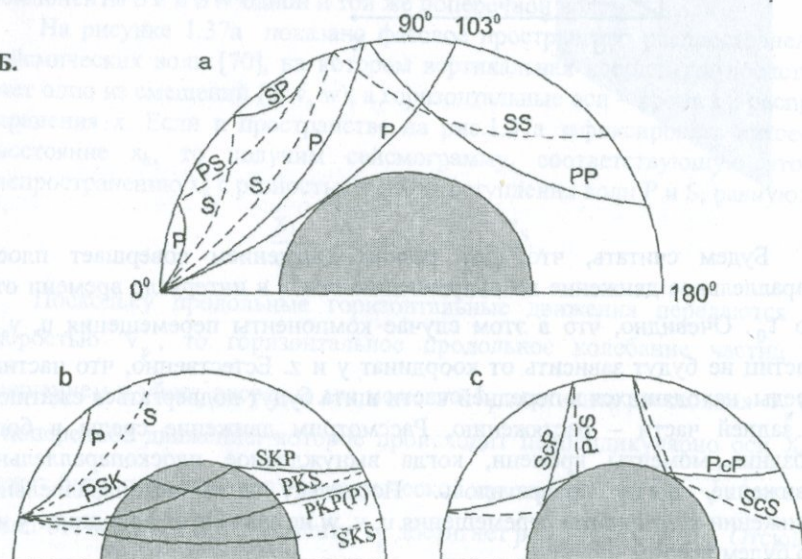


проходит из одного полюса Земли к противоположному полюсу примерно за 20 минут.

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. 1.36. Пути распространения отраженных и преломленных волн А и лучи телеметрических объемных сейсмических волн Б [14, 58, 67].

## 1.10. ОСОБЕННОСТИ ПЛОСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Как отмечено выше, в общем случае волновые уравнения имеют форму (1.29) и (1.31). Теперь рассмотрим пример образования продольных и поперечных волн при простом возбуждении среды [70]. Допустим в упругой среде установлен бесконечный щит (экран), плоскость которой совпадает с плоскостью ZY (рис. 1.37).

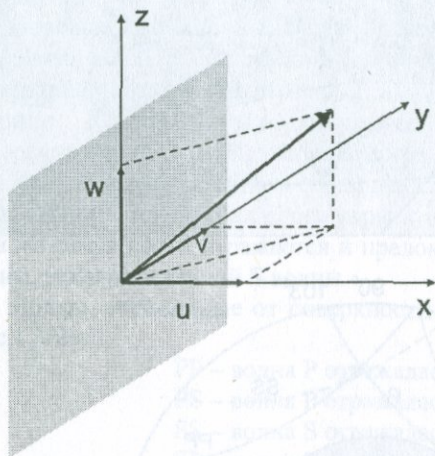


Рис. 1.37.  
Компоненты распространяющейся волны.

Будем считать, что щит резким движением совершает плоскопараллельное движение по направлению оси  $x$  в интервале времени от 0 до  $t_0$ . Очевидно, что в этом случае компоненты перемещения  $u$ ,  $v$ ,  $w$  частиц не будут зависеть от координат  $y$  и  $z$ . Естественно, что частицы среды, находящиеся в передней части щита будут подвергаться сжатию, а в задней части — растяжению. Рассмотрим движение среды в более поздние моменты времени, когда вынужденное плоскопараллельное движение щита прекратилось. Поскольку в плоскопараллельном движении компоненты перемещения  $u$ ,  $v$ ,  $w$  не зависят от координат  $y$  и  $z$ , то будем иметь:

$$\theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (1.33)$$

так как  $\frac{\partial v}{\partial y} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$



Следовательно, основные динамические уравнения теории упругости в перемещениях (1.27.1) примут вид:

$$\begin{aligned} (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \text{или} \quad v_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \\ \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad \text{или} \quad v_s^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \\ \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad \text{или} \quad v_s^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \end{aligned} \quad (1.34)$$

где  $V_p$  и  $V_s$  соответственно скорости распространения продольных и поперечных волн. Волны, представленные уравнениями (1.34), называются *простейшими плоскими волнами*. При этом, как видно из уравнений, по оси  $X$  распространяется продольная  $P$  волна, а в перпендикулярной к ней плоскости по направлениям осей  $Y$  и  $Z$  две компоненты  $SV$  и  $SW$  одной и той же поперечной волны  $S$ .

На рисунке 1.37а показано фазовое пространство распространения сейсмических волн [70], на котором вертикальная координата представляет одно из смещений ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), а горизонтальные оси – время  $t$  и распространения  $x$ . Если в пространстве на рис.1.37а зафиксировать какое-то расстояние  $x_k$ , то получим сейсмограмму, соответствующую этому распространению  $x_k$  с разностью времен вступления волн  $P$  и  $S$ , равную:

$$\frac{x_k}{V_s} - \frac{x_k}{V_p} = x_k \frac{V_p - V_s}{V_p V_s}.$$

Поскольку продольные горизонтальные движения передаются со скоростью  $V_p$ , то горизонтальное продольное колебание частиц со смещением  $u$  уйдет вперед и для момента  $t_1$  достигнет расстояния  $V_p t_1$ , а поперечное движение, которое происходит перпендикулярно оси  $X$  и может быть представлено геометрической суммой  $v$  и  $w$ , т.е.  $\sqrt{v^2 + w^2}$  будет отставать от  $u$  и к моменту  $t_1$  достигнет расстояния  $V_s t_1$ . Отсюда вытекает важное свойство упругих колебаний – произвольное плоскопараллельное движение счита не может распространяться по твердой упругой среде. Оно, это движение, распадается на продольное движение или колебание, характеризуемое компонентой  $u$ , и на поперечное движение -  $\sqrt{v^2 + w^2}$ . В каждый момент они проходят различные расстояния и составляют продолговатую  $P$  и поперечную  $S$  сейсмические волны.

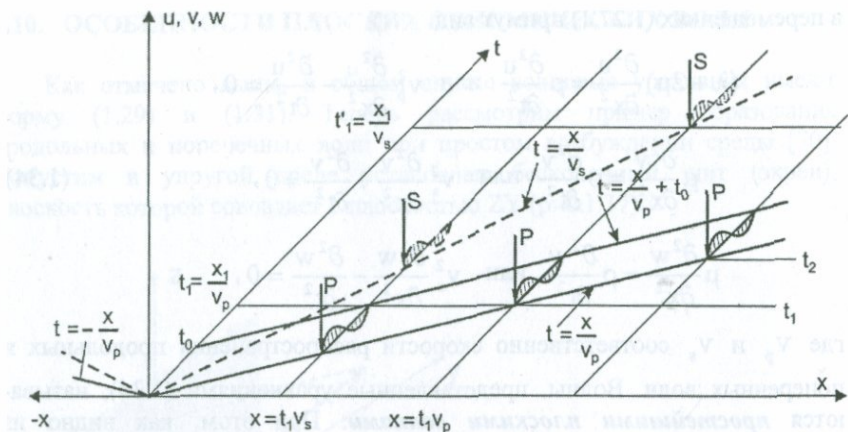


Рис. 1.37а. Фазовые пространства сейсмических волн [70].

прямая  $t = x / v_p$  – годограф вступления Р волны,

прямая  $t = x / v_s$  – годограф вступления S волны,

прямая  $t = (x / v_p) + t_0$  – годограф завершения фазы Р волны.

Как было отмечено выше, решение уравнения (1.34) распространения плоских сейсмических волн, можно представить в следующей общей форме:

$$u(\xi, t) = f\left(t - \frac{\xi}{v}\right), \quad (1.35)$$

где  $\xi$  – ось распространения,  $v$  – скорость распространения, а  $f$  – произвольная, дважды дифференцируемая функция. Часто возникает необходимость следить за распространением волн по таким координатным осям, направления которых не совпадают с направлением распространения волн  $\xi$ . В простом случае, когда волна происходит в плоскости  $xz$  и его направление составляет с осью  $x$  угол  $\alpha$  (рис.1.38), выражение (1.35) представляется в виде:

$$u(\xi, t) = f\left(t - \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{v}\right). \quad (1.36)$$



С другой стороны, так как

$$\sqrt{x^2 + z^2} = x \cos \alpha + z \sin \alpha, \quad (1.37)$$

то

$$u(x, z, t) = f\left(t - \frac{x \cos \alpha + z \sin \alpha}{v}\right). \quad (1.38)$$

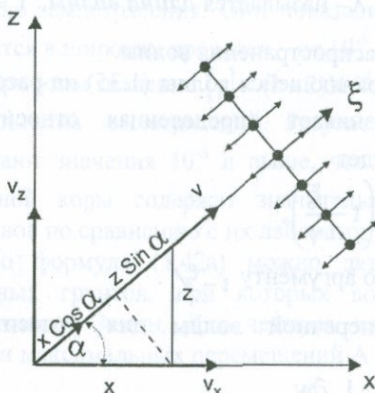


Рис. 1.38.

Компоненты плоской волны, распространяющейся под косым углом.

Форма представления распространяющейся плоской волны (1.38) предполагает ее распространение по осям  $x$  и  $z$  со скоростями  $v_x = v / \cos \alpha$  и  $v_z = v / \sin \alpha$ , которые принято называть *кажущимися скоростями*. Эти скорости в действительности являются кажущимися, так как они удовлетворяют уравнению

$$\frac{1}{v^2} = \frac{1}{v_x^2} + \frac{1}{v_z^2}, \quad (1.39)$$

а не обычному уравнению

$$v^2 = v_x^2 + v_z^2$$

сложения скоростей на плоскости.

В случае гармонических плоских волн решения (1.35) и (1.38) принимают более простой вид:

$$u(\xi, t) = A \cos \omega \left( t - \frac{\xi}{v} \right) \quad (1.40)$$

$$u(x, z, t) = A \cos \omega \left( t - \frac{x \cos \alpha + z \sin \alpha}{v} \right),$$

где  $A$  – амплитуда колебания частиц среды, а  $\omega$  – угловая частота колебаний.

В теории распространения упругих волн приняты следующие обозначения:

$$\frac{\omega}{v} = k, \quad \lambda = \frac{2\pi}{k} = vT, \quad \frac{\omega \cos \alpha}{v} = k_x, \quad \frac{\omega \sin \alpha}{v} = k_z, \quad (1.41)$$

где  $k$  – называют *волновое число*,  $\lambda$  – называется *длина волны*,  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  – *период* колебания,  $v$  – *скорость* распространения волны.

В упругой среде от распространяющейся волны (1.35) на расстоянии  $\xi$  в момент времени  $t$  возникает определенная относительная деформация, величина которой будет

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = -\frac{1}{v} f' \left( t - \frac{\xi}{v} \right),$$

где  $f'$  – производная функция  $f$  по аргументу  $t - \frac{\xi}{v}$ .

В случае плоской поперечной волны для относительной деформации сдвига будем иметь:

$$\gamma = \frac{\partial w}{\partial \xi} = -\frac{1}{v_s} \frac{\partial w}{\partial t}.$$

Следовательно, для определения деформации существенно упрощается, так как его можно осуществить косвенно, используя величину скорости процесса колебания, т.е. вместо сложной операции установления разности смещения  $\Delta w = w_2 - w_1$  двух точек среды

можно исходить из великограммы  $\frac{\partial w}{\partial t}$  землетрясения в одной точке.

Для гармонической плоской поперечной волны

$$w = A \cos \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{\xi}{v_s} \right),$$

где  $A$  – амплитуда колебания,  $T$  – период колебания грунта,  $v_s$  – скорость поперечных волн. На основании (1.42) для этого случая максимальное значение  $\gamma$  будет:

$$\gamma = \frac{A 2\pi}{v_s T}. \quad (1.42)$$

Горные породы толщи земной коры могут выдержать определенную деформацию сдвига, после того в среде образуются трещины сдвига. Если



обозначим предельную сдвиговую деформацию среды через  $[\gamma]$ , то из предыдущего равенства для амплитуды колебания грунта  $A$  получим:

$$A = \frac{v_s}{2\pi} T[\gamma]. \quad (1.42a)$$

Для нескольких землетрясений на территории Японии методом триангуляции были измерены смещения почвы в эпицентральной зоне до и после землетрясения. Они показали, что предельная деформация  $[\gamma]$  меняется в широких пределах – от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  [38, 50, 65, 70].

При этом значение  $[\gamma] = (1 \div 2)10^{-4}$  считается наиболее вероятным для большинства землетрясений. Результаты лабораторных испытаний для  $[\gamma]$  дают значения  $10^{-3}$  и выше, что вполне очевидно, так как породы реальной коры содержат значительно больше трещин и локальных разрывов по сравнению с их лабораторными образцами.

По формуле (1.42a) можно дать оценку тем перемещениям  $A$  скальных грунтов, при которых возможны образования трещин на поверхности Земли. Для четырех вариантов скальных грунтов такие оценки максимальных перемещений  $A$  приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

| Варианты | $[\gamma]$          | $v_s$ , м/сек | $T$ , сек | $A$ , см |
|----------|---------------------|---------------|-----------|----------|
| 1        | $10^{-3}$           | 1500          | 0.2       | 4.77     |
| 2        | $0.5 \cdot 10^{-3}$ | 1200          | 0.3       | 2.86     |
| 3        | $2 \cdot 10^{-4}$   | 1000          | 0.4       | 1.26     |
| 4        | $10^{-4}$           | 800           | 0.5       | 0.63     |

Такие оценки для нескальных грунтов не приемлемы, так как процесс нарушения сплошности в них имеет более сложный характер. Они во время сильных землетрясений подвергаются или разжижению, или неравномерным осадкам, которые могут достигать нескольких метров [70]. Эти явления представляют серьезную опасность для зданий и сооружений (они могут упасть без разрушения), если они рассчитаны даже на большие горизонтальные ускорения грунта.

**Потенциальная энергия среды.** При распространении сейсмических волн в упругой среде накапливается потенциальная энергия деформации. Согласно (1.28), значение удельной потенциальной энергии для плоских продольных и поперечных волн соответственно получим:

$$W_p = \frac{1}{2} \sigma_{xx} \varepsilon_{xx} = \frac{\lambda + 2\mu}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial \xi} \right)^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{2} \frac{f'^2}{v_p^2} = \frac{\rho}{2} f'^2 \quad (1.43)$$

$$W_s = \frac{1}{2} \tau_{xx} \gamma_{xx} = \frac{\mu}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial \xi} \right)^2 = \frac{\mu}{2} \frac{f'^2}{v_s^2} = \frac{\rho}{2} f'^2.$$

Кинетическая энергия движения частиц будет:

$$W = \frac{\rho}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 = \frac{\rho}{2} f'^2. \quad (1.44)$$

Таким образом, полная энергия накопленной в единице объема для любой плоской волны будет:

$$E = \frac{\rho}{2} f'^2 + \frac{\rho}{2} f'^2 = \rho f'^2. \quad (1.45)$$

Так как эта энергия, обусловленная движением частицы от распространяющейся волны со скоростью  $v_s$  или  $v_p$ , то энергия протекающая в единицу времени через единичную площадку, которая называется также **интенсивностью потока энергии** будет:

$$Q = v \rho f'^2. \quad (1.46)$$

В теории распространения волн выражения  $v\rho$  и  $\sqrt{v\rho}$  соответственно называются **акустической жесткостью грунта** и **импедансом колебания**.

По величине интенсивности потока энергии  $Q$  в какой-либо точке можно произвести оценку величины энергии упругих колебаний, излучаемых источником (очагом). Допустим, что для некоторого землетрясения, принятого в качестве эталона, определена  $Q^*(\Delta)$  – зависимость интенсивности потока энергии от эпицентрального расстояния  $\Delta$ , для другого произвольного землетрясения установив свою  $Q(\Delta)$  и полагая, что процессы колебаний обоих землетрясений одинаковы по характеру и продолжительности, можно вычислить отношение  $Q(\Delta)/Q^*(\Delta)$  для одного и того же эпицентрального расстояния  $\Delta$  и оценить, во сколько раз данное землетрясение интенсивнее (в энергетическом отношении) эталонного землетрясения.

Для гармонической плоской волны (1.40) интенсивность потока энергии  $Q$  согласно (1.46) примет более простой вид:

$$Q = 4\pi^2 v \rho \frac{A^2}{T^2}, \quad (1.47)$$



где  $A$  — амплитуда,  $T$  — период колебания грунта. В этом случае, как видно из (1.47), целесообразно вместо отношения  $Q/Q^*$  воспользоваться отношением  $\ln Q/Q^*$ , так в этом случае два землетрясения можно сравнить друг с другом только по величинам натуральных логарифмов  $\ln A$  и  $\ln A^*$ , от их максимальных амплитуд  $A$  и  $A^*$  на сейсмограммах землетрясений с условием, что оба землетрясения зарегистрированы на скальных грунтах для исключения влияния периода  $T$  колебания грунта. Эти свойства интенсивности потока энергии в конце концов привели к понятию оценки землетрясения по его магнитуде, на которой остановимся в дальнейшем.

Выше было рассмотрено распространение волн в идеальной упругой среде, когда энергия передается от места к месту без потерь. В действительности любая среда не является идеальной и поглощает часть энергии колебаний, превращая ее в тепло и другие ее виды. Естественно предполагать, что потеря энергии волны зависит от пройденного пути, т.е. чем большее расстояние проходит волна, тем слабее она становится. Обозначим начальную величину энергии волны через  $E_0$ , а на единичном расстоянии  $E_1$ . Отношение

$$\frac{E_1 - E_0}{E_0} = 2\gamma$$

называется *коэффициентом поглощения энергии среды*. На расстоянии  $\Delta\xi$  удельное поглощение энергии будет  $2\gamma \Delta\xi$ , или

$$-\frac{dE}{E} = 2\gamma d\xi. \quad (1.48)$$

После интегрирования уравнения (1.48) в пределах от  $E_0$  до  $E$  и от 0 до  $\xi$  получим:

$$E = E_0 e^{-2\gamma\xi}. \quad (1.49)$$

Естественно потеря энергии по (1.49) приведет к уменьшению перемещений частиц среды. Поэтому величину потери энергии в среде можно характеризовать также отношением амплитуд колебаний двух точек среды, находящихся на расстоянии длины волны  $\lambda$ . В теории колебаний и распространения волн обычно пользуются не прямым отношением амплитуд, а отношением их натуральных логарифмов:

$$\delta = \ln \frac{f\left(t - \frac{\xi}{v}\right)}{f\left(t - \frac{\xi + \lambda}{v}\right)}. \quad (1.50)$$

Величина  $\delta$  называется *декрементом затухания*. Теперь установим связь между коэффициентами  $\delta$  и  $\gamma$ . Как было указано выше, накопленная в среде энергия (1.45) пропорциональна квадрату амплитуды колебания частиц. Вследствие справедливости следующих соотношений:

$$f'(\xi, t) = \omega f(\xi, t) \quad E = \rho f'^2 = \rho \omega^2 f^2$$

амплитуду перемещения частиц можно выразить через энергию (1.49) следующим образом:

$$f = \sqrt{\frac{E}{\rho \omega^2}} = \sqrt{\frac{E_0}{\rho \omega^2}} \cdot e^{-\gamma \xi}. \quad (1.51)$$

Подставляя это значение амплитуды колебания в выражение (1.50) для декремента затухания получим:

$$\delta = \ln \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho \omega^2}} e^{-2\gamma \xi}}{\sqrt{\frac{E_0}{\rho \omega^2}} e^{-2\gamma(\xi + \lambda)}} = \lambda \gamma. \quad (1.52)$$

Таким образом декремент затухания равен произведению коэффициента поглощения  $\gamma$  среды и длины волны  $\lambda$ .

### Интегральное и комплексное представление плоской волны.

Изложение особенностей плоских сейсмических волн завершим их представлением через интеграл Фурье, который имеет большое прикладное значение. Как известно, любой колебательный процесс можно представить как результат суперпозиции нескольких простых гармонических колебаний. С другой стороны, как было указано выше (§1.5), в сейсмологии все регистрирующие датчики являются гармоническими колебательными системами. Следовательно, задача заключается в том, как путем суперпозиции, из этой, не имеющей ни начала ни конца процесса, построить некоторый внезапно возникающийся колебательный процесс, т.е. землетрясение [70]. Математически это означает построить функцию, которая удовлетворяла условиям:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_0 \\ f(t), & \text{при } t \geq t_0. \end{cases}$$

Это задача решается согласно теореме Фурье, принимая

$$f(t) = \sum_i^{\infty} A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1.53)$$



где  $A_i, \omega_i$  и  $\varphi_i$  выбираются таким образом, чтобы при  $t < t_0$  члены ряда (1.53) складываясь, уничтожали друг друга или, как принято говорить математически, “*интерферировались на ноль*”, а при  $t \geq t_0$  давали искомое колебание или “*интерферировались конструктивно*”. Бесконечный ряд (1.53) можно представить также следующим образом:

$$f(t) = \sum_i^{\infty} A(\omega_i) \varphi(\omega_i, t). \quad (1.54)$$

Если теперь от дискретных значений  $\omega_i$  и функции  $A(\omega_i)$  перейти к непрерывно изменяющемуся параметру  $\omega$  и функции от него  $A(\omega)$ , то приращение  $\Delta\omega$  будет соответствовать приращению  $\Delta A$ . Кроме того, вместо изменения  $A(\omega_i)$  при последовательных целочисленных значениях  $i$  можно ввести  $\frac{\Delta A}{\Delta\omega} \Delta\omega$ . После перехода к пределу  $\Delta\omega \rightarrow 0$

сумма бесконечного числа бесконечно малых множителей  $\frac{\Delta A}{\Delta\omega} \Delta\omega \varphi(\omega, t)$

заменился интегралом для любого  $[\omega_1, \omega_2]$  интервала:

$$f(t) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) \varphi(\omega, t) d\omega, \quad (1.55)$$

где

$$S(\omega) = \frac{dA(\omega)}{d\omega} \quad (1.56)$$

называется *спектральная плотность* колебания  $f(t)$ .

Отметим, что теперь  $\omega$  является переменной интегрирования, а  $t$  – параметром. В результате после интегрирования получим функцию, зависящую только от времени  $t$ .

Обычно под нестациональным колебанием подразумеваем сложные непериодические колебания. Отдельные классы сложных колебаний представляют собой колебания, повторяющиеся через определенный период. Представление таких колебаний в виде суперпозиции гармонических колебаний предложено Фурье. Если функция  $f(t)$  обладает свойством

$$f(t) = f(t \pm nT),$$

где  $T$  – период повторения, а  $n$  – целое число, то представление Фурье для функции  $f(t)$  имеет вид

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \cos \frac{k2\pi}{T} t + b_k \sin \frac{k2\pi}{T} t \right), \quad (1.57)$$

где

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(\tau) d\tau, \quad a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(\tau) \cos \frac{k2\pi}{T} \tau d\tau, \quad (1.58)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(\tau) \sin \frac{k2\pi}{T} \tau d\tau.$$

Часто (1.57) представляется также в виде:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n A_k \cos \left( k \frac{2\pi}{T} t - \varphi_k \right), \quad (1.59)$$

где

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{b_k}{a_k}.$$

Учитывая соотношение

$$a_k \cos \frac{k2\pi}{T} t + b_k \sin \frac{k2\pi}{T} t = \frac{a_k - ib_k}{2} e^{ik\frac{2\pi}{T}t} + \frac{a_k + ib_k}{2} e^{-ik\frac{2\pi}{T}t},$$

вытекающие из формулы Эйлера, основное разложение Фурье (1.57) представляются в следующей **комплексной форме**:

$$f(t) = \sum_{k=-n}^n C_k e^{ik\frac{2\pi}{T}t} \quad C_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(\tau) e^{-ik\frac{2\pi}{T}\tau} d\tau. \quad (1.60)$$

Теперь допустим, что период колебания  $T$  ряда Фурье является переменный величиний. Принимая

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega_k = k \frac{2\pi}{T}, \quad \omega_k \rightarrow \omega, \quad \Delta\omega \rightarrow d\omega$$

при предельном переходе  $n \rightarrow \infty$  и  $T \rightarrow \infty$ , частота  $\omega_k$  будет стремиться к непрерывному переменному  $\omega$ .



С учетом вышепринятого, подставляя значения (1.58) в (1.57), после некоторых преобразований получим:

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cos \omega \tau d\tau \right\} \cos \omega t + \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \sin \omega \tau d\tau \right\} \sin \omega t d\omega =$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cos \omega(t - \tau) d\tau d\omega. \quad (1.61)$$

Если принять обозначения:

$$f_c(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cos \omega \tau d\tau, \quad f_s(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \sin \omega \tau d\tau$$

$$S(\omega) = \sqrt{f_c^2 + f_s^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi(\omega) = \frac{f_s(\omega)}{f_c(\omega)}, \quad (1.62)$$

то получим **интеграл Фурье** в следующем окончательном виде:

$$f(t) = \int_0^{\infty} S(\omega) \cos[\omega t - \varphi(\omega)] d\omega. \quad (1.63)$$

Это означает, что любое нестационарное колебание  $f(t)$  с помощью интеграла Фурье можно представить как бесконечную сумму косинусоидальных колебаний с непрерывно меняющейся частотой  $\omega$  и бесконечно малой амплитудой, равной  $S(\omega)d\omega$ .

Принимая в (1.60)  $k \rightarrow \infty$ ,  $T \rightarrow \infty$ ,  $k \frac{2\pi}{T} \rightarrow \omega_k$ , после некоторых преобразований получим **интеграл Фурье в комплексной форме**:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right] e^{i\omega t} d\omega. \quad (1.64)$$

Член в квадратных скобках называется **спектральной плотностью комплексных амплитуд**:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau. \quad (1.65)$$

Следовательно, интеграл Фурье в комплексной форме представится:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{-i\omega t} d\omega. \quad (1.66)$$

Иногда выражение (1.64) представляется в виде двойного интеграла

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\omega(t-\tau)} d\tau d\omega. \quad (1.67)$$

В общем случае плоская сейсмическая волна (1.35) или в форме (1.38) в виде интеграла Фурье представляется:

$$f\left(t - \frac{\xi}{v}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\left(t - \frac{\xi}{v}\right)} d\omega \quad (1.68)$$

$$f\left(t - \frac{x \cos \alpha + z \sin \alpha}{v}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\left(t - \frac{x \cos \alpha + z \sin \alpha}{v}\right)} d\omega.$$

**Распространение плоской затухающей сейсмической волны.** Возвратимся снова к плоской гармонической волне (1.40) в комплексной форме

$$u(\xi, t) = A \cos \omega \left(t - \frac{\xi}{v}\right) = A e^{i\omega\left(t - \frac{\xi}{v}\right)}. \quad (1.69)$$

Заменяя  $\frac{\omega}{v}$  через волновое число  $k$  из (1.69), получим

$$u(\xi, t) = A e^{i(\omega t - k\xi)}. \quad (1.70)$$

Как указано выше (1.70), это форма гармонической волны, распространяющейся в идеально упругой среде. В действительности амплитуды колебаний частиц со временем уменьшаются из-за поглощающей способности среды. Для описания волны в поглощающей среде вместо волнового числа  $k$  в уравнении (1.70) примем комплексное число

$$k = k_1 - ik_2.$$

Уравнение (1.70) тогда примет вид

$$u(\xi, t) = A e^{i(\omega t - k_1 \xi)} e^{-k_2 \xi}. \quad (1.71)$$



Сопоставляя уравнение (1.71) с формулами (1.41), (1.50) и (1.51), получим

$$k_1 = \frac{\omega}{v}, \quad k_2 = \gamma. \quad (1.72)$$

Таким образом, введение комплексного волнового числа  $k$  приводит к качественному изменению волны. По мере распространения вдоль оси  $\xi$  она ослабевает. Общий вид такой волны будет:

$$u(\xi, t) = A e^{-\gamma \xi} e^{i\omega \left( t - \frac{\xi}{v} \right)}, \quad (1.73)$$

где  $\gamma$  - коэффициент поглощения энергии среды. Теперь выясним, решением какого дифференциального уравнения равновесия является выражение затухающей волны (1.73). Нетрудно убедиться, что оно не удовлетворяет основному волновому уравнению (1.34). Так как среду принимали неидеально упругим, то основные зависимости между напряжением и деформацией не будут подчиняться Закону Гука. В этом случае необходимо исходить из зависимости между напряжением и деформацией для материалов с так называемыми *упруго-вязкими* свойствами. Связи между напряжением и деформацией упруго-вязких материалов соответственно для продольных и поперечных волн имеют вид (модель Фохта)

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \epsilon_{xx} + \eta_{xx} \frac{\partial \epsilon_{xx}}{\partial t} \\ \tau_{xy} &= \mu \gamma_{xy} + \eta_{xy} \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1.74)$$

где  $\eta_{xx}$  и  $\eta_{xy}$  - коэффициенты вязкости при деформациях растяжения (сжатия) и сдвига с размерностью кг·сек/см<sup>2</sup>. Среда, для которой имеет место (1.74), называется средой *с последствием*, так как в отличие от упругой среды деформации при разгрузке устраняются *с запаздыванием*. Отношения

$$\eta'_{xx} = \frac{\eta_{xx}}{\lambda + 2\mu}, \quad \eta'_{xy} = \frac{\eta_{xy}}{\mu},$$

которые имеют размерность времени, называются *временами последствия*. При  $t < \eta'_{xx}$  и  $t < \eta'_{xz}$  вязкость проявляется в большей степени, а при  $t > \eta'_{xx}$  и  $t > \eta'_{xz}$  - упругость проявляется в большей степени. Как показывают эксперименты, для земных недр значения  $\eta'_{xx}$  и

$\eta_{xz}$  имеют порядок долей секунды. Так как периоды сейсмических колебаний в большинстве случаев больше времени запаздывания, то при их определении, без ущерба точности, можно пренебречь влиянием вязкости среды [70]. Для получения соответствующих волновых уравнений с учетом вязкости среды, продифференцировав зависимости (1.74) по  $x$  и принимая во внимание, что  $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$  и

$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x}$ , будем иметь:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta_{xx} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} &= \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \eta_{xy} \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial t}.\end{aligned}$$

Из условия равновесия элементарного участка среды (в частности, для случая поперечных волн это показано на рис. 1.32) левые части этих уравнений можно заменить соответственно инерционными силами  $\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$  и  $\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$ . После таких замен и небольших преобразований они соответственно для продольной и поперечной волн примут вид:

$$\begin{aligned}v_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\eta_{xx} v_p^2}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} &= 0 \\ v_s^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{\eta_{xy} v_s^2}{\mu} \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial t} &= 0.\end{aligned}\tag{1.75}$$

Сопоставляя решения уравнений (1.75) с полученной выше формой волны с затуханием (1.73), можно установить количественные соотношения между коэффициентом поглощения энергии среды  $\gamma_p$  и  $\gamma_s$  и временами последействия  $\eta'_{xx}$  и  $\eta'_{xz}$ .

## 1.11. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

В сейсмологии, как в оптике, принимается, что сейсмические волны распространяются как лучи света [67, 70]. Они, переходя из одной среды в другую, отражаются и преломляются, подчиняясь определенным закономерностям. В случае двух сред падающие, отраженные и



преломленные волны показаны на рис. 1.39, где  $E_1, G_1, \rho_1$  и  $E_2, G_2, \rho_2$  соответственно модули упругости и плотности первой и второй среды, а  $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$  углы падения, отражения и преломления соответственно продольной Р и поперечной S волн с нормалью. Компонент движения в волне S, происходящую в вертикальной плоскости  $zx$ , обозначен через SV, а в горизонтальной плоскости  $yx$  через SH.

Углы падения, отражения и преломления подчиняются известным соотношениям Снеллиуса:

$$\frac{\sin \alpha}{v_{p1}} = \frac{\sin \alpha'}{v_{p2}} = \frac{\sin \beta}{v_{s1}} = \frac{\sin \beta'}{v_{s2}}, \quad (1.76)$$

где  $v_{p1}, v_{p2}, v_{s1}$  и  $v_{s2}$  скорости распространения волн Р и S в средах 1 и 2. Предположим, что фронты распространения всех волн представляют из себя гармонические колебания с одинаковой угловой частотой  $\omega$ .

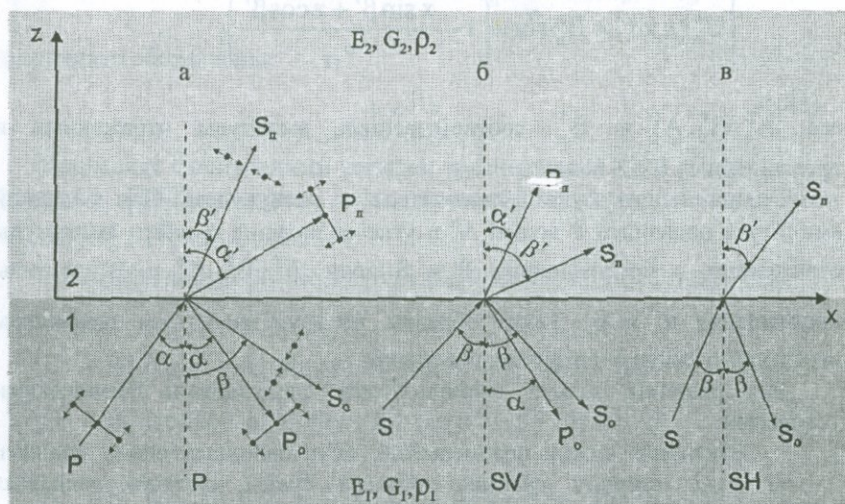


Рис. 1.39. Отражение и преломление сейсмических волн.

←●→ - направление движения частиц.

В этом случае падающую Р волну можно представить в следующем виде (см. формулу (1.38)).

$$U^P(x, z, t) = A^P \sin \omega \left( t - \frac{x \sin \alpha + z \cos \alpha}{v_{p1}} \right), \quad (1.77)$$

где  $A^P$  – амплитуда падающей волны Р. Аналогичным образом отраженные от падающей Р волны продольные и поперечные волны  $U_o^P$  и  $U_o^S$ , и преломленные продольные и поперечные волны  $U_n^P$  и  $U_n^S$  можно представить в виде:

$$\begin{cases} U_o^P(x,z,t) = A_o^P \sin \omega \left( t - \frac{x \sin \alpha - z \cos \alpha}{v_{pl}} \right) \\ U_o^S(x,z,t) = B_o^S \sin \omega \left( t - \frac{x \sin \beta - z \cos \beta}{v_{sl}} \right) \\ U_n^P(x,z,t) = A_n^P \sin \omega \left( t - \frac{x \sin \alpha' + z \cos \alpha'}{v_{p2}} \right) \\ U_n^S(x,z,t) = B_n^S \sin \omega \left( t - \frac{x \sin \beta' + z \cos \beta'}{v_{s2}} \right), \end{cases} \quad (1.78)$$

где  $A_o^P, B_o^S, A_n^P$  и  $B_n^S$  соответственные амплитуды отраженных и преломленных Р и S волн.

Теперь задача будет заключаться в следующем. При заданной амплитуде падающей Р волны  $A^P$  и угле ее падения  $\alpha$  найти амплитуды отраженных и преломленных Р и S волн  $A_o^P, B_o^S, A_n^P$  и  $B_n^S$  и углы преломления  $\alpha'$  и  $\beta'$ . Таким образом, по двум известным параметрам необходимо найти 6 неизвестных величин.

Для решения задачи воспользуемся следующими физическими условиями:

1. Векторная сумма перемещений, обусловленных всеми волнами по одну сторону границы раздела среды, должна равняться соответствующей сумме по другую сторону границы, в противоположном случае в среде возникает разрыв.
2. Соответствующие компоненты напряжений по разные стороны границы (при  $z=0$ ) должны быть равны.

Для падающей Р волны удовлетворяя первому условию, для проекции перемещений на оси  $x$  и  $z$  получим:

$$\begin{cases} (A^P + A_o^P) \sin \alpha + B_o^S \sin \beta + A_n^P \sin \alpha' + B_n^S \sin \beta' = 0 \\ (A^P - A_o^P) \cos \alpha - B_o^S \cos \beta + A_n^P \cos \alpha' + B_n^S \cos \beta' = 0. \end{cases} \quad (1.79)$$



Удовлетворяя второму условию

$$\sigma_{xx}^1 = \sigma_{xx}^2 \quad \tau_{xz}^1 = \tau_{xz}^2$$

с учетом соотношений (1.33), получим

$$\left\{ \begin{aligned} & -(A^p + A_o^p) \sin 2\alpha + B_o^s \frac{v_{p1}}{v_{s1}} \cos 2\beta - A_n^p k \left( \frac{v_{s2}}{v_{s1}} \right)^2 \frac{v_{s1}}{v_{p2}} \sin 2\alpha' + \\ & \quad + B_n^s k \left( \frac{v_{s2}}{v_{s1}} \right)^2 \frac{v_{p1}}{v_{s2}} \sin 2\beta' = 0 \\ & -(A^p - A_o^p) \cos 2\beta + B_o^s \frac{v_{s1}}{v_{p1}} \sin 2\beta + A_n^p k \frac{v_{p2}}{v_{p1}} \cos 2\beta' + \\ & \quad + B_n^s k \frac{v_{s2}}{v_{p1}} \sin 2\beta' = 0, \end{aligned} \right. \quad (1.80)$$

где принято обозначение

$$k = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (1.81)$$

Прибавляя к полученным четырем уравнениям (1.79) и (1.80) еще три уравнения (1.70), получим семь уравнений с семью неизвестными  $A_o^p, A_n^p, B_o^s, B_n^s, \alpha', \beta, \beta'$ .

Аналогичным образом для падающей SV волны будем иметь:

$$\left\{ \begin{aligned} & (B^s + B_o^s) \sin \beta + A_o^p \sin \alpha + B_n^s \sin \beta' + A_n^p \sin \alpha' = 0 \\ & (B^s - B_o^s) \cos \beta - A_o^p \cos \alpha + B_n^s \cos \beta' + A_n^p \sin \alpha' = 0 \\ & (B^s + B_o^s) \cos 2\beta - A_o^p \frac{v_{s1}}{v_{p1}} \sin 2\alpha + A_n^p k \frac{v_{s1}^2}{v_{s1} v_{p2}} \sin 2\alpha' - \\ & \quad - A_n^s k \frac{v_{s2}}{v_{p2}} \cos \beta' = 0 \\ & -(B^s - B_o^s) \sin 2\beta + A_o^p \frac{v_{p1}}{v_{s1}} \cos 2\alpha + A_n^p k \frac{v_{p2}}{v_{s1}} \cos 2\alpha' + \\ & \quad + B_n^s k \frac{v_{s2}}{v_{p2}} \sin 2\beta' = 0. \end{aligned} \right. \quad (1.82)$$

От падающей поперечной SH волны (с перемещениями вдоль оси  $y$ ) возникают только две отраженные поперечные  $S_0$  и преломленные поперечные  $S_n$  волны (рис. 1.26в), перемещения от которых перпендикулярны плоскости  $xz$ . Следовательно, условие равенства нулю вектора перемещения, обусловленного всеми волнами, даст:

$$B^s - B_o^s + B_n^s = 0. \quad (1.83)$$

Из условия равенства  $\tau_{zy1} = \tau_{zy2}$  на линии  $z=0$  получим:

$$B^s - B_o^s + k B_n^s \frac{v_{s2}}{v_{s1}} \frac{\cos \beta'}{\cos \beta} = 0. \quad (1.84)$$

Прибавляя к двум уравнениям (1.83) и (1.84) еще одно уравнение из (1.76) определим три неизвестные амплитуды  $B_o^s, B_n^s$  и угол преломления  $\beta'$ .

## 1.12. ПОВЕРХНОСТНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Вблизи поверхности Земли выделяются такие колебания грунта, которые проявляются только в верхних поверхностных слоях и быстро затухают в нижних глубоких слоях. Эти колебания, как уже отметили, называются поверхностными волнами. Рассмотрим частный случай распространения сейсмических волн в двухсредном пространстве, когда одна из сред поверхность Земли, а вторая атмосфера Земли (рис.1.40). Так как плотность воздуха значительно меньше по сравнению с плотностью коры Земли, то ее можно считать равной нулю. Поэтому на линии  $z=0$  не возникнут напряжения, т.е.

$$\text{при } z = 0 \quad \tau_{zz} = 0, \tau_{xz} = 0 \text{ и } \tau_{yz} = 0$$

В этом случае все преломленные волны будут равны нулю. От падающей продольной Р волны будем иметь отраженные продольные  $P_0$  и отраженные поперечные  $S_0$  волны. Аналогично от падающей SV волны будем иметь отраженные продольные  $P_0$  и отраженные поперечные  $S_0$  волны, а от падающей SH волны – только поперечную  $S_0$  волну.



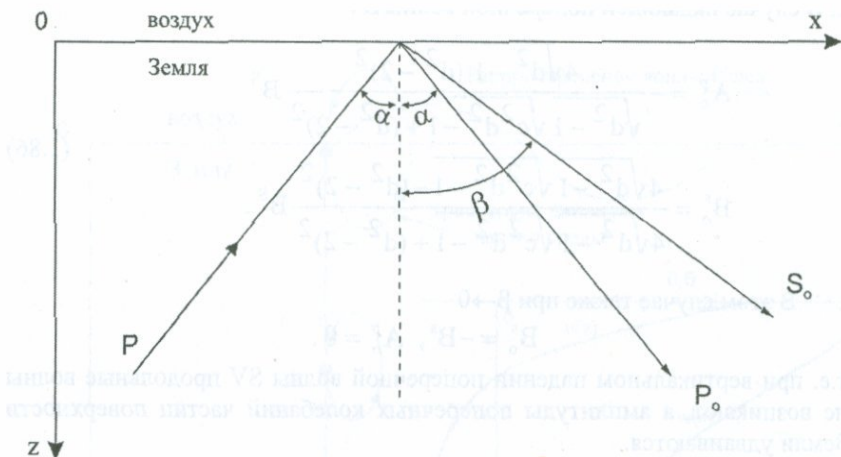


Рис. 1.40. Отражение волны P от поверхности Земли.

На основании уравнений (1.78)-(1.84) соответственно будем иметь [70]:

1. В случае падающей продольной волны P

$$A_0^p = \frac{4\sqrt{d^2 - 1}\sqrt{c^2 d^2 - 1} - (d^2 - 2)^2}{4\sqrt{d^2 - 1}\sqrt{c^2 d^2 - 1} + (d^2 - 2)^2} A^p$$

$$B_0^s = \frac{4\sqrt{c^2 d^2 - 1}(d^2 - 2)}{4\sqrt{d^2 - 1}\sqrt{c^2 d^2 - 1} + (d^2 - 2)^2} A^p. \quad (1.85)$$

где приняты обозначения

$$d = \frac{1}{\sin \beta}, \quad cd = \frac{1}{\sin \alpha}.$$

Если  $\alpha \rightarrow 0$ , то  $\beta \rightarrow 0$  и переходя к пределу, получим

$$A_0^p = -A^p, \quad B_0^s = 0,$$

которое подтверждает тот известный факт, что от падающей под прямым углом вертикальной продольной волны поперечные волны не отражаются, а амплитуды отраженной продольной волны равняются амплитуде падающей волны с обратным знаком. Иными словами, сжатие (разряжение) меняется на разряжение (сжатие).

2. В случае падающей поперечной волны SV

$$A_0^p = -\frac{4\sqrt{d^2-1}(d^2-2)^2}{\sqrt{d^2-1}\sqrt{c^2d^2-1}+(d^2-2)^2}B^s$$

$$B_0^s = \frac{4\sqrt{d^2-1}\sqrt{c^2d^2-1}-(d^2-2)^2}{4\sqrt{d^2-1}\sqrt{c^2d^2-1}+(d^2-2)^2}B^s. \quad (1.86)$$

В этом случае также при  $\beta \rightarrow 0$

$$B_0^s = -B^s, \quad A_0^p = 0.$$

т.е. при вертикальном падении поперечной волны SV продольные волны не возникают, а амплитуды поперечных колебаний частиц поверхности Земли удваиваются.

3. В случае падающей поперечной волны SH со смещением вдоль оси  $y$  все упрощается:

$$B_0^s = B^s \quad (1.87)$$

Независимо от угла падения  $\beta$ , амплитуды колебаний на поверхности Земли удваиваются.

**Волны Релея.** Из предыдущих изложений вытекает, что распространение возмущений в изотропной однородной среде представляет собой суперпозицию двух волн со скоростями  $v_p$  и  $v_s$ . Если начальное возмущение ограничено в конечной области внутри тела, величины  $v_p$  и  $v_s$  являются единственно возможными скоростями распространения волн в бесконечной среде. Когда существуют свободные границы, возможны и другие скорости распространения. При этом появляются так называемые «поверхностные волны», по которым движение частиц происходит лишь в верхнем тонком слое Земли.

В конце XIX века известный физик Релей обнаружил специальные волны, распространяющиеся на поверхности полупространства (по поверхности Земли). Источниками этих волн являются объемные сейсмические волны P и SV, выходящие на поверхность Земли и отраженные от нее. Волны Релея – это результат суперпозиции падающих и отраженных от поверхности Земли волн P и SV, распространяющихся с единой скоростью  $v_L$ . Так как перемещения точек среды по волнам P и SV имеют взаимоперпендикулярные направления и по глубине Земли уменьшаются по экспоненту, то при распространении их суммы с единой скоростью  $v_L$  траектория движения частиц должна быть эллиптической (рис.1.41). Таким образом, задача сводится к выбору таких колебательных



характеристик, уменьшающихся по глубине волн Р и SV, чтобы их скорости по линии  $z=0$  (на поверхности Земли) были одинаковыми.

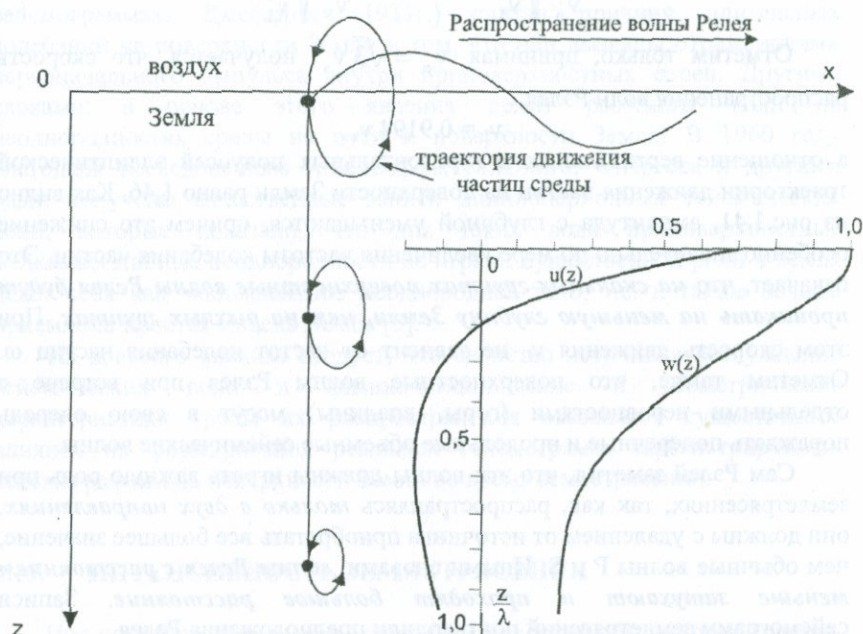


Рис. 1.41. Образование волны Релея и зависимости их горизонтальных

$u(z)$  и вертикальных  $w(z)$  компонентов от глубины  $z/\lambda$ .

( $\lambda$  - длина волны) [59, 70].

Такая постановка задачи связана с рядом математических операций и физических предпосылок, на которых мы не останавливаемся. Заинтересованным читателям рекомендуем обратиться к работе Е.Ф.Саваренского [70]. В итоге компоненты горизонтальной и вертикальной волн Релея представляется в виде:

$$u(x,z,t) = - \left( A \frac{i\omega}{v_L} e^{-rz} + s B e^{-sz} \right) e^{i\omega \left( t - \frac{x}{v_L} \right)}$$

$$w(x,z,t) = - \left( A r e^{-rz} - \frac{i\omega}{v_L} B e^{-sz} \right) e^{i\omega \left( t - \frac{x}{v_L} \right)},$$

где  $\omega$  - частота колебания,  $v_L$  - скорость распространения волн Релея,  $A$  и  $B$  - некоторые постоянные, а через  $r$  и  $s$  обозначены:

$$r = \frac{\omega}{v_p} \sqrt{\frac{v^2}{v_L^2} - 1}, \quad s = \frac{\omega}{v_s} \sqrt{\frac{v_s^2}{v_L^2} - 1}$$

Отметим только, принимая  $v_p = \sqrt{3} v_s$ , получается, что скорость распространения волн Рэлея

$$v_L = 0.9194 v_s,$$

а отношение вертикальных и горизонтальных полуосей эллиптической траектории движения частиц на поверхности Земли равно 1,46. Как видно из рис.1.41, амплитуда с глубиной уменьшаются, причем это снижение особенно значительно по мере увеличения частоты колебания частиц. Это означает, что *на скальных грунтах поверхностные волны Рэлея будут проникать на меньшую глубину Земли, чем на рыхлых грунтах*. При этом скорость движения  $v_L$  не зависит от частот колебания частиц  $\omega$ . Отметим также, что поверхностные волны Рэлея при встрече с отдельными неровностями (горы, впадины) могут в свою очередь поражать поперечные и продольные объемные сейсмические волны.

Сам Рэлеи заметил, что эти волны должны играть важную роль при землетрясениях, так как, распространяясь *только в двух направлениях*, они должны с удалением от источника приобретать все большее значение, чем обычные волны Р и S. Иными словами, *волны Рэлея с расстоянием меньше затухают и проходят большее расстояние*. Записи сейсмограмм землетрясений подтвердили предположения Рэлея.

**Краткие исторические сведения о сейсмических волнах.** В заключение отметим, что теория возникновения и распространения сейсмических волн имеет длительную историю. Она прежде всего связана с развитием общей теорией упругости. После открытия закона Гука (1660), вывода общего уравнения равновесия и колебаний Навье (1821), экспериментов Френеля (показывающих, что свет состоит из поперечно-поляризованных волн), исследований Коши (о шести независимых компонентах напряжений и деформаций) Пуассон обнаружил два типа волн, которые мы знаем теперь как Р и S волны, и на основе принятой им частной модели установил, что скорость Р волн в  $\sqrt{3}$  раз больше скорости S-волн. До этих исследований считалось, что в безграничной сплошной среде могут распространяться только продольные волны. В 1906 году уже было хорошо известно о существовании волн сжатия и сдвига в твердом теле. Первая теоретическая сейсмограмма, рассчитанная Лэмбом в 1904 году от точечного импульсного источника, показала, что она состоит из трех последовательных импульсов, соответствующих Р, S и релеевской волнам и значительно проще зарегистрированных реальных сейсмограмм, которые имеют гораздо большую продолжительность. Как отмечено выше, амплитуды волн Рэлея с расстоянием уменьшаются



медленнее. Они обладают свойством *дисперсии*, когда волны с разными частотами распространяются с разной скоростью. И это, по мнению ряда сейсмологов, является одной из причин длительности колебаний на сейсмограммах. Джеффрис (1931г.) считал причину длительных колебаний на поверхности Земли в том, что они вызваны отражениями первоначального импульса внутри приповерхностных слоев. Другими словами, в основе этого явления лежат рассеяния волн на неоднородностях среды на пути к поверхности Земли. В 1960 году благодаря исследованиям Х.Беньоффа, М.Юинга, Ф.Пресса и другими были получены качественные записи длиннопериодных сейсмических волн, которые показали, что для таких волн приповерхностные мелкомасштабные неоднородности не играют существенной роли и Земля ведет себя как эквивалентное неоднородное тело, т.е. к таким волнам приемлема простая модель Лемба [5].

Из краткого анализа следует, что свойство источника возбуждения сейсмических волн и физико-механические и геометрические характеристики среды их распространения оказывают существенное влияние на формирования реальных сейсмограмм, регистрируемых сейсмографами на поверхности Земли во время землетрясений.

### 1.13. 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 сейсмостойкости, 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.

В настоящее время в разных странах мира действуют различные шкалы интенсивности. Наиболее распространенные из них три:

1. Международная шкала сейсмической интенсивности **MSK-64** (Medvedev, Sponheuer, Karnik), авторами которой являются С.В.Медведев (Москва), У.Шпонхер (Йена) и В.Карник (Прага). Шкала MSK-64 является усовершенствованным и объемным вариантом прежних шкал Меркалли (1902), Канкани (1904), Зиберга (1923) и Медведева (1953). Шкала состоит из 12 единиц - баллов и обозначается римскими числами.

Таблица 1.5

Сейсмическая шкала интенсивности MSK-64

| Баллы | Наименование землетрясения  | Краткое описание последствий землетрясения                                                       | Ускорение грунта, см/сек <sup>2</sup> | Скорость грунта, см/сек | Отклонение маятника сейсмографа СБМ, мм |
|-------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|
| I     | Неощутимое землетрясение    | Колебания грунта обнаруживаются только приборами.                                                |                                       |                         |                                         |
| II    | Едва ощутимое землетрясение | В отдельных случаях землетрясение ощущается людьми, находящимися в покое.                        |                                       |                         |                                         |
| III   | Слабое землетрясение        | Землетрясение ощущается многими людьми – во многих случаях неосознавая, что это землетрясение.   |                                       |                         |                                         |
| IV    | Заметное землетрясение      | Землетрясение ощущается внутри здания многими людьми. Возможно дребезжание окон, дверей, посуды. |                                       |                         |                                         |



|      |                                              |                                                                                                                                                                                                                      |           |           |           |
|------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| V    | <b>Пробужде-<br/>ние</b>                     | Многие спящие просыпаются. Висячие предметы сильно качаются. Животные беспокоятся.                                                                                                                                   | 12 - 25   | 1 - 2     | 0.5 - 1.0 |
| VI   | <b>Испуг</b>                                 | Легкие повреждения в зданиях, тонкие трещины в штукатурке. Многие люди, находящиеся в зданиях, пугаются и выбегают на улицу.                                                                                         | 25 - 50   | 2.1 - 4   | 1.1 - 2.0 |
| VII  | <b>Поврежде-<br/>ние зданий</b>              | Трещины в штукатурке, выколы отдельных кусков, тонкие трещины в стенах: большинство людей испуганы и выбегают из помещений, еле удерживаясь на ногах.                                                                | 50 - 100  | 4.1 - 8   | 2.1 - 4.0 |
| VIII | <b>Сильные<br/>поврежде-<br/>ния зданий</b>  | Крупные сквозные трещины в стенах, дымоходные трубы и парапеты падают. Испуг и паника. Водители автомашин обеспокоены. Обламываются ветви деревьев.                                                                  | 100 - 200 | 8.1 - 16  | 4.1 - 8.1 |
| IX   | <b>Всеобщие<br/>поврежде-<br/>ния зданий</b> | В отдельных зданиях обвалы, разрушаются стены, перекрытия и покрытия. Всеобщая паника. Животные мечутся и издают крики.                                                                                              | 200 - 400 | 16.1 - 32 | 8.1 - 16  |
| X    | <b>Всеобщие<br/>разрушения<br/>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. | 400 - 800 | 32.1 - 64 | 16.1 - 32 |
| XI   | <b>Катастрофа</b>                            | Разрушение и обвалы мостов, плотин, подземных трубопроводов. Многочисленные горные обвалы, осыпание рыхлых пород с крутых склонов.                                                                                   |           |           |           |
| XII  | <b>Изменение<br/>рельефа</b>                 | Всеобщие обвалы надземных и подземных сооружений. Коренные изменения на поверхности Земли, образование новых озер, водопадов, изменения русла рек.                                                                   |           |           |           |

В табл. 1.5 приводится краткое описание шкалы. Более подробное описание шкалы приводится в Приложении 3. В таблице приводятся также пределы значений максимальных ускорений и скоростей грунта и показания сейсмометра СБМ, зарегистрированные при землетрясениях, которые дают возможность оценить интенсивность землетрясения и с помощью инструментальных записей.

Дать оценку интенсивности слабых землетрясений в пределах I-V баллов, и особенно очень сильных землетрясений в пределах X-XII баллов, по зарегистрированным величинам максимальных ускорений и скоростей грунта, очень неоднозначная и сложная задача. Поэтому в табл.1.5 авторы шкалы, во избежание больших погрешностей, назвав их условными характеристиками, сознательно не приводят значения этих параметров для очень слабых и очень сильных землетрясений.

2. Модифицированная шкала *Меркалли ММ* (Modificcin Mercalli). Первоначальный вариант, широко применяемый в США, шкалы ММ был разработан в 1902 году в Италии Дж.Меркалли. В 1931 году шкала была переработана Г.Вудом и Ф.Ньюменом из Калифорнийского технологического института и названа "Модифицированной шкалой Меркалли". В 1956 году Ч.Рихтер, заново пересмотрел шкалу, которая действует в такой редакции по настоящее время. По шкале ММ интенсивность как по MSK-64, определяется 12 баллами и обозначается римскими числами. Сокращенное содержание шкалы ММ по баллам [21,59,67,106].

- I. Не ощущается населением.
- II. Ощущается лишь немногими, находящимися в покое, особенно на верхних этажах зданий.
- III. Ощущается многими в зданиях, но большинством не воспринимается как землетрясение.
- IV. Ощущается большинством людей внутри зданий и некоторыми вне зданий. Похоже на сотрясение от проходящего тяжелого грузовика. Окна, посуда и двери дребезжат, висячие предметы колеблются.
- V. Ощущается большинством людей как внутри, так и вне здания; спящие просыпаются. Небольшие предметы опрокидываются.
- VI. Ощущается всеми: многие люди пугаются и выбегают наружу. Трещины в штукатурке, небольшие повреждения в каменных и кирпичных зданиях.
- VII. Население пугается: трудно устоять на месте. Незначительные повреждения зданий и умеренные – в плохо запроектированных и построенных. Падение дымовых труб.



VIII. Общий страх, признаки паники. Обрушивается кладка кирпичных и каменных стен. Панели стен отделяются от элементов каркасов. Смещаются с поворотом и падают печные и заводские трубы и башни. В сырых грунтах и на крутых склонах появляются трещины.

IX. Всеобщая паника. Повреждение зданий хорошей постройки. Отрыв сооружений от фундамента. Серьезные повреждения водохранилищ, трубопроводов. На аллювиальных почвах выбросы песка и ила, грунт фантанирует (разжижается). Заметные трещины в грунте.

X. Большинство кирпичных, каменных и каркасных зданий разрушается вместе с фундаментами. Разрушаются деревянные дома и мосты. Большой ущерб наносится платинам, дамбам и причалам. Большие оползни. Рельсы слегка искривляются. Поднятие уровня воды.

XI. Обрушивается большинство кирпичных, каменных и деревянных зданий и некоторые мосты. В грунте появляются большие трещины. Подземные трубопроводы полностью выходят из строя. Сильно искривляются рельсы.

XII. Всеобщее разрушение. Смещаются большие массы горных пород. На поверхности видны "земные волны". Видимые изменения ландшафта. Предметы подбрасываются в воздух.

3. Шкала сейсмической интенсивности **ЖМА** (Japan Meteorological Agency). Японская шкала ЖМА принята в 1949 году. Она состоит из 8 единиц (баллов) включая 0, которые обозначаются арабскими цифрами [59]:

0. **Не ощущается:** регистрируется приборами, но не ощущается людьми.
1. **Незначительное:** ощущается людьми в состоянии покоя или лицами, исключительно восприимчивыми к землетрясениям.
2. **Слабое:** ощущается большинством людей; легкое дребезжание обычных и японских задвижных решетчатых дверей.
3. **Достаточно сильное:** раскачивание домов и строений, сильное дребезжание обычных и японских дверей, раскачивание люстр и других подвешенных предметов, колебание жидкостей в сосудах.
4. **Сильное:** сильное раскачивание домов и строений, опрокидывание неустойчивых предметов, выплескивание жидкостей из сосудов.
5. **Очень сильное:** растрескивание штукатурки на стенах, опрокидывание каменных надгробий, повреждение кирпичных дымовых труб.

6. **Разрушительное:** обрушение до 30% японских деревянных домов, многочисленные оползни грунта и разрушение откосов, трещины на пологих участках грунта.
7. **Опустошительное:** обрушение более 30% японских деревянных домов.

В 1992 году XXVIII Генеральная Ассамблея Европейской Сейсмологической Комиссии (ESC) рекомендовала для широкого использования новую **Европейскую Макросейсмическую Шкалу EMS'92** [138], которая по существу является усовершенствованным и дополненным вариантом шкалы MSK-64. Базой для развития уточненного варианта шкалы послужила так называемая шкала MSK-81 специальной комиссии экспертов и более ранние предложения С.Медведева. Авторами шкалы EMS'92 являются Г.Грюнталь (Потсдам), Р.Муссон (Эдинбург), Дж.Шварц (Веймар) и М.Стуччи (Милан). Шкала EMS'92 переведена на русский язык и издана отдельной брошюрой под редакцией М.А.Клячко в С.Петербурге в 1996 году. Авторы новой шкалы старались не внести в нее существенные изменения по сравнению с основными положениями шкалы MSK-64 во избежание искажения результатов ранее приведенных оценок интенсивности прошлых землетрясений с применением шкалы MSK-64. В отличие от шкалы MSK-64 в EMS'92 введены новые типы зданий (в том числе высоких), особенно те, которые имеют антисейсмические мероприятия. В новой шкале вместе трех типов зданий (А, Б, В по MSK-64 без антисейсмических мероприятий) введены шесть классов А, В, С, D, E, F по уязвимости, в том числе с антисейсмическими мероприятиями различного уровня. В шкале EMS'92 повреждения во время землетрясения разделены на пять степеней, причем отдельно для каменных и кирпичных зданий и зданий из железобетона. Шкала снабжена тремя приложениями: по оценке интенсивности наиболее крупных прошлых землетрясений, по возможности распространения шкалы на здания с антисейсмическими мероприятиями и по сейсмическим эффектам (оползни, обвалы, разрушения скал во время землетрясения), которые призваны обеспечить дополнительную информацию для более достоверного установления интенсивности землетрясения.

Внимательной читатель заметит, что в отличие от вышеприведенных других шкал, шкала EMS'92 в самом оглавлении называется *“Макросейсмическая шкала”*. Нам кажется это не случайно, так как авторы шкалы считают, что *“Макросейсмическая интенсивность является средством классификации силы землетрясения на основе эффектов, наблюдаемых на ограниченной территории”*. Другими словами, по этой шкале определяется не сила самого землетрясения, а уровень его последствий на определенной территории. Краткое описание основных положений EMS'92 приведено в Приложении 4.



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. Сравнительные оценки интенсивности по MSK-64 и других шкал приводятся в табл. 1.6.

Между интенсивностью  $I_J$  по японской шкале JMA и интенсивностью  $I_M$  по шкалам MSK и MM имеется следующее соотношение [67]:

$$I_M = 1.5 I_J + 0.5. \quad (1.88)$$

Основываясь на записях землетрясений на территории Калифорнии, Канкани и Рихтер для величины интенсивности  $I$  по шкале MM и максимальным ускорением грунта  $a$  получили следующую эмпирическую связь:

$$\lg a = \frac{I}{3} - \frac{1}{2}, \quad (1.89)$$

где  $a$  - ускорение грунта в см/сек<sup>2</sup>,  $I$  - интенсивность в баллах шкалы MM.

Сопоставление сейсмических шкал интенсивности

| Шкалы  |       |        |        |                      |                                    |
|--------|-------|--------|--------|----------------------|------------------------------------|
| MSK-64 | MM-56 | JMA-49 | EMS-92 | Рисси-Форели<br>1883 | Меркалли Кан-<br>кани Зибберг 1917 |
| I      | I     | 0      | I      | I                    | I                                  |
| II     | II    | 1      | II     | II                   | II                                 |
| III    | III   | 2      | III    | III                  | III                                |
| IV     | IV    | 2+3    | IV     | IV                   | IV                                 |
| V      | V     | 3      | V      | V-VI                 | V                                  |
| VI     | VI    | 4      | VI     | VII                  | VI                                 |
| VII    | VII   | 4-5    | VII    | VIII                 | VII                                |
| VIII   | VIII  | 5      | VIII   | IX                   | VIII                               |
| IX     | IX    | 6      | IX     | X                    | IX                                 |
| X      | X     | 6      | X      | X                    | X                                  |
| XI     | XI    | 7      | XI     | X                    | XI                                 |
| XII    | XII   | 7      | XII    | X                    | XII                                |

По формуле (1.89), как указывает сам Рихтер, можно получить две заманчивые предельные оценки. Так, если принять

$$I = 1\frac{1}{2},$$

то по формуле (1.89) получим

$$\lg a = 0, \text{ откуда } a = 1 \text{ см/сек}^2.$$

Различного рода исследования показывают, что пороговое значение ускорения грунта (между баллами I и II), при котором люди начинают ощущать сотрясение, действительно равно  $1 \text{ см/сек}^2$ . Если же принимать

$$I = 7\frac{1}{2},$$

то получим  $\lg a = 2$ , откуда  $a = 100 \text{ см/сек}^2$ , которое соответствует ускорениям грунта при семибалльных землетрясениях по шкале MM и MSK. При таких ускорениях грунта в зданиях, построенных без антисейсмических мероприятий, во время землетрясений в действительности возникают легкие повреждения.

Формула (1.89) особенно не приемлема для очень сильных землетрясений. Так, например, при интенсивности  $I = 10\frac{1}{2}$  значение  $a$  становится равным  $1000 \text{ см/сек}^2$  (один g), что, по утверждению Рихтера, является слишком низким. 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. Изосейсты редко бывают круглыми. Обычно, если их строят по повреждениям зданий, возведенных на скальных грунтах, они имеют эллипсообразную форму – вытянутые по длине очага (разрыв на поверхности Земли). В действительности изосейсты имеют чрезмерно сложный характер, как показано на рис.1.42, для сильнейшего Китайского землетрясения с магнитудой  $M=8.6$  1920 года.

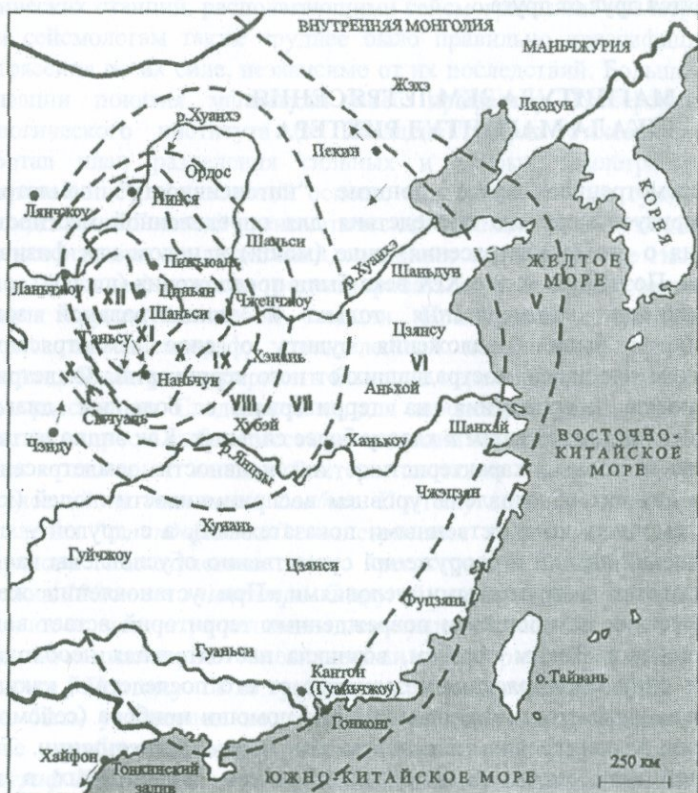


Рис. 1.42. Изосейсты землетрясения в Китае 1920 года. Интенсивности показаны римскими числами, стрелками обозначены направления ощущаемых движений [62].

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 изосейсты 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.

#### 1.14. 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.1.5, 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 сформулировании 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) Чарлз 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 100км от эпицентра"*. Заранее отметим, что не обязательно каждый раз иметь именно сейсмограф Вуда-Андерсона в точности на расстоянии 100км от эпицентра (такое может случиться совершенно случайно), просто, как будет указано ниже, надо вводить поправки для приведения результатов измерений, полученных на других расстояниях и другими сейсмографами, к тем, которые были бы получены на расстоянии 100км сейсмографом Вуда-Андерсона.

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

$$M = \lg A_c, \quad (1.90)$$

где  $A_c$  — *величина перемещения скального грунта на сейсмограмме в микронах\**, зарегистрированной сейсмографом Вуда-Андерсона на расстоянии 100км. Если на сейсмограмме землетрясения, зарегистрированной сейсмографом Вуда-Андерсона, на расстоянии 100км 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 100км 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 100км 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

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

\* В иностранных источниках вместо микрона употребляется также микрометр (mkm).



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. Для большей наглядности в табл.1.7 приведены действительные значения перемещений на расстоянии 100 км от эпицентра для землетрясений от самого слабого с магнитудой  $M=-1$  и до самого сильного с магнитудой  $M=9.0$ .

Самое слабое землетрясение, которое ощущается человеком, имеет магнитуду  $M=1.5$ . Землетрясения с магнитудой  $M=4.5$  и более уже вызывают повреждения в зданиях и сооружениях. Землетрясения с  $1 \leq M < 3$  называются микроземлетрясениями, а с  $M < 1$  - ультрамикроземлетрясениями.

Таблица 1.7

| Магнитуда<br>землетрясения,<br>M | Действительное перемещение грунта A<br>на расстоянии 100км от эпицентра |               |               |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|                                  | в микронах                                                              | в миллиметрах | в сантиметрах |
| -1                               | 0.0000357                                                               |               |               |
| 0                                | 0.000357                                                                |               |               |
| 1                                | 0.00357                                                                 |               |               |
| 2                                | 0.0357                                                                  |               |               |
| 3                                | 0.357                                                                   | 0.000357      |               |
| 4                                | 3.57                                                                    | 0.00357       |               |
| 4.5                              | 11.3                                                                    | 0.0113        |               |
| 5                                | 35.7                                                                    | 0.0357        |               |
| 5.5                              | 113                                                                     | 0.113         |               |
| 6                                | 357                                                                     | 0.357         | 0.0357        |
| 6.5                              | 1130                                                                    | 1.130         | 0.113         |
| 7                                | 3570                                                                    | 3.570         | 0.357         |
| 7.5                              | 11300                                                                   | 11.300        | 1.13          |
| 8                                | 35700                                                                   | 35.700        | 3.57          |
| 8.5                              | 113000                                                                  | 113           | 11.3          |
| 9                                | 357000                                                                  | 357           | 35.7          |

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.

В армянском варианте настоящей книги, изданной в 2002 году, 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\*. Это случилось 26 декабря 2004 года. На побережье острова Суматра произошло самое катастрофическое землетрясение на Земле с магнитудой более 9.0, вызвавшее огромное цунами и ставшее причиной смерти более чем 300000 людей.*

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

$$M = \lg 2800A, \quad (1.91)$$

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

Так, например, во время Спитакского землетрясения 1988 года на инженерно-сейсмометрической станции N5 города Еревана сейсмометром CM-5 зарегистрировано максимальное перемещение грунта, равное 3.5мм или 3500 микронам (рис.3.19). Расстояние Ереван-Спитак примерно равно 100км, поэтому магнитуда Спитакского землетрясения примерно будет

$$M = \lg 2800 \cdot 3500 = \lg 10^7 = 7.0,$$

которую подтвердили многие сейсмические станции мира.

Возникает естественный вопрос – как определили магнитуду, если сейсмограф установлен не на расстоянии 100км 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

---

\* Здесь речь идет об изложенной выше классической (Рихтеровской) магнитуде землетрясений по поверхностным волнам ( $M_S$ ). Для Чилийского землетрясения 22.05.1960г. при  $M_S=8.3$  и Алясского землетрясения 28.03.1964г. при  $M_S=8.5$  их магнитуды по сейсмическому моменту (см.след.раздел) соответственно составили  $M_W=9.5$  и  $M_W=9.2$  [38].



настоящее время называется локальной (местной) магнитудой –  $M_L$ , и определяется формулой Рихтера

$$M_L = \lg A + 3 \lg \Delta - 2.92, \quad (1.92a)$$

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

Формула (1.92a) 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 (телесейсмических) Гутенберг вывел следующую формулу магнитуды  $M_S$  [5]:

$$M_S = \lg A + 1.656 \lg \Delta + 1.818, \quad (1.92b)$$

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

Международной ассоциацией сейсмологии и физики недр (IASPEI) для  $M_S$  рекомендовано следующее выражение [5]:

$$M_S = \lg \left( \frac{A}{T} \right)_{\max} + 1.66 \lg \Delta + 3.3, \quad (1.92b)$$

где  $\left( \frac{A}{T} \right)_{\max}$  – максимум из всех величин  $\frac{A}{T}$  (амплитуда/период) у различных волновых групп на сейсмограмме. Для  $T=20$  сек уравнение (1.92b) почти совпадает с уравнением (1.92b).

Особенность перечисленных трех формул (1.92) 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. Уравнения (1.92) считаются применимыми только для мелкофокусных землетрясений с глубиной очага  $h$  не более 60 км. Для более глубоких землетрясений шкала магнитуд основана на амплитуде телесейсмических объемных волн  $m_b$  и определяется формулой [38]:

$$m_b = \lg \left( \frac{A}{T} \right) + C(h, \Delta), \quad (1.92r)$$

где  $T$  – период измеряемой волны, а  $A$  – представляет собой амплитуду грунта,  $C(h, \Delta)$  – эмпирический коэффициент, зависящий от глубины очага и эпицентрального расстояния, определяемого по специальным таблицам.

Эмпирически установлена следующая зависимость между  $m_b$  и  $M_S$

$$\begin{aligned} m_b &= 2.5 + 0.63 M_S \\ \text{или} \quad M_S &= 1.59 m_b - 3.97. \end{aligned} \quad (1.93)$$

Отметим, что значения  $m_b$  и  $M$  совпадают при  $m_b = M = 6.75$ , выше этого  $M > m_b$ , ниже  $M < m_b$ .

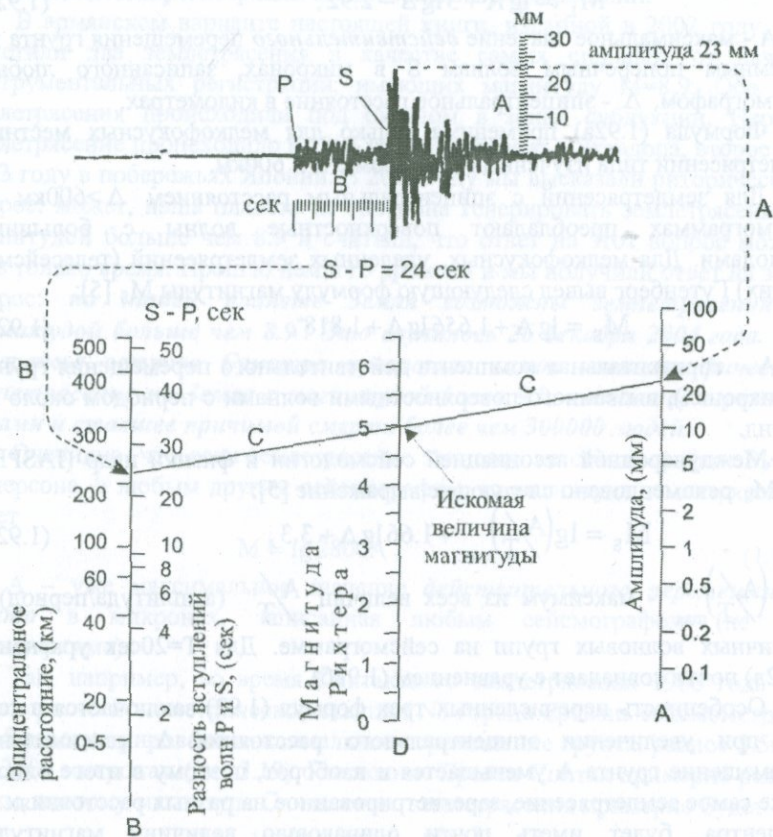


Рис. 1.43. Номограмма для определения магнитуды [14].

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. Одна из таких номограмм, заимствованная из [14], показана на рис. 1.43. Но, несмотря на все это, из-за сложности сути самого землетрясения, неоднородности путей распространения сейсмических волн и неидентичности сейсмографов значения магнитуды одного и того же землетрясения, вычисленные на разных сейсмических станциях, всегда отличаются друг от друга, причем это отличие может достигать величины 0.5.

Считаем 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 происхождения и степенью причиненного последствия, количественно оценить масштабы и мощь землетрясения.

## 1.15. 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

$$\tau = \gamma G, \quad \gamma b = u, \quad (1.94)$$

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

$$M_0 = FG u. \quad (1.95)$$

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.

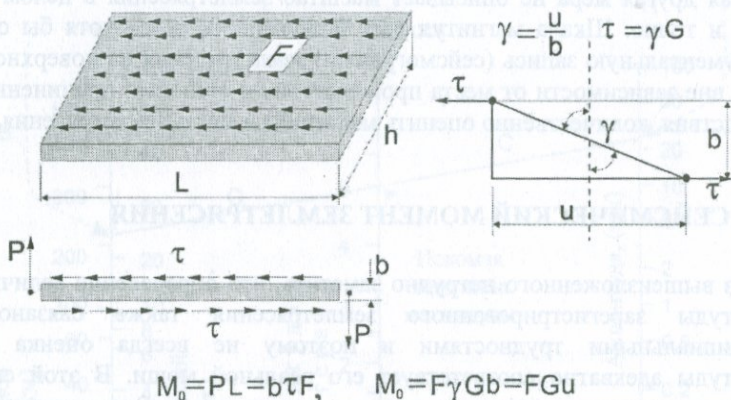


Рис. 1.44. Механизм процесса вспарывания и иллюстрация происхождения сейсмического момента [73].

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 эпицентральное 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  $3 \div 5 \cdot 10^{11}$  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 Веллса к Коппершмитта [213], именно по средней величине  $\bar{u}$  происходит одинаковая по глубине разрыва относительная подвижка противоположных блоков.

В последние годы были проведены значительные усилия по установлению величин сейсмических моментов прошлых землетрясений. Наиболее полный перечень землетрясений, для которых были вычислены значения сейсмических моментов, приводятся в упомянутой выше статье [213]. Для некоторых сильных землетрясений значения сейсмических моментов, заимствованные из [213], приведены в табл.1.8.

Таблица 1.8

| NN | Страна     | Место землетрясения | Дата землетрясения | Магнитуда $M_s$ по Рихтеру | Сейсмический момент $M_0 \cdot 10^{25}$ дин·см | Магнитуда землетрясения $M_w$ по моменту $M_0$ согласно (1.96) |
|----|------------|---------------------|--------------------|----------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1  | США        | Сан-Франциско       | 04/18/1906         | 7.8                        | 790                                            | 7.9                                                            |
| 2  | Китай      | Ганьсу              | 12/16/1920         | 8.5                        | 1200                                           | 8.02                                                           |
| 3  | Иран       | Салмас              | 05/06/1930         | 7.4                        | 60                                             | 7.15                                                           |
| 4  | США        | Лонг Бич            | 03/11/1933         | 6.3                        | 4.1                                            | 6.38                                                           |
| 5  | Турция     | Ерзнка              | 12/26/1939         | 7.8                        | 575                                            | 7.81                                                           |
| 6  | Япония     | Фукуи               | 06/28/1948         | 7.3                        | 33                                             | 6.98                                                           |
| 7  | Китай      | Деймскуги           | 11/18/1951         | 8.0                        | 365                                            | 7.67                                                           |
| 8  | Мексика    | Сан Мигуели         | 02/09/1956         | 6.9                        | 10                                             | 6.63                                                           |
| 9  | Югославия  | Скопье              | 07/26/1963         | 6.1                        | 1.1                                            | 5.99                                                           |
| 10 | Япония     | Ниигата             | 06/16/1964         | 7.5                        | 273                                            | 7.59                                                           |
| 11 | Турция     | Варго               | 08/19/1966         | 6.8                        | 23.5                                           | 6.88                                                           |
| 12 | Турция     | Гедиз               | 03/28/1970         | 7.1                        | 67                                             | 7.18                                                           |
| 13 | США        | Сан-Фернандо        | 02/09/1971         | 6.5                        | 10.4                                           | 6.64                                                           |
| 14 | Турция     | Бингел              | 05/22/1971         | 6.7                        | 10                                             | 6.63                                                           |
| 15 | Иран       | Оир-Карзини         | 04/10/1972         | 6.9                        | 15                                             | 6.75                                                           |
| 16 | Узбекистан | Газли               | 04/08/1976         | 7.0                        | 19.5                                           | 6.83                                                           |
| 17 | Алжир      | Эл Аснам            | 10/10/1980         | 7.3                        | 50.8                                           | 7.1                                                            |
| 18 | Армения    | Спитак              | 12/07/1988         | 6.8                        | 15.3                                           | 6.76                                                           |
| 19 | США        | Ломо-Приета         | 10/18/1989         | 7.1                        | 276                                            | 6.92                                                           |
| 20 | Япония     | Кобе                | 01/17/1995         | 7.2                        | 250                                            | 6.9                                                            |

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)  $\bar{u} = 1.22$  ( $u_{\max} = 2.0\text{м}$ ). Следовательно,  
 $M_0 = 38 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{11} \cdot 1.22 \cdot 10^2 = 15.298 \cdot 10^{25} \text{дин}\cdot\text{см}$ .

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  $M_w$ :

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7. \quad (1.96)$$

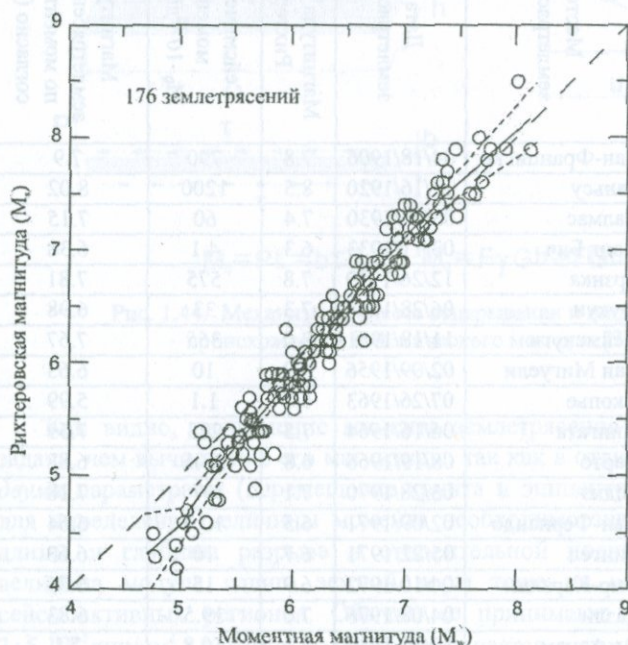


Рис. 1.45.  
 Связь между  
 магнитудой  
 Рихтера  $M_s$  и  
 моментной маг-  
 нитудой  $M_w$   
 [213].

Обработка статистических данных показала, что при землетрясениях умеренной силы значение моментной магнитуды  $M_w$ , вычисленное по формуле (1.96), оказывается меньше значения Рихтеровской магнитуды  $M_s$ , а при сильных землетрясениях, наоборот,  $M_w > M_s$ . В обоих случаях погрешность не превосходит 10%.



На рис. 1.45 на основании параметров 176 сильных землетрясений показано графическое изображение связи между  $M_s$  и  $M_w$ , где пунктирная линия соответствует зависимости согласно формуле (1.96).

## 1.16. МЕХАНИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Изложенное выше понятие сейсмического момента является простым наглядным примером, свидетельствующим о прямой связи между землетрясением и деформацией среды очаговой зоны. По современным представлениям считается установленным, что *землетрясение чисто механический процесс разрушения* пород земной коры с освобождением энергии, накопленной в краях литосферных плит в длительном сложном процессе нарастания деформации в период его подготовки. Поэтому при математическом моделировании процесса землетрясения необходимо исходить из основных уравнений механики сплошных сред.

Впервые идея о процессе землетрясения как о разрыве сплошности четко было отмечено Гарри Ридом (Reid) в 1910 году, после тщательного геодезического изучения перемещений по разлому Сан-Андреас при Сан-Францисском землетрясении 1906 года. В дальнейшем эта концепция возникновения землетрясения была названа *теорией "упругой отдачи"*. В основу своей теории Рид положил следующие предпосылки [73]:

- землетрясение происходит в тот момент, когда литосфера раскалывается вдоль поверхности, которая может быть определена как геологический разлом;
- землетрясению предшествует постепенное нарастание упругих напряжений по обе стороны разлома;
- во время землетрясения обе стороны разлома взаимно перемещаются на величину, которая точно соответствует полному снятию упругих напряжений вдоль разлома (рис.1.46).

Вот как объясняет процесс землетрясения сам Рид: "Единственный путь, которым могут разрядиться указанные напряжения – это относительное перемещение Земли на противоположных сторонах разлома и на некотором расстоянии от него. Мы приходим к выводу, что напряжения разрядились посредством медленного относительного смещения земли на противоположных сторонах разлома и практически параллельно ему и что эти смещения распространялись на значительное расстояние от разлома" [73].

Единственным неучтенным Ридом обстоятельством является то, что причиной противоположных перемещений земли может быть не только постепенное нарастание упругих напряжений, но и явление сползания (крипа) материалов грунта в направлении разлома. Хотя на значения

относительного смещения вдоль разлома могут влиять и вторичные мелкие разломы, которые всегда имеются в среде вокруг разлома.

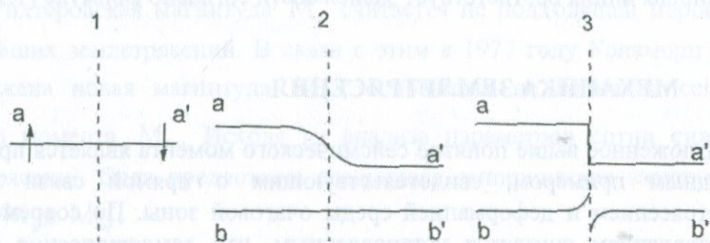


Рис. 1.46. Модель “упругой отдачи” Рида

для землетрясения со сдвиговым смещением [73]

- 1 – деформации отсутствуют,
- 2 – процесс накопления деформаций,
- 3 – образование относительной подвижки в результате упругой отдачи (землетрясения). Пунктиром показана линия разрыва.

Рид не указал причину и природу аккумулирующейся вокруг разлома энергии, поэтому его обвинили в “мистицизме”. Но уже начиная с 60-х годов XX столетия стало очевидным, что современные модели “тектоники плит” уже содержат основные элементы теории “упругой отдачи” Рида.

Сущность кинематической модели “тектоники плит”, как мы уже отметили, заключается в том, что литосфера Земли, разделенная на небольшое количество плит, обладает значительно большей жесткостью, чем подстилающая астеносфера, поэтому они (плиты) имеют возможность частично перемещаться как по поверхности астеносферы, так и относительно друг друга. Считается, что внутриплитовые деформации значительно меньше по сравнению с их относительными подвижками на краях, где именно и происходят землетрясения. Это говорит о том, что плиты можно рассматривать как жесткие тела, движения которых по астеносфере подчиняются кинематике твердых тел.

Дальнейшее развитие теории “упругой отдачи” нашло в работах многих авторов. При этом, учитывая, что реальный процесс разрушения горных пород очень сложен, были пренебрежены влияния ряда несущественных факторов и принято в качестве среды Земли изотропное упругое однородное полупространство. В частности, наибольшую известность получили работы В.Кейлиса-Борока, Б.Кострова, Л.Кнопова, Дж.Бруна, Дж.Райса, К.Касахара, К.Аки, П.Ричардса, В.Николаевского и др. по механике землетрясений и по теории изучения упругих волн. В общем случае землетрясение рассматривается как внезапное изменение физического состояния в локальной области внутри Земли. Предполагается, что в некоторый момент времени  $t=0$  внутри среды



прикладывается сила  $f(t)$ , которая за короткий промежуток времени возрастает от нуля до определяемого уровня и в дальнейшем остается постоянной. В динамике сооружений такое воздействие называется *внезапным или мгновенным нагружением* в отличие от обычного статического нагружения. Ставится вопрос: какие возмущения (перемещения) возникают в среде в последующие моменты времени.

Фактически начало механики землетрясения было заложено Лявым еще в 1892 году, когда он получил выражения для поля перемещений, вызванных силой, приложенной в некоторой точке бесконечной среды. Весь вопрос распространения этих уравнений на случай землетрясения заключается в том, каков характер этой силы в источнике (очаге). Главным критерием правильности выбора характера этих сил в очаге, естественно, должно быть соответствие характеру перемещений среды, зарегистрированных по сейсмограммам, записанным во время землетрясения в эпицентральной зоне. Выше уже было отмечено, что реальное напряженное состояние вокруг эпицентра представляет из себя чередующие друг друга области сжатия и растяжения, разделенные нодальными плоскостями (рис.1.17). Различные варианты землетрясения как точечного источника излучения энергии показаны на рис. 1.47. Так как до землетрясения среда находится в состоянии равновесия, то основным условием, которому должна удовлетворять та или другая модель, это то, что главный вектор и главный момент всех сил должны быть равны нулю.

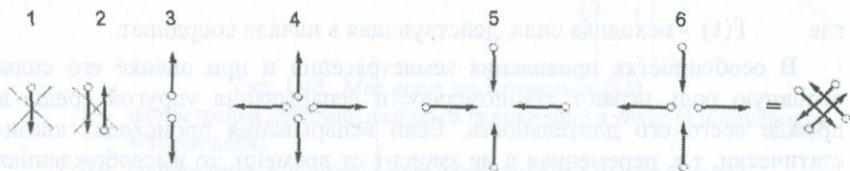


Рис. 1.47. Примеры точечных источников

1 – единичная сила; 2 – пара равных по величине и противоположных по направлению растягивающих сил с моментом; 3 – пара равных по величине и противоположных по направлению растягивающих сил; 4 – две пары растягивающих сил; 5 – две пары сжимающих сил; 6 – пара растягивающих и пара сжимающих сил, эквивалентных двум парам сил, у которых моменты относительно вертикальной оси равны по величине и противоположны по направлению. Существование источников типа 1 и 2 невозможно из-за отсутствия равновесия.

Из показанных на рис.1.47 моделей наиболее близко отражающих фактическую картину распределения напряжений вокруг очага (рис.1.17) при землетрясении, считается модель 6, которая эквивалентна двум парам сил – одна сжимающая, а другая растягивающая, которые равны по величине и действуют вдоль осей, перпендикулярных одна другой.

Эта модель представляется также как *двойной диполь без момента*. Соответствующее поле перемещений (обе пары сил принимаются действующими по осям  $x$  и  $y$  в плоскости  $xz$ ) представляется в виде [38]:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{4\pi\rho} \left[ 2 \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial y} (\varphi - \psi) + \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 \psi \right], \\ v &= -\frac{1}{4\pi\rho} \left[ 2 \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} (\varphi - \psi) + \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \psi \right], \\ w &= -\frac{1}{4\pi\rho} \left[ 2 \frac{\partial^3}{\partial x \partial y \partial z} (\varphi - \psi) \right], \end{aligned} \quad (1.97)$$

где  $u$ ,  $v$ ,  $w$  — компоненты перемещений в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\rho$  — плотность среды, а  $\varphi$  и  $\psi$  представляют собой сферические волны вида

$$\varphi = \frac{1}{r} F \left( t - \frac{r}{v_p} \right), \quad \psi = \frac{1}{r} F \left( t - \frac{r}{v_s} \right), \quad (1.98)$$

которые распространяются на расстояние  $r$  со скоростями  $v_p$  и  $v_s$ , а для функции  $F$  имеет место

$$f(t) = \frac{d^2 F(t)}{dt^2}, \quad (1.99)$$

где  $f(t)$  — исходная сила, действующая в начале координат.

В особенностях проявления землетрясения и при оценке его силы основную роль играют закономерности вспарывания упругой среды и прежде всего его длительность. Если вспарывания происходят квазистатически, т.е. переменная  $u$  не зависит от времени, то высвобожденная энергия будет равна нулю.

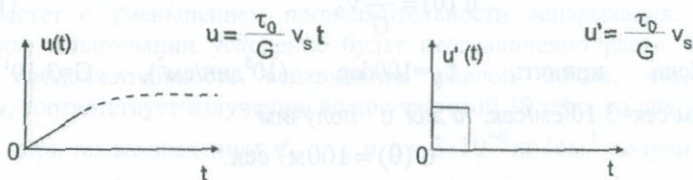
Наипростой подход будет состоять в том, если примем, что вспарывание происходит мгновенно. Это касается и снятия напряжения (касательных) и образования разрыва, т.е. принимаем, что разрядка напряжений и образование разрыва также происходят внезапно. В этом случае перемещение  $u$  вдоль разрыва будет некоторой функцией времени  $t$ . В частности, для точки в центре разрыва ( $x=0$ ) при мгновенном снятии напряжения (разгрузка) функцию  $u(t)$  Дж.Брун [16] принимает в следующем виде (рис.1.48а).

$$\begin{aligned} u(t) &= 0, \text{ при } t < 0 \\ u(t) &= \frac{\tau_0}{G} v_s t, \text{ при } 0 < t < \Delta t \end{aligned} \quad (1.100)$$

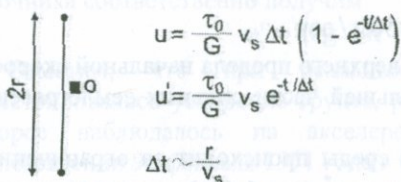


где  $\tau_0$  - эффективное касательное напряжение,  $G$  - модуль сдвига среды,  $v_s$  - скорость распространения волн сдвига,  $\Delta t$  - время, необходимое для распространения упругих волн от концов разрыва до центра ( $x=0$ ).

а. в точке вблизи плоскости разрыва



б. в точке О



в.

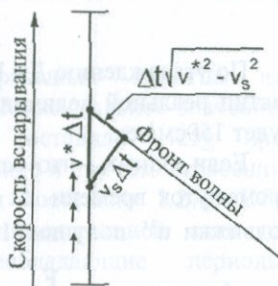


Рис. 1.48. Механика землетрясения [16]

- а - иллюстрация действия импульса напряжений в точке О поверхности испарения;
- б - приближенное представление перемещения в ближней зоне землетрясения для источника с ограниченными размерами;
- в - иллюстрация эффекта ограничения скорости приложения напряжений при сверхзвуковом испарении.

При этом смещение  $u$  направлено по касательной к поверхности разрыва. Для источника конечных размеров в  $2r$  перемещение представляется в виде (рис.1.48б)

$$u(t) = 0, \quad t < 0$$

$$u(t) = \frac{\tau_0}{G} v_s t (1 - e^{-t/\Delta t}) \quad 0 < t \leq \Delta t, \quad (1.101)$$

$$\text{где } \Delta t = \frac{r}{v_s}.$$

### Максимальные скорости и ускорения грунта вблизи источника.

Приведенные выше выражения для перемещения  $u(t)$  дают возможность вычислить оценочные начальные значения скоростей и ускорений частиц грунта вблизи источника (в эпицентре). Согласно (1.100) и (1.101), начальная скорость выразится [16]

$$u'(0) = \frac{\tau_0}{G} v_s. \quad (1.102)$$

Если принять  $\tau_0 = 100 \text{ бар}$  ( $10^8 \text{ дин/см}^2$ ),  $G = 3 \cdot 10^{11} \text{ дин/см}^2$ ,  $v_s = 3 \text{ км/сек} = 3 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ , то для  $u'$  получим

$$u'(0) = 100 \text{ м/сек.}$$

При  $\tau_0 = 133 \text{ бар}$ , которое, по расчетам Риды, имело место при Сан-Францисском землетрясении 1906 года, получим  $u' = 133 \text{ м/сек}$ . Если принять  $G = 5 \cdot 10^{11} \text{ дин/см}^2$  при тех же значениях  $\tau_0$  и  $v_s$  получим

$$u'(0) = 166 \text{ м/сек.}$$

По утверждению Дж.Бруна, для верхнего предела начальной скорости частиц реальной величиной при большей части сильных землетрясений будет  $150 \text{ см/сек}$ .

Если считать, что испаривание среды происходит за ограниченный промежуток времени  $\Delta t$  со скоростью  $v^*$  (рис.1.48в), то для ускорения подвижки  $u''$  получим [16]

$$u'' = \frac{F}{m} = \frac{v^* \cdot l \cdot \Delta t \cdot \tau_0}{\rho \Delta t \sqrt{v^{*2} - v_s^2} \cdot \frac{v_s \Delta t}{2}}, \quad (1.103)$$

где величина

$$F = v^* \cdot l \cdot \Delta t \cdot \tau_0$$

суммарное напряжение (сосредоточенная сила), действующее на площадке единичной глубины и  $v^* \Delta t$  ширины за промежуток времени  $\Delta t$ , а

$$m = \rho \cdot l \cdot \frac{v_s \Delta t \cdot \sqrt{v^{*2} - v_s^2} \Delta t}{2}$$

масса среды, находящейся в объеме с единичной глубиной и треугольной поверхностью со сторонами (катетами)  $\Delta t v^*$  и  $\Delta t \cdot \sqrt{v^{*2} - v_s^2}$ , за тот же промежуток времени  $\Delta t$ .

Если скорость испаривания  $v^*$  значительно больше, чем скорость



поперечной волны  $v_s$ , из (1.103) получим:

$$u'' = \frac{2\tau_0}{\rho v_s \Delta t}. \quad (1.104)$$

Из выражения (1.104) видно, что ускорения частиц грунта в ближней зоне существенно зависит от продолжительности вспарывания. Оно сильно растет с уменьшением продолжительности вспарывания. При мгновенном вспарывании ускорение будет неограниченно расти. Если принять продолжительность вспарывания равной 0.1сек, что, по Дж.Бруну, соответствует излучению волн с частотой 10 герц, то для ускорения  $u''$  при тех же значениях  $\tau_0$ ,  $v_s$  и  $\rho = 3 \cdot 10^{-6}$  кг/см<sup>3</sup> получим:

$$u'' = \frac{2 \cdot 10^2}{3 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 0.1} = 2 \cdot 10^3 \text{ см/сек}^2 \approx 2g. \quad (1.105)$$

При  $\Delta t = 0.2$  (5 герц) и  $\Delta t = 0.4$  (2.5 герц) для ускорения вблизи источника соответственно получим

$$u'' = 1.0g \text{ и } u'' = 0.5g.$$

Отметим, что при реальных землетрясениях никогда не регистрировалось ускорение грунта, равное 2g. Максимальное значение, которое наблюдалось на акселерограммах, составило 1.25g при землетрясении 9о февраля 1971 года в Сан-Фернандо и при землетрясении 26 мая 2003 года на северо-востоке Японии составило 1.27g. Обе акселерограммы были зарегистрированы в эпицентральной зоне на скальных породах, которые имели преобладающие периоды соответственно 0.2 и 0.15 сек (5.0 и 6.6 герц). При этом акселерограф при землетрясении в Сан-Фернандо был расположен на гребне скалы, что по видимому также стало причиной записи большего ускорения.

Таким образом, величина ускорения грунта в ближней зоне существенно зависит от продолжительности вспарывания  $\Delta t$  или от частоты колебания частиц среды. Для очень плотных пород вспарывание может происходить с очень большой частотой колебания частиц и в этих случаях значение ускорения грунта может достичь 2g. С другой стороны, у специалистов по сейсмостойкости сооружений такие ускорения не вызывают больших опасений, так как, во-первых, эти ускорения с удалением от эпицентра быстро затухают (особенно для строительных площадок с непрочными осадочными породами) и, во-вторых, ускорения с такими большими частотами вызывают в обычных зданиях и сооружениях сильные дребезжания и не приводят к образованию в них больших перемещений и напряжений. Исключения могут составлять надгробные каменные и другие сооружения небольших размеров, которые могут поворачиваться, наклоняться или целиком опрокидываться.

По динамическим задачам распространения упругих волн из-за вспарывания среды или роста трещин (разрывов) имеются обширные

исследования, посвященные учету влияния размеров очага, кинематического характера относительной подвижки блоков, ориентации плоскости разрыва и при его выходе на поверхность Земли, влияния рельефа местности и др. Причем решения не всех задач из-за их сложности и неоднозначности дают возможность прогнозировать значения параметров колебания поверхности Земли при землетрясениях. Пока только можно констатировать, что ускорения грунта при сильных землетрясениях в эпицентральной зоне могут достигать  $1.0g$  и более, а скорости до  $100\text{м/сек}$  и более. Одновременно следует отметить, что авторы указанных исследований придерживаются такого мнения, что вероятностная ошибка указанных оценок может достигать  $100\%$ . Так что в этих вопросах пока имеется много неопределенностей.

Таблица 1.9

| Частоты гармонических колебаний (в герцах), соответствующие данным амплитудам $u$ и ускорениям $u''$ грунта |          |       |      |     |     |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------|------|-----|-----|------|
| $u''$<br>в долях $g$                                                                                        | $u$ , см |       |      |     |     |      |
|                                                                                                             | 0.0001   | 0.001 | 0.01 | 0.1 | 1.0 | 10.0 |
| 1.0                                                                                                         | 500      | 160   | 50   | 16  | 5   | 1.6  |
| 0.5                                                                                                         | 356      | 113   | 36   | 11  | 3.6 | 1.1  |
| 0.1                                                                                                         | 160      | 50    | 16   | 5   | 1.6 | 0.5  |
| 0.01                                                                                                        | 50       | 16    | 5    | 1.6 | 0.5 | 0.16 |
| Жирные цифры указывают на колебания, ожидаемые при землетрясениях умеренной силы.                           |          |       |      |     |     |      |

В заключение отметим, что волны с максимальными смещениями грунта не совпадают с максимальным ускорением грунта. Максимальные ускорения связаны с малыми амплитудами, а большие амплитуды грунта с низкими частотами и ускорениями. Наглядным доказательством сказанному служат данные, приведенные в табл.1.9, заимствованные из работы Рихтера [67], с некоторыми дополнениями.

## 1.17. 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, которая измеряется по физически точной шкале. Чтобы судить о конкретной мощности 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, из формулы (1.47), выведенной для интенсивности потока энергии при распространении сейсмических волн, видно, что энергия сейсмических волн пропорциональна квадрату амплитуд колебания частиц  $A$ . С другой стороны, так как магнитуда землетрясения  $M$  согласно ее определению пропорциональна десятичному логарифму тех же амплитуд колебания частиц  $A$ , то очевидно, что должна иметь место зависимость:

$$\lg E = aM + b,$$

где  $a$  и  $b$  некоторые эмпирические постоянные. Для калифорнийских землетрясений, принимая  $v_s = 3,4 \text{ км/с}$ ,  $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$  и  $h = 16 \text{ км}$  (вероятная глубина очага), рассматривая землетрясение как точечный источник, излучающий цуг гармонических волн однородно по всем направлениям, Гутенберг и Рихтер получили следующую эмпирическую зависимость:

$$\lg E = 1.5M + 11.8, \quad (1.106)$$

где  $E$  – энергия землетрясения, выраженная в эргах,  $M$  – магнитуда землетрясения. Отметим, что  $1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,8 \cdot 10^7 \text{ эрг} = 9,8 \text{ джоуль}$ ,  $1 \text{ кВ} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ дж} = 3,6 \cdot 10^{13} \text{ эрг}$ .

Для зависимости между  $E$  и  $M$  различными авторами были предложены следующие линейные зависимости:

$$\begin{aligned} \lg E &= 1.5M + 11.4 && \text{Рихтер,} \\ \lg E &= 1.8M + 11.3 && \text{Гутенберг-Рихтер,} \\ \lg E &= 2.15M + 9.15 && \text{Филиппо-Марчелли.} \end{aligned} \quad (1.107)$$

Б.Гутенбергом была получена также нелинейная зависимость в виде:

$$\lg E = 1.9M - 0.024M^2 + 9.9. \quad (1.108)$$

Разница в величине магнитуды, вычисленной по формулам (1.106) - (1.108), может достигнуть до 0,5 и более. В настоящее время наиболее приемлемой считается формула (1.106). 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  $8 \cdot 10^{20} \text{ эрг}$ , а энергия современной одной мегатонной атомной бомбы составляет приблизительно  $5 \cdot 10^{22} \text{ эрг}$ , 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 12000 атомных бомб, сброшенных на Хиросиму, или сумме энергий 200 одной мегатонных современных

атомных бомб. Во время Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года величина выделяемой энергии достигла  $110 \cdot 10^{20}$  эрг, что равносильно сумме энергий 14 хиросимовских 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 разрушительнее, чем землетрясение с магнитудой  $M=6$ , а не в 10 раз, как это вытекает из определения магнитуды. Ниже в табл.1.10 приведены величины энергии при землетрясениях с различными магнитудами, вычисленные по формуле (1.106).

Таблица 1.10

| Магнитуда землетрясения | Энергия землетрясения $E$ - в джоулях |
|-------------------------|---------------------------------------|
| -2                      | 60                                    |
| -1                      | 2000                                  |
| 0                       | 60000                                 |
| 1                       | 2000000                               |
| 2                       | 60000000                              |
| 3                       | 2000000000                            |
| 4                       | 60000000000                           |
| 5                       | 2000000000000                         |
| 6                       | 60000000000000                        |
| 7                       | 2000000000000000                      |
| 8                       | 60000000000000000                     |
| 9                       | 200000000000000000                    |

На рис. 1.49 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.



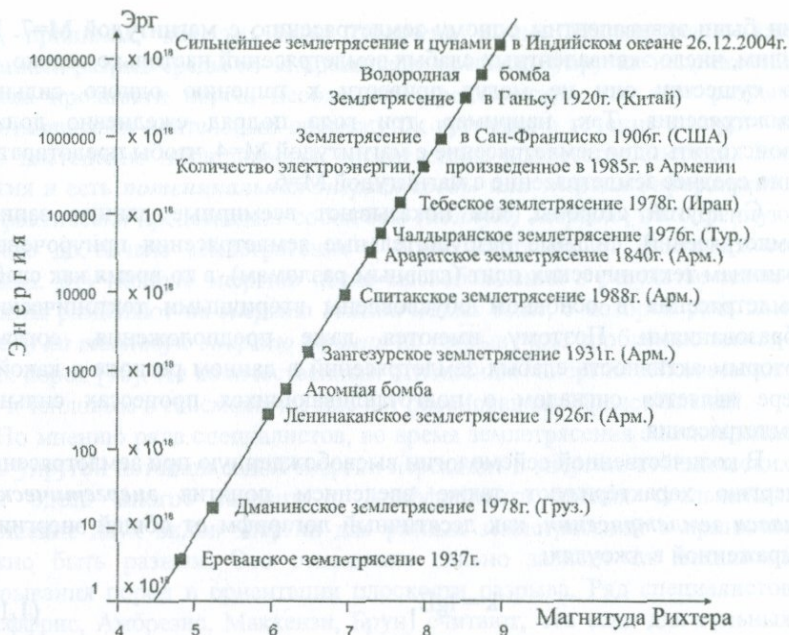


Рис. 1.49. Связь между энергией и магнитудой землетрясения.

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 (1.106), будут иметь значения, приведенные в табл. 1.11.

Таблица 1.11

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

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  $M=6$ .

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  $E$ , выраженной в джоулях:

$$k = \lg E, \quad (1.109)$$

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 Раутнан в виде

$$k = 1.8M + 4, \quad (1.110)$$

согласно которой при  $M=5$ ,  $k=13$ , при  $M=7.2$   $k=17$ , при  $M=9$ ,  $k=20.2$ . Из логарифмической зависимости между  $E$  и  $M$  вытекает, что двукратное изменение (увеличение или уменьшение) величины энергии землетрясения находится в пределах интервала возможной погрешности при определении его магнитуды с точностью до величины 0.2.

## 1.18. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФОРМАЦИИ СРЕДЫ В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Количество энергии, о которой шла речь в предыдущем параграфе, фактически — это кинетическая энергия сейсмических волн, распространяющихся в теле Земли после землетрясения, т.к. ее мы определили через магнитуду, а магнитуду установили по величине зарегистрированного перемещения частиц (сейсмограмму) на поверхности Земли. Вместе с



этим, принимая, как это было отмечено выше, землетрясение как внезапный разрыв среды из-за превышения величин упругих напряжений предела прочности пород, необходимо предполагать, что этот разрыв подготавливался длительный промежуток времени, в течение которого в среде постепенно накапливалось определенное количество энергии. Эта энергия и есть *потенциальная энергия среды или энергия деформации*. Она фактически представляет собой *всю (полную) энергию*, накопленную в среде до начала землетрясения в обеих сторонах от фактического разрыва. Эту полную энергию после высвобождения в результате землетрясения разделяют на *энергию сейсмических волн*, о которой речь шла выше, и на *тепловую энергию трения* по разрыву или дроблению вмещающих пород [16]. По количественным отношениям энергии сейсмических волн к тепловым в сейсмологии еще нет обоснованных представлений.

По мнению ряда специалистов, во время землетрясения значительная часть упругой потенциальной энергии переходит в энергию сейсмических волн. Здесь многое зависит от коэффициента трения скольжения. Отношение двух видов энергии для разных землетрясений в принципе должно быть разным. Это отношение сильно зависит от механизма вспарывания пород и ориентации плоскости разрыва. Ряд специалистов (Джеффрис, Амбрезис, Маккензи, Брун) считают, что если для сильных землетрясений напряжение трения превышает определенную величину, то по плоскостям разрыва должно происходить плавление. По расчетам Д.Тёркота и Дж.Шуберта [79], для плавления пород значение напряжения  $\tau$  должно быть около 180 МПа, что значительно велико для обычных землетрясений. Наибольшая вероятность такого землетрясения, когда холодная континентальная плита вталкивается в горячую мантию, т.е. в зоне субдукции. Но упоминания о таких явлениях в литературе очень редки.

В общем случае полная потенциальная энергия, накопленная в упругой среде, выражается следующим образом [16, 81]:

$$E = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{xz} \gamma_{xz}) dV, \quad (1.111)$$

где  $\sigma_{ij}$ ,  $\tau_{ij}$  и  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\gamma_{ij}$  - компоненты соответственно напряжения (нормальных и касательных) и деформации,  $V$  - объем напряженно-деформированной среды.

**Поставим следующую задачу.** Как определить полную потенциальную энергию (1.111) после землетрясения, имея его *последствия на поверхности Земли: длина разрыва  $L$ , глубина разрыва  $h$  и относительная подвижка по линии простирания разрыва  $\bar{u}$* .

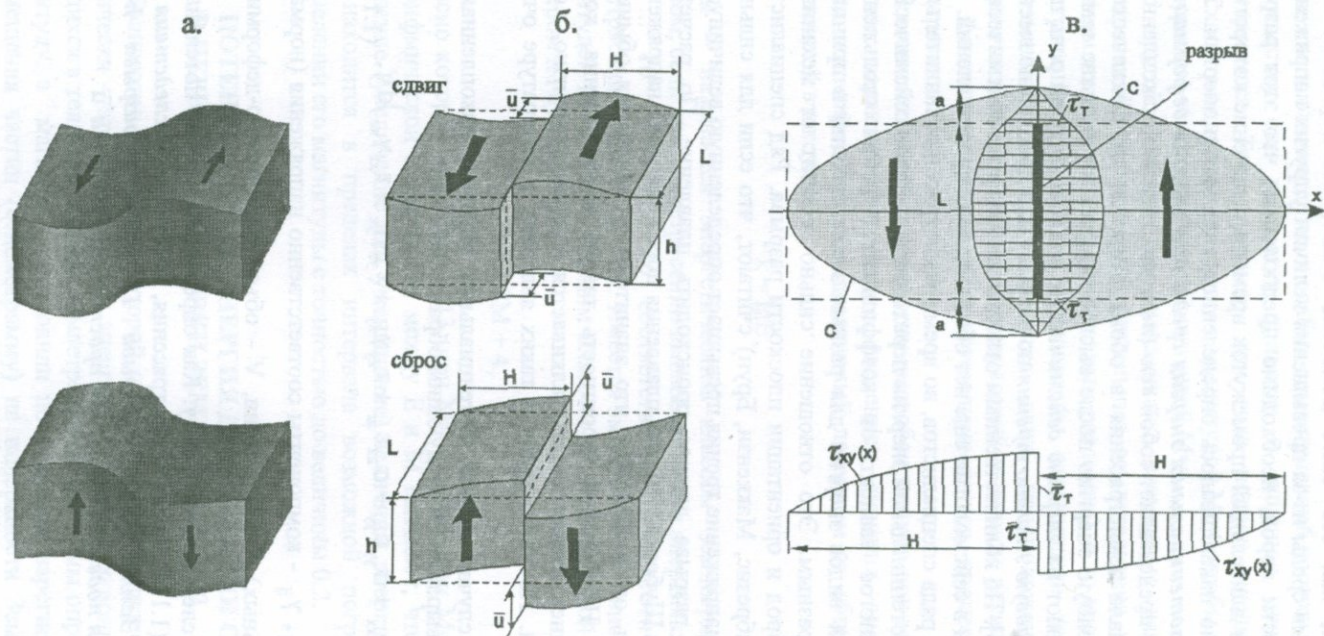


Рис. 1.50. а – схематическое изображение напряженного состояния среды до образования разрыва, б – после образования разрыва в среде, в – распределение сдвиговых напряжений,  $\tau_T$  - предельное сопротивление пород. Стрелками показаны направления медленных движений блоков.



На рис.1.50 показано схематическое распределение напряженно-деформированного состояния среды до и после образования разрыва и касательных напряжений у разрыва в перпендикулярном к разрыву направлении, где  $\tau_T$  - предельное касательное напряжение разрушения пород, обычно доходящего от 50 до 150 кг/см<sup>2</sup>.

Естественно, в первом приближении, предполагать что напряженно-деформированное состояние среды в обеих областях налево и направо от будущего разрыва имеют одинаковый характер.

Наиболее существенным параметром этих областей является глубина проникновения  $H$  (в перпендикулярном к разрыву направлении) ощутимых касательных напряжений и деформаций в параллельном направлении по простиранию разрыва. Будем считать, что напряженно-деформированное состояние вокруг будущего разлома на поверхности Земли имеет вид, показанный на рис.1.50 в заштрихованной области, ограниченной некоторой замкнутой кривой  $C$ . Таким образом, считаем, что вне области  $C$  напряжения и деформации среды значительно малы и поэтому при определении общей потенциальной энергии ими можно пренебречь. Из рисунка видно, что область ощутимых напряжений и деформаций, ограниченной кривой  $C$ , можно заменить эквивалентной прямоугольной областью со сторонами  $2H$  и  $L$ , показанными пунктирными линиями. Иными словами, будем считать, что до начала землетрясения напряженно-деформированное состояние среды было распределено в двух прямоугольных параллелепипедах со сторонами  $L$ ,  $H$  и  $h$ , где  $h$  — глубина разрыва (размер блока по глубине рис.1.50б),  $L$  — длина свершившегося разрыва на поверхности Земли,  $H$  — минимальное расстояние от разлома, дальше которого среду можно считать не напряженным от подготавливаемого землетрясения. Предположим, что в последней стадии подготовки землетрясения каждый из этих двух параллелепипедов имел деформацию, равную  $u/2$ , а после разрыва — относительную деформацию, равную  $u$ . Относительная подвижка по длине разрыва обычно имеет неравномерное распределение [79]. Поэтому целесообразно в качестве величины подвижки для всей длины разлома  $L$  принимать некоторое среднее значение  $\bar{u}$ . Для ряда сильных землетрясений такое вычисление  $\bar{u}$  было произведено в работе Д.Л.Веллса и К.Н.Коппершмидта [213], по мнению которых именно по величине средней подвижки  $\bar{u}$  имеет место постоянный относительный сдвиг по всей ширине  $L$  и глубине  $h$  спаренных плоскостей разрыва.

**Границы областей деформирования вокруг разрыва.** Теперь рассмотрим вопрос определения пределов областей ощутимых деформаций в процессе подготовки землетрясения до самой последней стадии, после чего происходит разрыв.

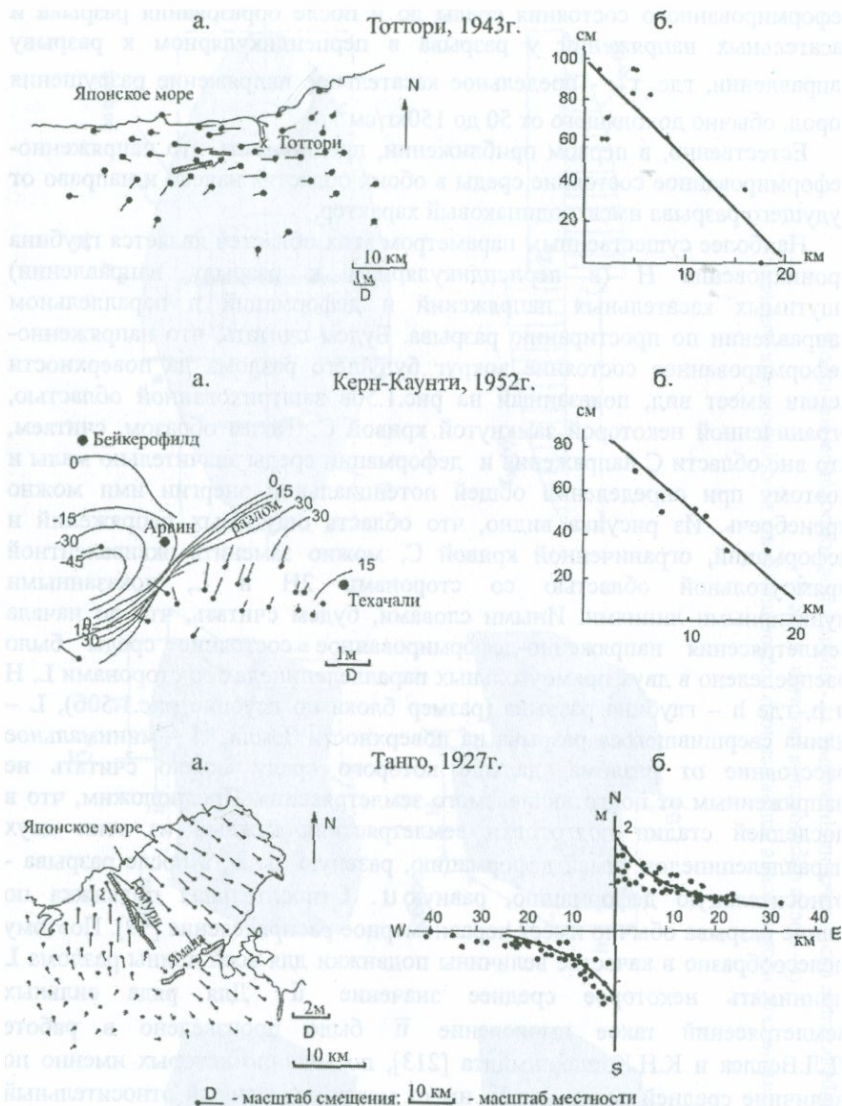


Рис. 1.51. Горизонтальные смещения пунктов триангуляции при землетрясениях (а) в Тоттори, Кери-Каунти и Танго и убывание горизонтальных смещений, параллельных разрыву по мере удаления от него (б) [65].



Как отметили выше, впервые измерение таких деформаций с помощью геодезической триангуляции, произведенной до и после землетрясения, были получены Ридом для Калифорнийского землетрясения 1906г. Много таких графических зависимостей для десятка японских и американских землетрясений приведено в работе по прогнозированию землетрясений Т.Рикитакэ [65].

Для трех землетрясений такие зависимости, заимствованные из вышеупомянутой работы, показаны на рис.1.51. Они дают возможность иметь определенное суждение о степени количественного убывания величины деформации по мере удаления от линии разрыва в перпендикулярном к нему направлении. На основании этих и других аналогичных результатов, приведенных в той же книге, предлагается следующая аналитическая зависимость для расстояния глубины ощутимых деформаций  $H$  (в метрах) от среднего относительного перемещения (подвижки) на разрыве  $\bar{u}$  (в метрах):

$$H = (5\bar{u} + 15) \cdot 10^3. \quad (1.112)$$

Согласно (1.112), если допустим, что относительная средняя подвижка блоков равна  $\bar{u} = 1\text{м}$ , то на расстоянии  $H = 10^3(5 \cdot 1 + 15) = 20\text{км}$  от разлома в ту и другую сторону по всей длине разлома  $L$ , то есть вне площади  $L \cdot 2H$ , перемещение среды до образования разрыва (равно как и после образования разрыва-землетрясения) считается равным нулю; при  $\bar{u} = 2\text{м}$ ,  $H = 25\text{км}$ . Соотношение (1.112) применимо только для **сильных землетрясений**, при которых на поверхности Земли образовался разрыв с относительной подвижкой не менее 10см, чтобы точность ее измерения в полевых условиях не играла существенной роли. Естественно предполагать, что предлагаемая зависимость (1.112) для отдельных землетрясений может привести к результатам, существенно отличающимся от регистрированных реальных результатов. Полезную роль в корректировке таких зависимостей может играть решение модельных задач методами теории упругости. В книге К.Касахара [38], на основании решения задач теории упругости для модели вертикального разлома со смещением по простиранию, представляющего собой бесконечно длинную полосу, пересекающую поверхность упругого полупространства, находящегося в условиях однородного сдвига (решение Л.Кнопва), приводится зависимость перемещения  $u$  на поверхности Земли в направлении простирания разрыва от координаты  $x$  в перпендикулярном направлении в виде:

$$u(x) = \frac{u_{\max}}{2} \left[ \sqrt{\left(\frac{x}{D}\right)^2 + 1} - \frac{x}{D} \right], \quad (1.113)$$

где  $u_{\max}$  - максимальная амплитуда подвижки бортов разрыва,  $D$  - верти-

кальная протяженность разлома (глубина разрыва  $h$ ). Максимальная подвижка  $u_{\max}$  связана с другими параметрами следующим образом:

$$u_{\max} = \frac{2 \Delta \sigma D}{G}, \quad \Delta \sigma = \frac{1}{2} \frac{G u_{\max}}{D}, \quad (1.114)$$

где  $\Delta \sigma$  означает сброс напряжений при образовании разрыва,  $G$  – модуль сдвига.

Убывающая зависимость (1.113) позволяет оценить величину проникновения ощутимых деформаций  $H$ . Так, если ограничивать пространством, для которого перемещения меньше  $\alpha u_{\max}$  ( $\alpha < 1$ ) считать фактически отсутствующими, где  $\alpha$  – отношение перемещения по формуле (1.113) на расстояние  $x=H$  от разрыва  $u(H)$  к максимальному перемещению у разрыва  $u(0)$  в точке  $x=0$ , то из (1.113), получим

$$\frac{u_{\max}}{2} \left[ \sqrt{\left(\frac{H}{D}\right)^2 + 1} - \frac{H}{D} \right] = \frac{\alpha u_{\max}}{2},$$

откуда для  $H$  получим

$$H = \frac{1 - \alpha^2}{2\alpha} D. \quad (1.115)$$

При  $\alpha = 0.2$  и глубине очага  $D=h=10$  км для  $H$  по формуле (1.115) получим  $H=24$  км. Для разных значений  $\alpha$  и  $h$  значения  $H$  приведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12

| $h$ (км) | Значения $H$ (км) при |                 |                |
|----------|-----------------------|-----------------|----------------|
|          | $\alpha = 0.1$        | $\alpha = 0.15$ | $\alpha = 0.2$ |
| 10       | 49                    | 32              | 24             |
| 15       | 74                    | 49              | 36             |
| 20       | 98                    | 64              | 48             |

В приложении упомянутой работы Касахара для территории Японии приводится также формула для определения радиуса области деформирования  $r$  (в км) в зависимости от магнитуды  $M$  землетрясения в виде:

$$\lg r = 0.51M - 2.27, \quad (1.116)$$

по которой также можно иметь представление о вышеупомянутой глубине  $H$  ощутимых деформаций. По этой формуле для землетрясений с магнитудами  $M=6$ ,  $M=7$  и  $M=8$  соответственно получим  $r = 6$  км, 20 км и 64 км. Результаты вычисления значений  $H$  для 44 землетрясений с параметрами



$M_s$ ,  $h$ ,  $\bar{u}$  по табл.1.13 по трем формулам (1.112), (1.113) и (1.116) показали, что величины  $H$  отличаются не более чем 2 раза, что можно считать приемлемым по аналогии с такими оценками при установлении величин других сейсмологических параметров: магнитуда, интенсивность, энергия очага и др.

**Потенциальная энергия деформации.** Теперь, имея значения средней подвижки  $\bar{u}$ , длину разрыва  $L$ , его глубину  $h$  и протяженность ощутимых деформаций  $H$ , вычислим потенциальную энергию по формуле (1.111). Если принимать, что область  $L \cdot 2H$  подвергалась чистому сдвигу, будем иметь:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0 \quad \tau_{xy} = \tau(x), \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x}, \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0 \quad (1.117)$$

$$\tau(x) = G \frac{\partial u}{\partial x}, \quad dV = Lh dx \quad 0 \leq x \leq H$$

И, следовательно, для потенциальной энергии получим:

$$E_d = 2 \frac{1}{2} \int_0^H \tau(x) \frac{\partial u}{\partial x} Lh dx = \frac{2LhG}{2} \int_0^H \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 dx. \quad (1.118)$$

В качестве зависимости  $u(x)$  примем более простую функцию

$$u(x) = \frac{\bar{u}}{2} \cos \frac{\pi x}{2H}, \quad (1.119)$$

которая удовлетворяет граничным условиям задачи (рис.1.52)

$$\begin{aligned} \text{при } x=0 \quad u &= \frac{\bar{u}}{2} \\ \text{при } x=H \quad u &= 0. \end{aligned} \quad (1.120)$$

С учетом (1.119) для потенциальной энергии  $E$  получим

$$E_d = 2 \int_0^H \frac{LhG}{2} \frac{\bar{u}^2}{4} \frac{\pi^2}{4H^2} \sin^2 \frac{\pi x}{2H} dx.$$

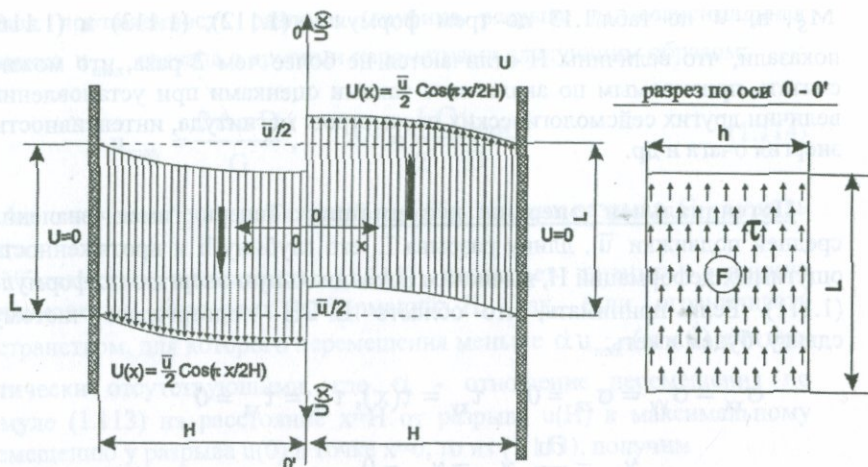


Рис. 1.52. Деформационная схема блоков в момент разрыва (после разрыва).

Производя операцию интегрирования получим, следующую несложную формулу

$$E_d = \frac{\pi^2}{32} \frac{LhG}{H} \bar{u}^2 \quad \text{или} \quad E_d = 0.308 \frac{LhG}{H} \bar{u}^2. \quad (1.121)$$

Значение энергии  $E_d$  по формуле (1.118) было вычислено также принимая за функцию убывания перемещений  $u(x)$  по выражению (1.113). В этом случае для  $E_d$  будем иметь:

$$E_d = \frac{2LhG}{2} \int_0^H \frac{\bar{u}^2}{4D^2} \left[ \frac{\frac{x^2}{D^2}}{\left(\frac{x}{D}\right)^2 + 1} - \frac{2x}{D\sqrt{\left(\frac{x}{D}\right)^2 + 1}} + 1 \right] dx, \quad (1.122)$$

после интегрирования которого получим

$$E_d = \frac{LhG}{4} \frac{\bar{u}^2}{D^2} \left[ 2H - D \arctg \frac{H}{D} - 2D \left( \sqrt{\frac{H^2}{D^2} + 1} - 1 \right) \right]. \quad (1.123)$$

Как показали вычисления, выражения в квадратных скобках при условии (1.115) между  $H$  и  $D$  независимо от  $\alpha$  равно  $0.43D$ . Таким образом, для  $E_d$  в этом случае имеем:

$$E_d = \frac{0.1075}{D} LhG \bar{u}^2. \quad (1.124)$$

Сравнение этого значения со значением  $E_d$  по основной формуле



(1.121) показывает, что при  $\alpha = 0.17$  ( $H=2.86D$ ) они полностью совпадают. При других значениях  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 0.2$ ) различие между значениями  $E_d$  по формулам (1.121) и (1.124) не превышает 10-15%.

При самой простой прямолинейной зависимости функции перемещения в виде:

$$u(x) = \frac{\bar{u}}{2} \left( 1 - \frac{x}{H} \right)$$

для потенциальной энергии  $E_d$  по формуле (1.118) получим:

$$E_d = \frac{LhG\bar{u}^2}{4H} = 0.25 \frac{LhG}{H} \bar{u}^2, \quad (1.125)$$

что отличается от  $E_d$  по формуле (1.121) всего на 15%. Таким образом, при заданном  $\bar{u}$  и  $H$  характер убывающей функции перемещения  $u(x)$  не играет существенной роли при определении величины потенциальной энергии.

Воспользуясь формулой (1.121), вычислим значение  $E$  для Спитакского землетрясения 1988 года по следующим параметрам [213]:

$$L=38\text{км}=38 \cdot 10^5\text{см}, \quad h=11\text{км}=11 \cdot 10^5\text{см},$$

$$u_{\max} = 2\text{м} = 200\text{см}, \quad \bar{u} = 1,22\text{м} = 122\text{см}.$$

$$H = 10^3 \cdot (5 \cdot 1,22 + 15) = 21,1\text{км} = 21,1 \cdot 10^5\text{см}$$

$$G = 5 \cdot 10^{11} \text{дин/см}^2$$

$$E_d = \frac{9,87 \cdot 38 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{11} \cdot (122)^2}{32 \cdot 21,1 \cdot 10^5} = 454726 \cdot 10^{16} \text{дин} \cdot \text{см}$$

$$E_d = 0,45 \cdot 10^{22} \text{ эрг.}$$

Энергетический класс землетрясения  $k_d$  будет

$$k_d = \lg E_d - 7. \quad (1.126)$$

Подставляя значение  $E_d$ , получим

$$k_d = \lg 0,45 \cdot 10^{22} = \lg 0,45 + 22 - 7 = -0,34 + 15 = 14,66.$$

Для сравнения вычислим величину  $k_s$  по магнитуде  $M_s$ , представив традиционную формулу (1.106) в виде:

$$k_s = \lg E_s = 11,8 + 1,5M_s - 7 = 1,5M_s + 4,8. \quad (1.127)$$

Для Спитакского землетрясения с магнитудой  $M=6,8$  получим

$$k_s = 1,5 \cdot 6,8 + 4,8 = 15.$$

Как видим, разница величин энергетических классов по формуле (1.126) и (1.127) незначительная.

Аналогичным образом для 44 сильных землетрясений по формулам (1.126) и (1.127) вычислены значения  $k_d$  и  $k_s$ , приведенные в табл. 1.13.

Таблица 1.13

| №   | Страна         | Место землетрясения | Дата землетрясения | Тип разрыва | Магнитуда зем-я, $M_s$ | Протяженность разрыва $L$ (км) | Глубина разрыва $h$ (км) | Максимальная подвижка $U_{max}$ (м) | Средняя подвижка $\bar{U}$ (м) | Величина $H$ по формуле (1.112) (км) | Энергетические классы зем-я $K_1$ и $K_2$<br>по энергии $E_2$ по (1.126)<br>по магнитуде $M_s$ по (1.127) |
|-----|----------------|---------------------|--------------------|-------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | США            | Fort Tejon          | 09.01.1857         | RL          | 8.3                    | 297                            | 12                       | 9.4                                 | 6.4                            | 47                                   | 16.68                                                                                                     |
| 2.  | США            | Owens Valley        | 26.03.1872         | RL-N        | 8.0                    | 108                            | 15                       | 11                                  | 6.0                            | 45                                   | 16.30                                                                                                     |
| 3.  | Япония         | Nobi                | 27.10.1891         | LL          | 8.0                    | 80                             | 15                       | 8.0                                 | 5.04                           | 40.25                                | 16.06                                                                                                     |
| 4.  | Япония         | Rikuu               | 31.08.1896         | R           | 7.2                    | 40                             | 21                       | 4.4                                 | 2.59                           | 27.95                                | 15.49                                                                                                     |
| 5.  | США            | San Francisco       | 18.04.1906         | RL          | 7.8                    | 432                            | 12                       | 6.1                                 | 3.3                            | 31.5                                 | 16.44                                                                                                     |
| 6.  | США            | Pleasant Valley     | 03.10.1915         | N           | 7.6                    | 62                             | 15                       | 5.8                                 | 2.0                            | 25                                   | 15.36                                                                                                     |
| 7.  | Китай          | Kansu               | 16.12.1920         | LL          | 8.5                    | 220                            | 20                       | 10.0                                | 7.25                           | 51.20                                | 17.55                                                                                                     |
| 8.  | Япония         | North Izu           | 25.11.1930         | LL-R        | 7.3                    | 35                             | 12                       | 3.8                                 | 2.9                            | 29.5                                 | 15.26                                                                                                     |
| 9.  | Китай          | Kehetuohai          | 10.08.1931         | RL          | 7.9                    | 180                            | 20                       | 14.6                                | 7.38                           | 51.9                                 | 16.76                                                                                                     |
| 10. | Турция         | Erzincan            | 26.12.1939         | RL          | 7.8                    | 360                            | 20                       | 7.5                                 | 1.85                           | 24.25                                | 16.19                                                                                                     |
| 11. | США            | Imperial Valley     | 19.05.1940         | RL          | 7.2                    | 60                             | 11                       | 5.9                                 | 1.5                            | 22.5                                 | 15.01                                                                                                     |
| 12. | Китай          | Damxiong            | 18.11.1951         | RL          | 8.0                    | 200                            | 10                       | 12.0                                | 8.0                            | 55                                   | 16.55                                                                                                     |
| 13. | США            | Dixie Valley        | 16.12.1954         | RL-N        | 6.8                    | 45                             | 14                       | 3.8                                 | 2.1                            | 25.5                                 | 15.22                                                                                                     |
| 14. | Турция         | Abant               | 26.05.1957         | RL          | 7.0                    | 40                             | 8                        | 1.65                                | 0.55                           | 17.75                                | 13.92                                                                                                     |
| 15. | Монголия       | Gobi-Alai           | 04.12.1957         | LL          | 7.9                    | 300                            | 20                       | 9.4                                 | 6.54                           | 47.7                                 | 16.92                                                                                                     |
| 16. | США            | Hebgen Lake         | 18.08.1959         | N           | 7.6                    | 45                             | 17                       | 6.1                                 | 2.14                           | 25.7                                 | 15.32                                                                                                     |
| 17. | Иран           | Dash-e-Bayaz        | 31.08.1968         | LL          | 7.1                    | 110                            | 20                       | 5.2                                 | 2.3                            | 26.5                                 | 15.83                                                                                                     |
| 18. | Турция         | Gediz               | 28.03.1970         | N           | 7.1                    | 63                             | 17                       | 2.8                                 | 0.86                           | 19.3                                 | 14.80                                                                                                     |
| 19. | США            | San Fernando        | 09.02.1971         | R-LL        | 6.5                    | 17                             | 14                       | 2.5                                 | 1.5                            | 22.5                                 | 14.56                                                                                                     |
| 20. | Китай          | Luhuo               | 06.02.1973         | LL          | 7.3                    | 110                            | 13                       | 3.6                                 | 1.3                            | 21.5                                 | 15.24                                                                                                     |
| 21. | Гватемала      | Metagua             | 04.02.1976         | LL          | 7.5                    | 257                            | 13                       | 3.4                                 | 2.6                            | 28.0                                 | 16.09                                                                                                     |
| 22. | Турция         | Caldiran            | 24.11.1976         | RL          | 7.3                    | 90                             | 18                       | 3.5                                 | 2.05                           | 25.25                                | 15.62                                                                                                     |
| 23. | Иран           | Bob-Tangol          | 19.12.1977         | RL          | 5.8                    | 14                             | 12                       | 0.3                                 | 0.12                           | 15.6                                 | 12.38                                                                                                     |
| 24. | Греция         | Thezzaloniki        | 20.06.1978         | N           | 6.4                    | 28                             | 14                       | 0.22                                | 0.08                           | 15.4                                 | 12.40                                                                                                     |
| 25. | Иран           | Tabs-e-Golshan      | 16.09.1978         | R           | 7.5                    | 74                             | 22                       | 3.0                                 | 1.5                            | 22.5                                 | 15.39                                                                                                     |
| 26. | США            | Homestead Valley    | 15.03.1979         | RL          | 5.6                    | 6                              | 4                        | 0.1                                 | 0.05                           | 15.25                                | 10.78                                                                                                     |
| 27. | Австралия      | Cadoux              | 02.06.1979         | R           | 6.1                    | 16                             | 6                        | 1.5                                 | 0.5                            | 17.5                                 | 13.32                                                                                                     |
| 28. | США            | El Centro           | 15.10.1979         | RL          | 6.7                    | 51                             | 12                       | 0.8                                 | 0.18                           | 15.9                                 | 13.28                                                                                                     |
| 29. | Иран           | Koli                | 27.11.1979         | LL-R        | 7.1                    | 75                             | 22                       | 3.9                                 | 1.2                            | 21.0                                 | 15.24                                                                                                     |
| 30. | Алжир          | El Asman            | 10.10.1980         | R           | 7.3                    | 55                             | 15                       | 6.5                                 | 1.54                           | 22.7                                 | 15.12                                                                                                     |
| 31. | Италия         | South Apennines     | 23.11.1980         | N           | 6.9                    | 60                             | 15                       | 1.15                                | 0.64                           | 18.2                                 | 14.49                                                                                                     |
| 32. | Греция         | Corinth             | 25.02.1981         | N           | 6.4                    | 19                             | 16                       | 1.5                                 | 0.6                            | 18.0                                 | 13.97                                                                                                     |
| 33. | Греция         | Corinth             | 04.03.1981         | N           | 6.4                    | 26                             | 18                       | 1.1                                 | 0.6                            | 18.0                                 | 14.16                                                                                                     |
| 34. | США            | Borah Peak          | 28.10.1983         | N-LL        | 7.3                    | 33                             | 20                       | 2.7                                 | 0.8                            | 19.0                                 | 14.53                                                                                                     |
| 35. | Алжир          | Constantine         | 27.10.1985         | LL          | 5.9                    | 21                             | 13                       | 0.12                                | 0.1                            | 15.5                                 | 12.43                                                                                                     |
| 36. | Австралия      | Murray Creek        | 30.03.1986         | R-LL        | 5.8                    | 13                             | 3                        | 1.3                                 | 0.5                            | 17.5                                 | 12.93                                                                                                     |
| 37. | Греция         | Kalamata            | 13.09.1986         | N           | 5.8                    | 15                             | 14                       | 0.18                                | 0.15                           | 15.75                                | 12.66                                                                                                     |
| 38. | Новая Зеландия | Edgecumbe           | 02.03.1987         | N           | 6.6                    | 32                             | 14                       | 9.9                                 | 1.7                            | 23.5                                 | 14.93                                                                                                     |
| 39. | США            | Superstition Hills  | 24.11.1987         | RL          | 6.6                    | 30                             | 11                       | 0.92                                | 0.54                           | 17.7                                 | 13.92                                                                                                     |
| 40. | Австралия      | Tennant Creek       | 22.01.1988         | R           | 6.3                    | 13                             | 9                        | 1.3                                 | 0.63                           | 18.15                                | 13.59                                                                                                     |
| 41. | Китай          | Lancang Geigina     | 06.11.1988         | RL          | 7.3                    | 80                             | 20                       | 1.5                                 | 0.7                            | 18.5                                 | 14.81                                                                                                     |
| 42. | Армения        | Spitak              | 07.12.1988         | R-RL        | 6.8                    | 38                             | 11                       | 2.0                                 | 1.22                           | 21.1                                 | 14.65                                                                                                     |
| 43. | Канада         | Ungava              | 25.12.1989         | R           | 6.3                    | 10                             | 5                        | 2.0                                 | 0.8                            | 19.0                                 | 13.41                                                                                                     |
| 44. | США            | Landers             | 28.06.1992         | RL          | 7.6                    | 62                             | 12                       | 6.0                                 | 2.95                           | 29.75                                | 15.52                                                                                                     |

Примечание: RL – правосторонний сдвиг; LL – левосторонний сдвиг; R – взброс; N – сброс.  
 Великое значение энергии землетрясения  $E=10^9$  в джоулях или  $E=10^6$  в эргах.



Все данные табл. 1.13 заимствованы из статьи Д.Веллса и К.Коппершмидта [213], в которой обобщены макросейсмические параметры очаговых зон 244 сильных землетрясений за 1853-1993 годы. Мы использовали только те землетрясения, для которых в статье имелись все три параметра ( $L$ ,  $h$ ,  $\bar{u}$ ), которые позволяют привести вычисление энергии по формуле (1.121). Основное заключение из полученных результатов состоит в том, что величины энергии, вычисленные по предлагаемой формуле (1.121), в основном подчиняются общеизвестным закономерностям, согласно которым величина высвобожденной энергии растет с ростом протяженности образовавшегося на поверхности разрыва  $L$ , глубины разрыва  $h$  и относительной подвижки спаренных блоков  $\bar{u}$ . Эти зависимости графически изображены на рис.1.53. Соответствующие их формулы имеют вид ( $E_d$  – в джоулях,  $L$  и  $h$  в км,  $\bar{u}$  – в м):

$$\begin{aligned} k_d &= 2.74 \lg L + 10.04 \\ k_d &= 2.46 \lg \bar{u} + 14.62 \\ k_d &= 0.19h + 11.89 \\ k_d &= 1.79M_s + 2.16. \end{aligned} \tag{1.128}$$

Из последнего графика, приведенного на рис. 1.53 видно, что значения энергетических классов, рассмотренных землетрясений, вычисленные по предлагаемой формуле (1.126), и соответствующие их магнитуды  $M_s$  связаны линейной зависимостью

$$k_d = 1.79M_s + 2.16,$$

которая свидетельствует о том, что и по предлагаемому способу определения энергии, как и по традиционному, имеет место линейная зависимость энергии от магнитуды землетрясения. Среднее отклонение значений  $k_s - k_d$  по формулам (1.126) и (1.127) не превышает 0.46.

Как видно из табл. 1.13, энергетические классы большинства землетрясений, за исключением 3-5 землетрясений с относительной подвижкой  $\bar{u}$  менее чем 0.2м, вычисленные по формулам (1.126) и (1.127), имеют одинаковый порядок. Среднее их отклонение составляет 0.66 (рис.1.54). Из рисунка видно также, что небольшое отклонение, как и следовало ожидать, имеет место для слабых землетрясений с средней подвижкой  $\bar{u} < 0.20$ м; при их исключении из расчетов среднее отклонение составит около 0.5, т.е. не превышает одной единицы энергетического класса  $k$ . Так как обе формулы являются приближенными и полуэмпирическими, такое различие можно считать естественным. Например, известно, что при установлении величины магнитуды  $M_s$  возможная величина ошибки может в среднем достигать  $\pm 0.5$ . Это соответственно при определении  $k$  по формуле (1.127) приведет к ошибке в 1.5 раза большей, т.е.  $\pm 0.75$ .

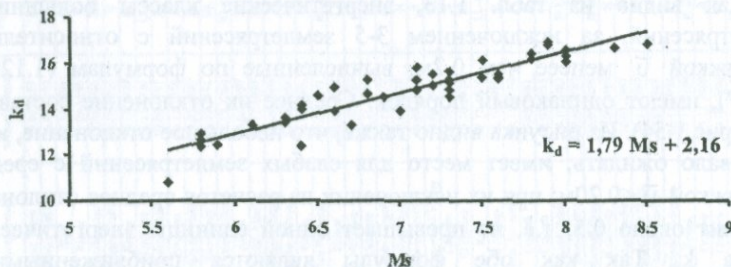
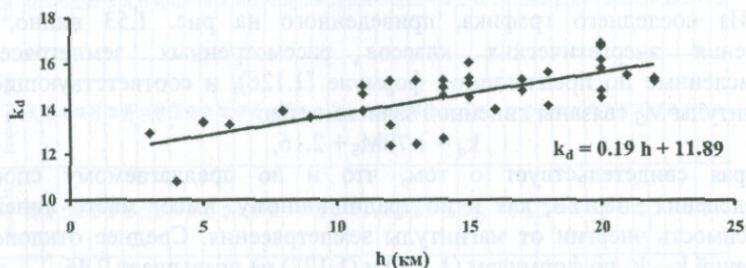
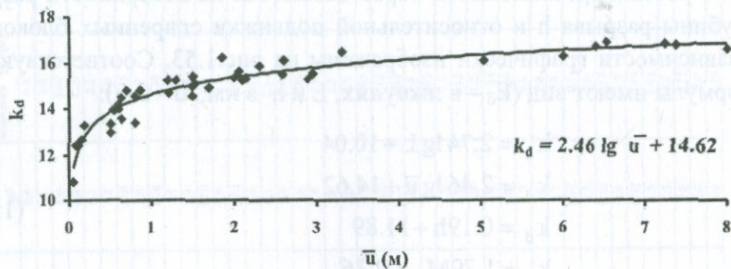
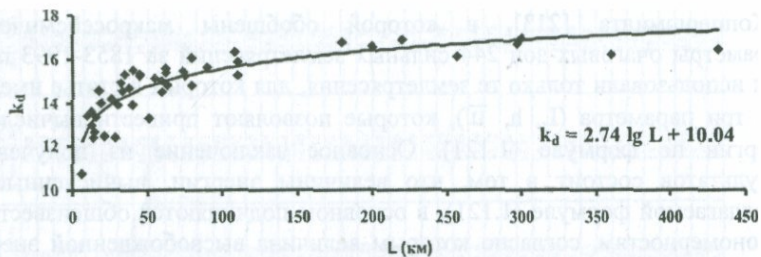


Рис. 1.53. Зависимости между энергетическим классом землетрясений  $k_d$  и протяженностью разрыва  $L$ , относительной подвижкой  $\bar{u}$ , глубиной разрыва  $h$ , магнитудой  $M_s$  согласно формулам (1.121) (1.126) и данным табл.1.13.



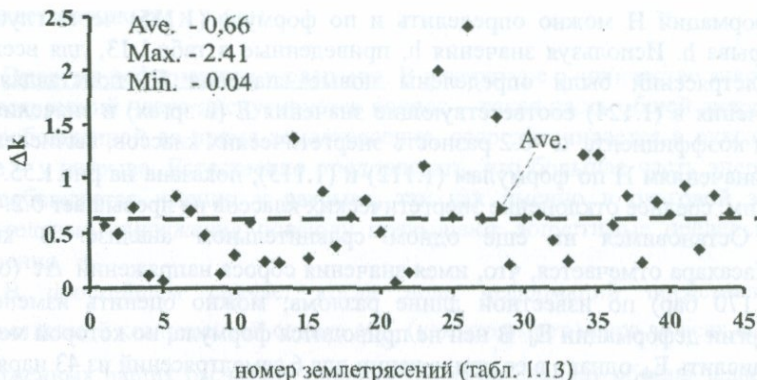


Рис. 1.54. Разность энергетических классов землетрясений  $\Delta k = k_s - k_d$ , рассчитанных по магнитуде землетрясения по формуле (1.127) и по потенциальной энергии по формуле (1.126).

С другой стороны, при выводе формулы (1.121) была принята во внимание только одна компонента подвижки по разрыву. Однако известно, что большинство землетрясений имело более сложную кинематику подвижки, поэтому вычисленные по формуле (1.121) значения энергии для таких землетрясений будут наименьшими.

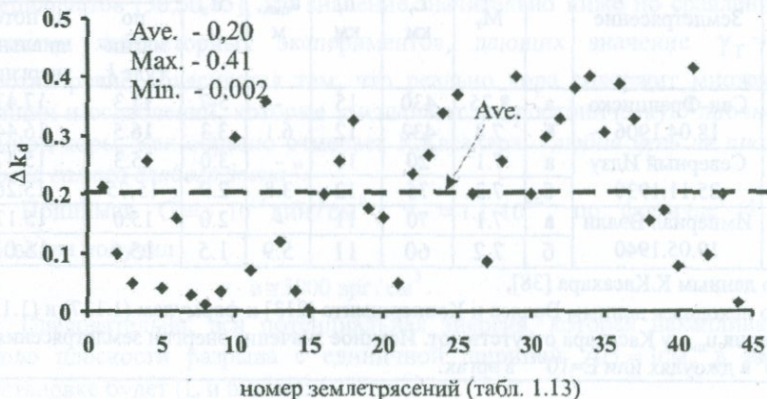


Рис. 1.55. Разность энергетических классов землетрясений  $\Delta k_d$ , рассчитанных по значениям энергии по формулам (1.121) и (1.124) при вычислении  $H$  по формуле (1.112) и по формуле (1.115) при  $\alpha = 0.2$ .

Выше было отмечено, что глубину проникновения осязаемых деформаций  $H$  можно определить и по формуле (1.115) через глубину разрыва  $h$ . Используя значения  $h$ , приведенные в табл.1.13, для всех 44 землетрясений были определены новые значения  $H$ , подставляя их значения в (1.124) соответствующие значения  $E$  (в эргах) и значения  $k_d$ . Для коэффициента  $\alpha = 0.2$  разность энергетических классов, вычисленная по значениям  $H$  по формулам (1.112) и (1.115), показана на рис.1.55. Как видим, среднее отклонение энергетических классов не превышает 0.2.

Остановимся на еще одном сравнительном анализе. В книге К.Касахара отмечается, что, имея значения сброса напряжений  $\Delta t$  (от 20 до 170 бар) по известной длине разлома, можно оценить изменение энергии деформации  $E_d$ . В ней не приводится формула, по которой можно вычислить  $E_d$ , однако в ее приложении для 6 землетрясений из 43 наряду с параметрами очагов землетрясений приводятся также значения их энергии по сейсмическим волнам  $E_s$  и изменение энергии деформаций при образовании разлома.

Для трех из рассмотренных нами землетрясений NN5, 8, 11 (табл.1.13) эти параметры и соответствующие энергетические классы  $k_s$  и  $k_f$ , вычисленные по  $E_s$  и  $E_d$ , приведены в табл.1.14. В этой же таблице приведены для сравнения аналогичные параметры этих же землетрясений и соответствующие значения  $k_s$  и  $k_d$ , вычисленные по формулам (1.127) и (1.126).

Таблица 1.14

| N<br>N | Землетрясение                |   | $M_s$ | $L$ ,<br>км | $h$ ,<br>км | $u_{max}$ ,<br>м | $\bar{u}$ ,<br>м | Энергетический класс |                                |
|--------|------------------------------|---|-------|-------------|-------------|------------------|------------------|----------------------|--------------------------------|
|        |                              |   |       |             |             |                  |                  | по магнитуде $k_s$   | по потенциальной энергии $k_d$ |
| 5      | Сан-Франциско<br>18.04.1906  | a | 8.25  | 430         | 15          | -                | 5-7              | 17.3                 | 17.47                          |
|        |                              | б | 7.8   | 432         | 12          | 6.1              | 3.3              | 16.5                 | 16.44                          |
| 8      | Северный Идзу<br>25.11.1930  | a | 7.1   | 20          | 11          | -                | 3.0              | 15.3                 | 15.47                          |
|        |                              | б | 7.3   | 35          | 12          | 3.8              | 2.9              | 15.75                | 15.26                          |
| 11     | Империял Вэлли<br>19.05.1940 | a | 7.1   | 70          | 11          | -                | 2.0              | 15.0                 | 15.17                          |
|        |                              | б | 7.2   | 60          | 11          | 5.9              | 1.5              | 15.6                 | 15.01                          |

а - по данным К.Касахара [38],  
б - по исходным данным Веллса и Коппершмита [213] и формулам (1.127) и (1.126)  
Значения  $u_{max}$  у Касахара отсутствуют. Истинное значение энергии землетрясения  $E=10^k$  в джоулях или  $E=10^{k+7}$  в эргах.

Как видно из таблицы, полученные результаты по двум землетрясениям N8 и N11 имеют хорошую сходимость. Что касается землетрясения N5, то незначительное различие между двумя результатами при расчете  $k_s$  обусловлено осязаемым различием исходной магнитуды землетрясения  $M_s$  (соответственно 8.25 и 7.8), а при расчете  $k_d$  -



двукратным различием между исходной средней подвижкой  $\bar{u}$  у разрыва (соответственно 6м и 3.3.м).

**Энергия деформации у разрыва.** В литературе о количестве энергии землетрясений часто дискутируется вопрос – какая часть общей энергии, высвобожденной во время землетрясения, сосредоточивается в очаговой зоне – у разрыва. Естественно предполагать, что большая часть энергии высвобождается именно у разрыва, так как именно в очаговой зоне касательные напряжения повсюду превышают допустимые предельные значения.

В простейшем случае, когда поле деформаций представлено единственной компонентой сдвига  $\gamma_{xy}$  (как это имеет место во всех выше изложенных наших расчетах), энергия среды на единицу объема задается в виде [38]:

$$e = \frac{1}{2} G \gamma_T^2, \quad (1.129)$$

где  $\gamma_T$  – предельная сдвиговая деформация коры.

По различным оценкам предельная деформация  $\gamma_T$  изменяется в пределах

$$\gamma_T = (1 \div 2) 10^{-4}.$$

Считается, что земная кора до этого уровня деформируется упруго, но никогда не переходит за этот предел без разрушения. По мнению ряда специалистов [38,50,65], это значение значительно ниже по сравнению с данными лабораторных экспериментов, дающих значение  $\gamma_T = 10^{-3}$ . Противоречие объясняется тем, что реально кора содержит множество трещин и ослаблений, которые уменьшают макроскопическую прочность земной коры. Как образно отмечает К.Касахара, “любая цепь не прочнее своего самого слабого звена”.

Принимая  $G = 5 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>,  $\gamma_T = 1.1 \cdot 10^{-4}$ , по формуле (1.129) Касахара получил

$$e \approx 3000 \text{ эрг/см}^3.$$

Следовательно, вся потенциальная энергия, которая накапливалась около плоскости разрыва с единичной шириной  $\Delta H = 1$  см, в нашей постановке будет ( $L$  и  $h$  в см):

$$E_f = L \cdot h \cdot 1 \cdot e = 3000 Lh \text{ эрг},$$

а соответствующий энергетический класс

$$k_f = \lg E_f - 7. \quad (1.130)$$

Подставляя в формулу (1.130) значения  $L$  и  $h$  из табл. 1.13, были вычислены значения энергии деформации у разрыва  $E_f$  для рассмотренных 44 землетрясений и соответствующие энергетические классы  $k_f$ . Сравнительная оценка отношений энергии у разрыва  $k_f$  и всей энергии среды  $k_d$  по табл. 1.13, показана на рис.1.56. Из рисунка видно, что  $k_f/k_d$  в среднем составляет 0.63. Образовавшиеся после землетрясения разрывы обычно не имеют одну геометрическую правильную плоскость, а представляют собой некоторое пространство разрозненных сегментов, с определенным расстоянием  $\Delta H$  (в перпендикулярном к разрыву направлении) между собою.



Рис. 1.56. Отношения значений энергетических классов землетрясений у разрыва  $k_f$  к классу общей энергии  $k_d$  всей деформированной среды при  $\Delta H=1\text{см}$ .

Это расстояние условно можно принимать как ширину разрыва и, следовательно, считать, что во всем объеме  $L \cdot h \cdot \Delta H$  среды (очаговой зоне) до землетрясения деформации достигли предельного значения  $\gamma_T$  и, следовательно, потенциальная энергия у разрыва будет:

$$E_f = 3000 \cdot L \cdot h \cdot \Delta H \text{ эрг.}$$

Поэтому в действительности величина энергетического класса  $k_f$  у очаговой зоны землетрясения будет значительно больше указанного выше  $0.63k_d$  при  $\Delta H=1\text{см}$ . В табл. 1.15 приводятся средние значения энергетических характеристик  $k_f/k_d$ ,  $k_d-k_f$  и  $E_d/E_f$  (по 44 землетрясениям), вычисленные вышеприведенным способом для значения  $\Delta H$  от 1см до  $10^5\text{см}$ . Из таблицы видно, что в зависимости от условной ширины  $\Delta H$  разрыва количество энергии, высвобожденной у очаговой зоны, существенно растет с увеличением  $\Delta H$  и при  $\Delta H=10^5\text{см}=1\text{км}$  отношение  $k_f/k_d$  достигает 0.97, а  $E_d/E_f$  — 35% общей высвобожденной при землетрясении энергии.



| Средние значения по 44 землетрясениям | Условная ширина разрыва $\Delta H$ в см |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                       | 1                                       | $10^1$ | $10^2$ | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ |
| $k_f / k_d$                           | 0.63                                    | 0.70   | 0.77   | 0.84   | 0.91   | 0.97   |
| $k_d - k_f$                           | 5.46                                    | 4.46   | 3.46   | 2.46   | 1.46   | 0.46   |
| $E_d / E_f$                           | 288000                                  | 28800  | 2880   | 288    | 28.8   | 2.88   |

Афтершоковый процесс, начинавшийся в постсейсмический период, обусловлен наличием в среде некоторой доли энергии деформации вне зоны разрыва. Поле накопления деформаций до землетрясения обычно имеет очень сложную структуру, связанную с неоднородным распределением прочностных и плотностных характеристик пород, наличием трещин и разрывов от прошлых землетрясений. Поэтому основной толчок будет служить спусковым механизмом для последующих афтершоков (в ослабленных в прочностном отношении структурах) до нового равновесного состояния всей деформированной в предсейсмический период среды. Естественно ожидать, что очаги афтершоков в основном должны располагаться по линии главного разрыва и вокруг него. Согласно [38] афтершоки и деформации поверхности имеют тенденцию располагаться в одной и той же области вокруг эпицентра. В свете рассмотренного выше понятия области ощутимых деформаций - это означает, что афтершоки, рассмотренных выше 44 землетрясений, будут располагаться на площади  $2H_L$ . При этом большое количество афтершоков косвенно будет свидетельствовать о наличии большого количества участков пород с ослаблением различной степени вокруг главного разрыва.

### 1.19. 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 происхо-

\* С неоднородностью среды в гипоцентральной области и наличия в ней мелких предваряющих трещин, образованных в результате предыдущих сильных землетрясений, по мнению К.Моги, можно объяснить также возникновение форшоков сильных землетрясений.

дит в Тихоокеанском кольцевом поясе: 80% слабых, 90% средних и почти все глубокофокусные землетрясения [38]. 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 10-40км. Для глубокофокусных землетрясений глубина очага доходит до 700км, а поверхностные толчки имеют глубину порядка нескольких километров. В табл. 1.16 приведены некоторые характерные статистические данные общего характера.

Таблица 1.16

| 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                                           |

*Количество ежегодно высвобождающейся во всем мире при землетрясениях энергии составляет от  $10^{25}$  до  $10^{26}$  эрг [14].* 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 [38]. Для *среднегодового числа землетрясений  $N$  (повторяемость)* имеет место следующее соотношение Гутенберга-Рихтера в зависимости от магнитуды  $M$  [38]:

$$\lg N = a + b(8 - M), \quad (1.131)$$

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 формуле (1.131) 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*

$$\lg L = 1.32M - 7.99 \quad (1.132)$$

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

$$\lg u = 0.55M - 3.71 \quad (1.133)$$

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

$$\lg A = M - 3 \lg \Delta + 2.92 \quad (1.134)$$

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

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

$$\lg r = 0.51M - 2.27 \quad (1.135)$$

- *площадь деформации на поверхности  $Q$ , в  $\text{см}^2$*

$$\lg Q = 1.02M + 5.96 \quad (1.136)$$

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

$$\lg(L/v_r) = 0.5M - 1.9 \quad (1.137)$$

- *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  $\text{см}^2$*

$$\lg Q' = 1.02M + 6.0 \quad (1.138)$$

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

$$\text{для } M < 3 \quad \lg T = 0.47M - 1.79 \quad (1.139)$$

$$\text{для } M > 5 \quad \lg T = 0.51M - 2.59 \quad (1.140)$$

- *энергия землетрясения  $E$ , в эрг*

$$\lg E = 1.5M + 11.8 \quad (1.141)$$

- *интенсивность  $I$ , в баллах*

$$I = 1.5M - 3.5 \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 3 \quad (1.142)$$

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

- **максимальное ускорение  $a$**  (в долях  $g$ ) **и скорость  $v$  грунта** (в см/сек)

$$\frac{a}{g} = \frac{5.7e^{0.8M}}{(\Delta + 40)^2}, \quad v = \frac{32e^M}{(\Delta + 25)^{1.7}}. \quad (1.143)$$

По утверждению С.С.Григорьяна [22] “Все вышеприведенные соотношения являются чисто эмпирическими и не получили пока рационального истолкования, которые базировались бы на ясных представлениях о механизме подготовки и возникновения отдельного землетрясения и о возможном взаимодействии таких отдельных процессов подготовки и возникновения землетрясений разной энергии друг с другом в данном сейсмоактивном регионе”. В работе [22] дано объяснение процессам разрушения пород и возникновения землетрясений с точки зрения современной механики и на этой основе интерпретация физического содержания вышеприведенных эмпирических соотношений.

## 1.20. 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 Бохайванезаливе к востоку от Тяньцзиня. В 1975 году в г.Хайчене 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 150км восточнее Гарма, спустя 6 часов после оповещения.

Детальная программа по предсказанию землетрясений была составлена в Японии. В 1962г. Исследовательская группа в составе Т.Цубои, К.Вадати 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 1978г. ( $M=7.4$ ), 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 [50] 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 полными 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 свершения. 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 предвестниковых 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*.

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 *лавинно-неустойчивая модель разрушения*, которая основывается на современных представлениях разрушения твердых тел. Согласно этой схеме или модели ИФЗ, которая исключает роль воды, дилатансия способствует развитию хаособразно распространенных в породах старых трещин и появлению новых (рис.1.57а). 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.

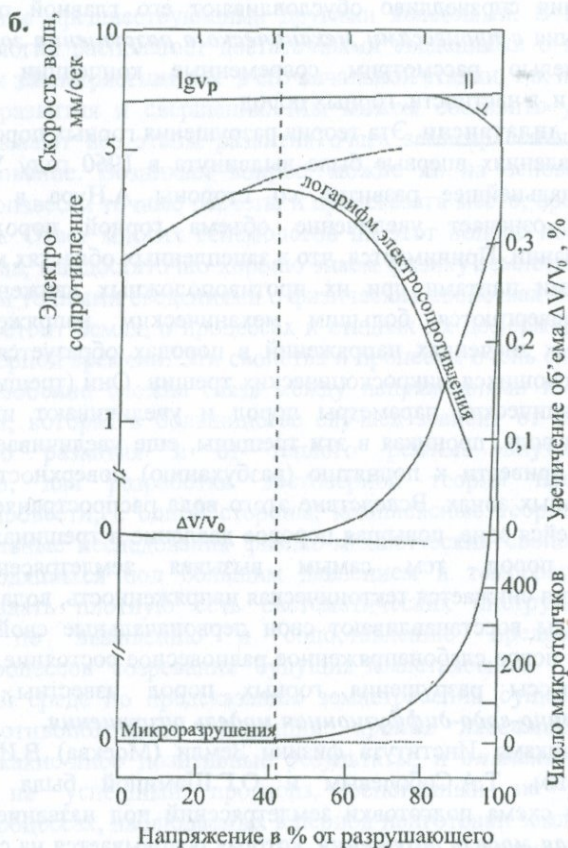
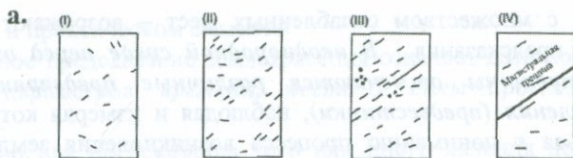


Рис. 1.57.

- а. Развитие процессов разрушения пород на четырех основных стадиях сейсмического цикла (модель ИФЗ) (I) – межсейсмическая, (II) – предсейсмическая, (III) – косейсмическая (землетрясение), (IV) – постсейсмическая [38].
- б. Изменение физических свойств гранита под действием сжимающего напряжения. Символы || и ⊥ обозначают соответственно компоненты скорости волны, параллельную и перпендикулярную оси сжимающего напряжения [65, 38], вертикальная пунктирная линия соответствует началу дилатансии.



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 [38].

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 [38, 65], показана на рис.1.576. 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 следует статистическому, в первую очередь преследует цель – оценки величины магнитуды будущего землетрясения по накопленным деформациям (подвижкам) и напряжениям в окрестностях разломов разной степени активности [38]. Так, согласно нормам сейсмостойкого строительства США [212], 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 2мм/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 землетрясениями, 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 толчком 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 озобоченность* в смысле последования 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 12.06.1964г., Ташкент 25.04.1966г., Сан-Фернандо 9.02.1971г.). 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 сейсмонаклонометрическая 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 должно выражаться в эпицентральной зоне, где механическое напряженное состояние горных пород перед землетрясением существенно изменяется. Фиксация стабильных отклонений от обычных уровней воды может служить предвестником ожидаемого землетрясения. Такой предвестник наблюдался перед землетрясением в Канто (9.05.1974 г.) и в Пржевальском (июнь 1970 г.), перед рядом землетрясений на территории Китая [65].

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-кинкой 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 [21].

**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 1855г. в Токио; за два часа перед землетрясением падение железных предметов, притянутых к подковообразному магниту размером около 1м, 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 [65]). Заметные изменения геомагнитного поля как предвестника землетрясений обнаружены при землетрясениях в Мацусиро (1965-1967), Акита (1970), афтершоках землетрясения в Идзу-Осима-кинкой (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 гамм  $\gamma = 10^{-5}$  Гс). Поэтому к результатам ранних наблюдений стали относиться скептически [65]. 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 [65].

**Изменения отношений скоростей распространения сейсмических волн.** Экспериментальные исследования показывают, что при приложении к образцу горной породы внешние силы 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 [50]. 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), как это показано на рис.1.58. 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 [14,21]. Поэтому многие американские сейсмологи считают, что этот предвестник не приемлем для территории Калифорнии, где землетрясения в основном имеют сдвиговый



характер в отличие от землетрясений на территории Таджикистана, где землетрясения имеют взбросовый (сбросовый) характер [65].

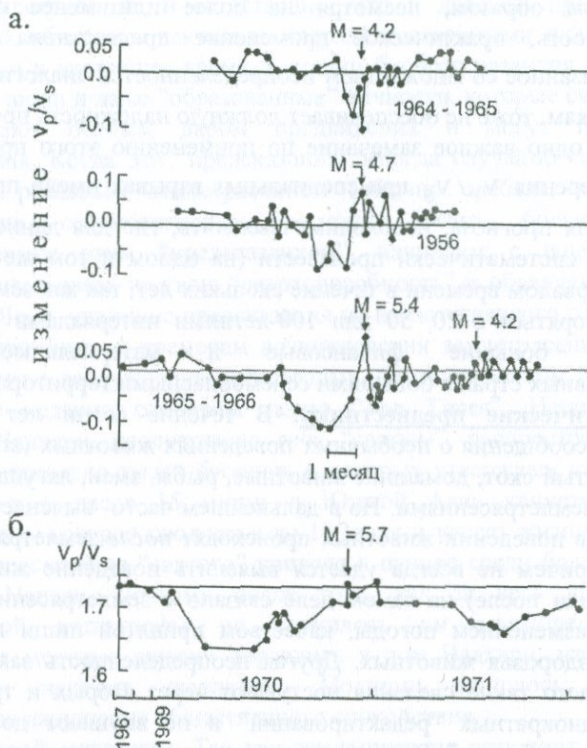


Рис. 1.58. Примеры изменения отношения  $V_p/V_s$

а. в районе Гарма (СССР) [74].

б. перед землетрясением в Сидзи в 1970г. (Китай) [65].

Вертикальными стрелками показаны моменты землетрясений;

$M$  – магнитуа землетрясения.

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 (рис.1.576). 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 [21]. 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 грядом 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, которые 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 предреченной 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 100м*: Койна в Индии, 10.II.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 [21].

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  $10 \times 10 \text{ км}^2$  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 распространяется в виде



сейсмических волн (основная часть энергии превращается в тепловую, распространяющуюся на территории с радиусом в несколько десятков метров), которые на расстоянии 1000км (Спитак находится на расстоянии около 4000км 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, N12, 1989).

**Неудачный прогноз и его последствия.** Естественно, число нереализованных прогнозов по сильным землетрясениям оказалось больше, чем удачных. Типичный пример неудачного прогнозирования имел место в 1981г., 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 [21]. 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 [14]. Причем оно произошло на том же миграционном “деформационном фронте” [50] всего за 1.5 лет после самого удачно прогнозированного землетрясения 1975 года на территории северного Китая, на расстоянии 400км 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 [14,21,50,65].

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”* [21].

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 накапливается 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 3800м), в Мацусиро (Япония – глубина скважины 1800м). 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 (ENHR-США) цели управления землетрясениями заключались в следующем [65]:

- определение возможности ограничить 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 потребуются 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 30-40 лет назад. Судя по научной литературе и по сообщениям средств массовой информации за эти годы в этом направлении новых предложений и реальных результатов пока нет.

## **1.21. ПОДГОТОВКА К ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СООРУЖЕНИЯ.**

Наилучший способ защиты от землетрясений – это своевременная и надежная подготовка к нему. 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 первостепенной 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 натурных 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 неоценимую 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 окупаются.

Единственным источником информации о реальных кинематических параметрах движения грунта являются те инструментальные данные, которые фиксируются 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 1976г. в Газли и 1988г. 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 30км 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 250км были получены трехкомпонентные акселерограммы землетрясения. При этом акселерографы были установлены не только на грунтах, но и на разных по высоте уровня 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 [21]: “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 повреждений 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 сейсмovoоруженности. 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 сейсмovoоруженности 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 связанные между собой 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 соединенными 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 предусматривать 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 суeta 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 [75] 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 большим 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, подготовить



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 (см. приложение 7). 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 истиной 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 неопрогнозируемых 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 титулированных 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 всемирной защиты от пагубных последствий землетрясений. Только тогда мы можем быть уверены, что при будущих землетрясениях число жертв и уровень ущерба станут минимальными.



## 2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одна из основных задач прикладной сейсмологии – это выявление закономерности колебаний грунта, их амплитудно-частотных характеристик в зависимости от местных геологических условий площадки строительства и разработка соответствующих рекомендаций для норм сейсмостойкого строительства.

Так как вопросы обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений прежде всего обусловлены колебаниями грунтов при сильных землетрясениях, в этом разделе настоящей работы остановимся на изучении закономерностей колебаний грунтов при сильных землетрясениях – при магнитудах  $M > 4$  и интенсивности  $I > VI$  баллов. Результаты инструментальных наблюдений показывают, что параметры и закономерности колебаний грунта при землетрясениях в зависимости от их интенсивности, эпицентрального расстояния и геологических условий места регистрации сильно отличаются друг от друга.

В механике, как и в сейсмологии, основными характеристиками любого движения являются:

- *величины перемещений, скоростей и ускорений в трех направлениях пространства (в двух горизонтальных и в вертикальном),*
- *амплитудно-частотные спектры этих колебаний,*
- *закономерности их затухания в зависимости от расстояния до источника возмущения (очага) и продолжительность интенсивных колебаний.*

Достоверные сведения о характере колебаний грунтов при землетрясениях можно получить только при их регистрации во время землетрясения. Как было отмечено в первой части книги, перемещения грунта  $y_0(t)$ , их скорости  $\dot{y}_0(t)$  и ускорения  $\ddot{y}_0(t)$  записываются при помощи разных записывающих устройств. Обычно в эпицентральной зоне, где поверхность Земли подвергается наиболее интенсивным сотрясениям, целесообразно записывать ускорения (акселерограмма) грунта. Перемещения грунта (сейсмограмма) в этой зоне во время сильных землетрясений достигают таких больших величин, что их точное инструментальное воспроизведение становится технически не осуществимым. Перемещения грунта с достаточной степенью

достоверности удастся записывать в эпицентральной зоне преимущественно при слабых землетрясениях, а при сильных землетрясениях на больших расстояниях от эпицентра. В обоих случаях эти записи (сейсмограммы) с точки зрения их использования для оценки сейсмостойкости сооружений не представляют практического интереса, так как возникающий от таких сотрясений грунта уровень напряжений несущих элементов сооружений по сравнению с их предельно допустимыми существенно низок. Кроме того, здания и сооружения разрушаются или подвергаются повреждениям вследствие генерирования в них во время землетрясения инерционных сил, которые в свою очередь обусловлены именно ускорениями грунта. Таким образом, с точки зрения обеспечения сейсмостойкости сооружений наибольший интерес представляют закономерности ускорений грунта во время землетрясения (акселерограмм). Поэтому в данной главе предметом наших исследований в основном будут акселерограммы сильных землетрясений. Хотя необходимо заметить, что современные средства вычислительной техники позволяют при необходимости путем последовательного интегрирования акселерограммы грунта дополнительно получить величины скоростей (велисограмму) и перемещений (сейсмограмму) грунта. Обратное решение этой задачи также приемлемо, так как последовательным дифференцированием сейсмограммы можно дополнительно получить соответствующие велисограммы и акселерограммы землетрясения. Мы специально эти возможности подчеркиваем, так как при решении ряда сложных задач сейсмостойкости сталкиваемся с необходимостью наличия не только акселерограммы, но и велисограммы и сейсмограммы одного и того же землетрясения.

## 2.2. ОСОБЕННОСТИ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА

Закономерности колебания грунта при землетрясениях очень разнообразны и существенно отличаются друг от друга, даже если они происходят в одном и том же месте. Как правило, для классификации закономерностей колебаний грунта воспользуемся записями грунтов прошлых землетрясений. При наличии достаточного количества записей прошлых землетрясений для данной местности можно выделить их характерные типы. Однако количество записей прошлых сильных землетрясений пока очень мало для полноценной статистической обработки. Этот дефицит данных особенно ощутим для территории бывшего СССР и, в частности, для территории Республики Армения.

По характеру колебания грунта землетрясения подразделяются на ряд типов [58,59]. Рассмотрим некоторые из них, которые происходили в разное время на разных регионах.



### 1. Сотрясения грунта с очень короткой продолжительностью

Такие движения грунта – результат землетрясения с четко направленным единственным толчком. На рис. 2.1.1 показана акселерограмма такого землетрясения, зарегистрированного в Порт Гуенеме 18 марта 1957 года [58]. Велисограммы и сейсмограммы землетрясения, показанные на том же рисунке, были получены путем интегрирования акселерограммы. Такие кратковременные сотрясения грунта регистрировались при землетрясениях в 1966 году в Паркфильде (Калифорния) (рис. 2.1.2), в 1973 году в Ереване (рис. 2.1.3) и в 2002 году в Тбилиси (рис. 2.1.4).

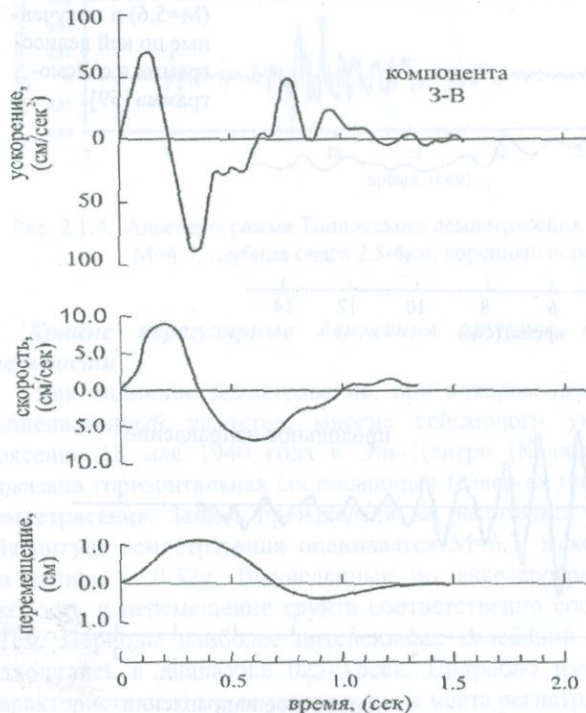


Рис. 2.1.1.  
Акселерограмма  
землетрясения в  
Порт Гуенеме  
18 марта 1957 года  
и полученные по  
ней велисограмма  
и сейсмограмма  
[58].

Обычно такие движения грунта регистрируются на плотных грунтах на небольших расстояниях от эпицентра при землетрясениях с неглубоким очагом. Магнитуды таких землетрясений небольшие (в пределах 4.5-6.2). Продолжительность интенсивных участков сотрясений грунта не превышает 1-2 секунд, а преобладающие периоды колебаний (на акселерограмме) – 0,15-0,25 секунд. Такого типа разрушительные землетрясения произошли в Агадире в 1960г., в Ливии в 1963г., в Скопле в 1963г., в Сан-Сальвадоре в 1965г.

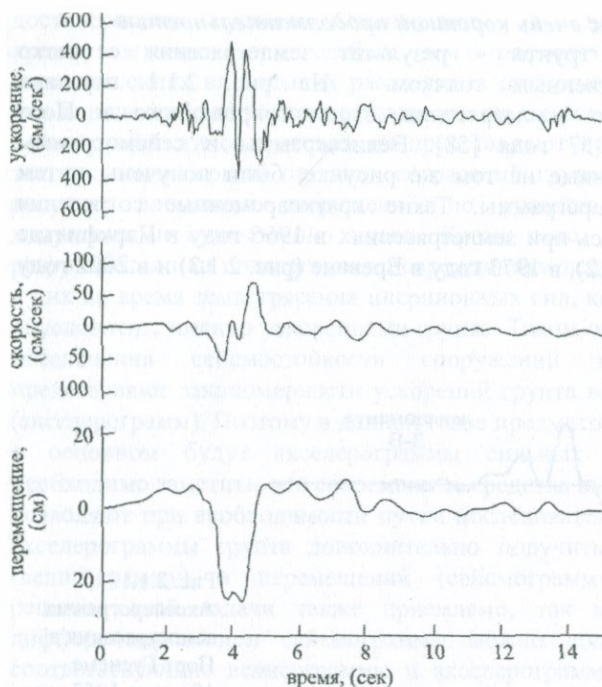


Рис. 2.1.2.  
Акселерограмма  
землетрясения в  
Паркфильде  
27 июня 1966 года  
( $M=5,6$ ) и получен-  
ные по ней велико-  
грамма и сейсмо-  
грамма [59].

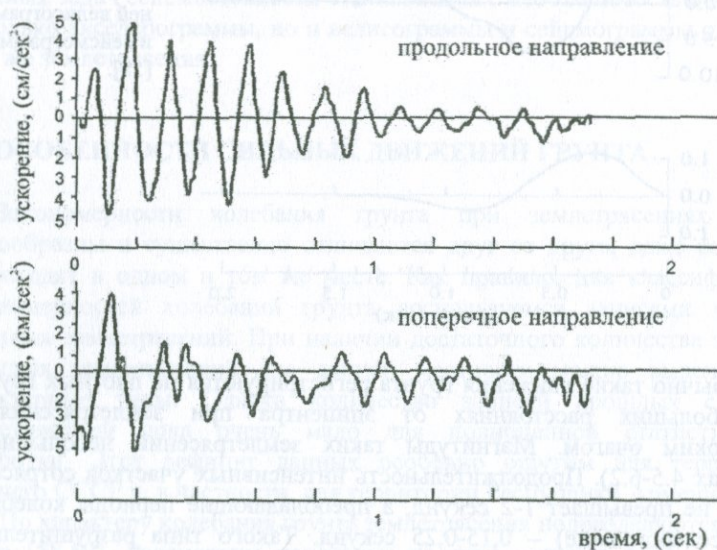


Рис. 2.1.3. Акселерограмма землетрясения в Ереване 16 июня 1973 года.  $M=4,0$ , глубина очага 10км, коренные породы [93].



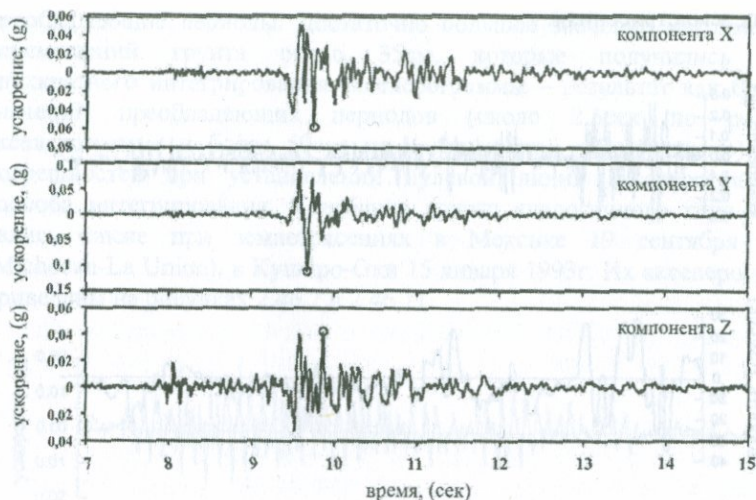


Рис. 2.1.4. Акселерограмма Тбилисского землетрясения 25 апреля 2002 года.  
 $M=4.5$ , глубина очага 2.5-4км, коренные породы [18].

## 2. Крайне нерегулярные движения грунтов средней продолжительности

Как типичное землетрясение, при котором движение грунта имеет вышеназванный характер, многие сейсмологи указывают на землетрясение 18 мая 1940 года в Эль-Центро (Калифорния). На рис. 2.2 показана горизонтальная составляющая (север-юг) акселерограммы этого землетрясения. Запись произведена на расстоянии 50 км от эпицентра. Магнитуда землетрясения оценивается  $M=6.7$ , максимальное ускорение на записи –  $0.32g$ . Вычисленные по акселерограммам максимальная скорость и перемещение грунта соответственно составили: 34.8см/сек и 21см. Периоды наиболее интенсивных колебаний (на окселерограмме) находились в диапазоне 0.25-0.6сек. Подробно известны также другие характеристики этого землетрясения и места регистрации.

Интенсивность землетрясения по шкале ММ в Эль-Центро составила IX баллов, в долине Империял Велли оно образовало разрыв длиной 65км с максимальной относительной подвижкой 4.5 метра. Землетрясение вызвало небольшие разрушения преимущественно в старых зданиях.

Грунт расположения станции регистрации состоял из верхнего слоя глины толщиной 20м и слоя суглинка толщиной 12м, ниже которых большой слой гравия и песка с  $v_p=1800$ м/сек. Так как максимальное значение на этой акселерограмме достаточно велико ( $0.32g$ ) и ее запись от начала до “хвоста” имеет высокое качество, со стороны специалистов она

относится к числу характерных примеров записей ускорений грунта при сильных землетрясениях.

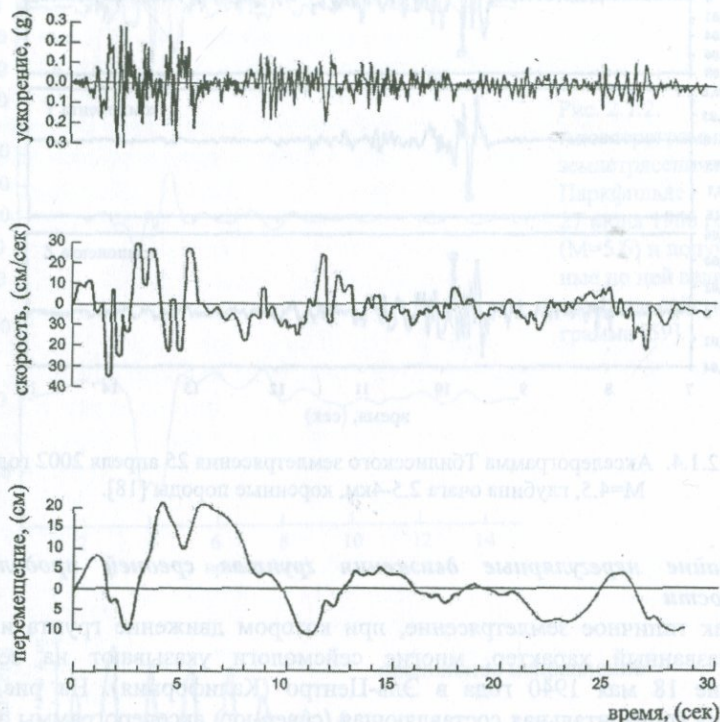


Рис. 2.2. Акселерограмма землетрясения в Эль-Центро 18 мая 1940 года и полученные по ней велисограмма и сейсмограмма [58].

Поэтому не случайно, что эта акселерограмма неоднократно была использована для аналитической иллюстрации различных вопросов сейсмического воздействия на здания и сооружения.

### 3. Колебания грунта с большой продолжительностью

Как пример такого типа колебания грунта обычно принимается запись ускорения грунта во время землетрясения в Мехико 6 июля 1964 года с магнитудой  $M=6.7$ . Эта акселерограмма показана на рис.2.3. Такой характер колебания грунта обычно регистрируется на больших расстояниях от эпицентра на сравнительно рыхлых грунтовых площадках. Приведенная на рис.2.3 акселерограмма была зарегистрирована на расстоянии 200км от эпицентра.



Им свойственны не большие пиковые ускорения и четко различимые преобладающие периоды. Достаточно большое значение максимальных перемещений грунта около 35см, которые получились путем двукратного интегрирования акселерограммы – результат как больших значений преобладающих периодов (около 2.5сек по реальной акселерограмме и более 50сек по рассчитанной сейсмограмме), так и погрешностей при установлении нулевой линии акселерограммы и способа интегрирования. Колебания грунта аналогичного типа наблюдались также при землетрясениях в Мексике 19 сентября 1985г. (Michocan-La Union), в Куширо-Оки 15 января 1993г. Их акселерограммы приведены на рисунках 2.46.2 и 2.46.11.

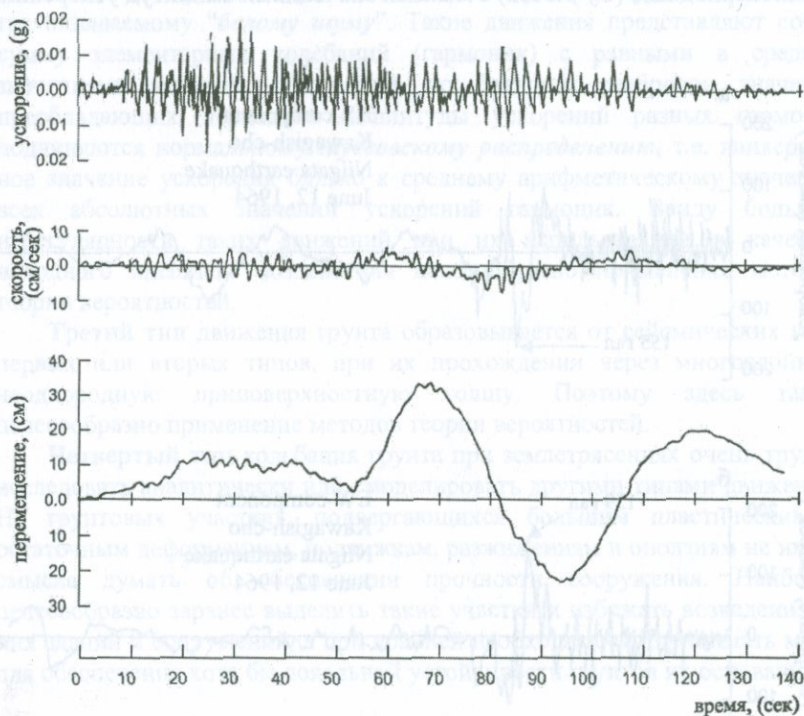


Рис. 2.3. Акселерограмма землетрясения в Мехико 6 июля 1964 года и полученные по ней велисограмма и сейсмограмма [58].

#### 4. Движения грунта, сопровождающиеся значительными остаточными деформациями, разжижением и оползневыми явлениями

Движения грунтов с такими характерными особенностями были зарегистрированы при землетрясениях в Чили (1960), Аляске (1964), в Ниигате (1964). Характер колебания грунта этого типа существенно

отличаются от рассмотренных выше типов. Продолжительность больших значений ускорений на акселерограммах в начале землетрясения небольшая. После достижения определенных значений амплитуд ускорений характер акселерограммы существенно изменяется – появляются длинопериодные колебания с небольшими амплитудами ускорений. На рис. 2.4 показана акселерограмма японского землетрясения с магнитудой  $M=7.5$ , зарегистрированного на расстоянии 60 км от эпицентра в Ниигате. Грунтовые условия места регистрации – мелкие пески большой мощности, которые подвергались разжижению. При достижении ускорения грунта  $150\text{--}160\text{ см/сек}^2$  значений после 5–6 сек от начала землетрясения обычный характер акселерограммы сильно изменился, став длинопериодным ( $T_0=5.5\text{ сек}$ ) с малыми значениями амплитуд ускорений.

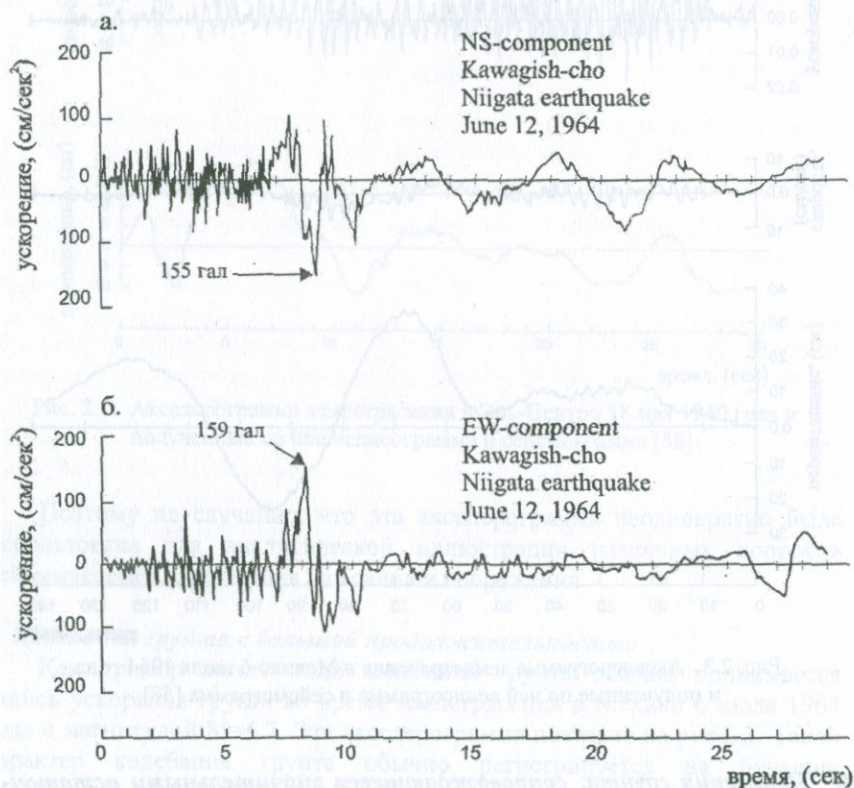


Рис. 2.4. Акселерограмма Ниигатского землетрясения 12 июня 1964 года [169]  
а. компонента С-Ю,  
б. компонента В-З.



В действительности закономерности колебания грунта при землетрясениях могут иметь промежуточные характеристики между изложенными выше типами. Основную роль здесь, по-видимому, играют грунтовые условия места регистрации, чем дальность от места расположения эпицентра. На этом вопросе мы еще остановимся в дальнейшем, а пока отметим некоторые общие черты изложенных типов движений грунта при землетрясениях.

Движения грунта **первого типа** имеют очень простой характер и к ним можно применить детерминистические методы. Вся сложность задачи заключается в сборе достаточного количества таких записей для данной местности.

Движения грунта **второго типа** по своему характеру очень близки к так называемому "*белому шуму*". Такие движения представляют собой сумму элементарных колебаний (гармоник) с равными в среднем значениями амплитуд ускорений, но большим разбросом значений преобладающих периодов. Амплитуды ускорений разных гармоник подчиняются нормальному *гауссовскому распределению*, т.е. наивероятное значение ускорения близко к среднему арифметическому значению всех абсолютных значений ускорений гармоник. Ввиду большой нерегулярности таких движений при их использовании в качестве исходного внешнего воздействия целесообразно применение методов теории вероятностей.

**Третий тип** движения грунта образовывается от сейсмических волн первых или вторых типов, при их прохождении через многослойную неоднородную приповерхностную толщу. Поэтому здесь также целесообразно применение методов теории вероятностей.

**Четвертый тип** колебания грунта при землетрясениях очень трудно исследовать аналитически или смоделировать другими типами движений. На грунтовых участках, подвергающихся большому пластическим и остаточным деформациям, подвижкам, разжижениям и оползням не имеет смысла думать об обеспечении прочности сооружения. Наиболее целесообразно заранее выделить такие участки и избежать возведения на них зданий и сооружений, а при крайней необходимости принимать меры для обеспечения хотя бы локальной устойчивости грунтов их оснований.

## 2.3. ПРЕОБЛАДАЮЩИЕ ПЕРИОДЫ КОЛЕБАНИЙ ПРИ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЯХ ГРУНТА

Основной характеристикой любого сложного колебательного процесса является спектр периодов его составных частей. Величины периодов колебаний грунтов играют основную роль при изучении поведения сооружений во время землетрясения. Сейсмическое воздействие относится к динамическим воздействиям, при которых

наибольший уровень эффекта обусловлен резонансными явлениями, т.е. совпадением или близостью величин периодов колебаний грунта и свободных колебаний надземных сооружений. Остановимся на этих вопросах отдельно для аллювиальных и скальных грунтов.

**Аллювиальные основания.** Долины, примыкающие к морям и рекам имеют сложную геологическую структуру. Обычно эта структура представляет собой конгломерат с отложениями слоев ила, песка и гравия сравнительно позднего периода (аллювиально-делювиальные отложения) поверх более ранних напластований. Слой наносных грунтов является значительно более рыхлым и сложным, чем подстилающий грунт. Более плотный нижний грунт называется *“грунтом основания”*, а верхний слой отложений *“поверхностным слоем”* или *приповерхностной толщей*. Таким образом, основная особенность аллювиально-делювиальных грунтов является наличием в них сложной структуры из материалов с различными механическими свойствами. При землетрясениях эта структура оказывает существенное влияние на характер колебательного движения верхнего слоя толщи, на который опирается фундамент сооружения. Как было отмечено в первой главе книги, при достижении сейсмических волн поверхности земли они генерируют поверхностные поперечные волны.

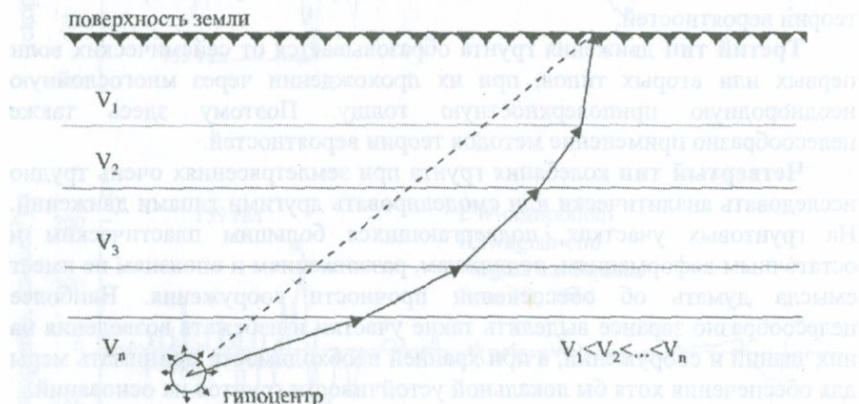


Рис. 2.5. Путь распространения поперечной сейсмической волны.

Так как скорости распространения поперечных волн в поверхностном слое меньше, чем в глубинных уровнях, согласно правилам преломления и отражения волн (1.76), поперечные волны будут падать на поверхность Земли под почти прямым углом (рис.2.5), а внутри самого поверхностного слоя произойдут их многократные преломления и отражения.



В результате этих явлений в верхнем слое Земли генерируется более продолжительный колебательный процесс с определенными периодами колебаний, обусловленными физико-механическими характеристиками и мощностями всех слоев толщи. Эти периоды принято *называть преобладающими периодами грунта*.

Периоды свободных колебаний однородных оснований. Если поверхностный слой однороден (рис.2.6), уравнение его свободных колебаний будет иметь вид:

$$G \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2.1)$$

где  $u(x,t)$  – перемещение,  $G$  – модуль сдвига среды,  $\rho$  – ее плотность,  $H$  – мощность слоя.

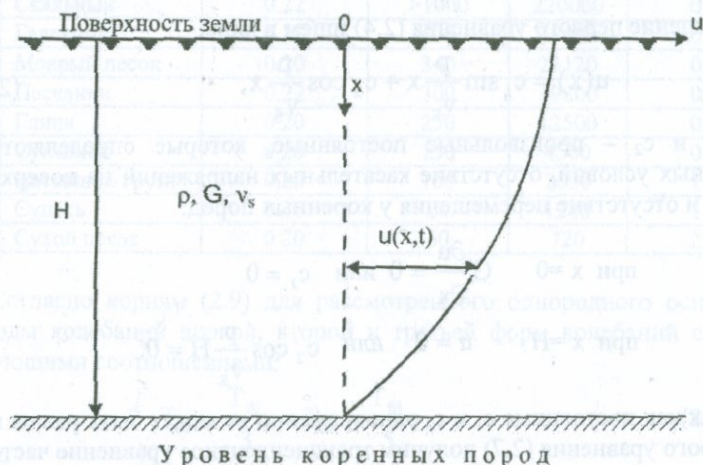


Рис. 2.6. Расчетная схема однородного грунтового основания.

Решение уравнения (2.1) будем искать методом разделения переменных в виде:

$$u(x,t) = u(x)q(t). \quad (2.2)$$

Подставляя (2.2) в (2.1), получим:

$$G u''(x)q(t) - \rho u(x)q''(t) = 0$$

$$\text{или} \quad \frac{Gu''}{\rho u} = \frac{q''}{q} = -p^2, \quad (2.3)$$

где  $p^2$  – пока произвольное постоянное положительное число.

Из (2.3) получим два разделенных уравнения: относительно  $u(x)$  и  $q(t)$ :

$$u''(x) + \frac{p^2}{v_s^2} u(x) = 0 \quad (2.4)$$

$$q''(t) + p^2 q(t) = 0,$$

где

$$v_s^2 = \frac{G}{\rho}.$$

Решение второго уравнения (2.4) будет:

$$q(t) = c \sin(pt + \lambda). \quad (2.5)$$

Следовательно постоянное  $p$  – это круговая частота свободных колебаний слоя.

Решение первого уравнения (2.4) ищем в виде:

$$u(x) = c_1 \sin \frac{p}{v_s} x + c_2 \cos \frac{p}{v_s} x, \quad (2.6)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – произвольные постоянные, которые определяются из граничных условий, отсутствие касательных напряжений на поверхности грунта и отсутствие перемещения у коренных пород:

$$\text{при } x=0 \quad G \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \text{ или } c_1 = 0 \quad (2.7)$$

$$\text{при } x=H \quad u = 0 \text{ или } c_2 \cos \frac{p}{v_s} H = 0.$$

Так как постоянные  $c_1$  и  $c_2$  одновременно не могут быть равны нулю, из второго уравнения (2.7) получим трансцендентное уравнение частот:

$$\cos \frac{p}{v_s} H = 0. \quad (2.8)$$

Корни (2.8) будут:

$$\frac{p}{v_s} H = \frac{2n-1}{2} \pi, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (2.9)$$

Для первой формы свободных колебаний и частоты  $P_1$  ( $n = 1$ ) будем иметь ( $c \cdot c_2 = A$ ):

$$u(x, t) = A \sin(pt + \lambda) \cos \frac{\pi x}{2H}$$

$$P_1 = \frac{\pi v_s}{2H}, \quad (2.10)$$

где  $A$  и  $\lambda$  определяются из начальных условий.



Следовательно, период основной формы колебания однородного основания будет:

$$T_{01} = \frac{2\pi}{P_1} = \frac{4H}{v_s}. \quad (2.11)$$

В табл. 2.1 приведены физико-механические характеристики различных пород для определения периода свободных колебаний однородного поверхностного слоя и значения  $T_{01}$  для однородного основания с мощностью  $H=30\text{м}$  по формуле (2.11).

Таблица 2.1

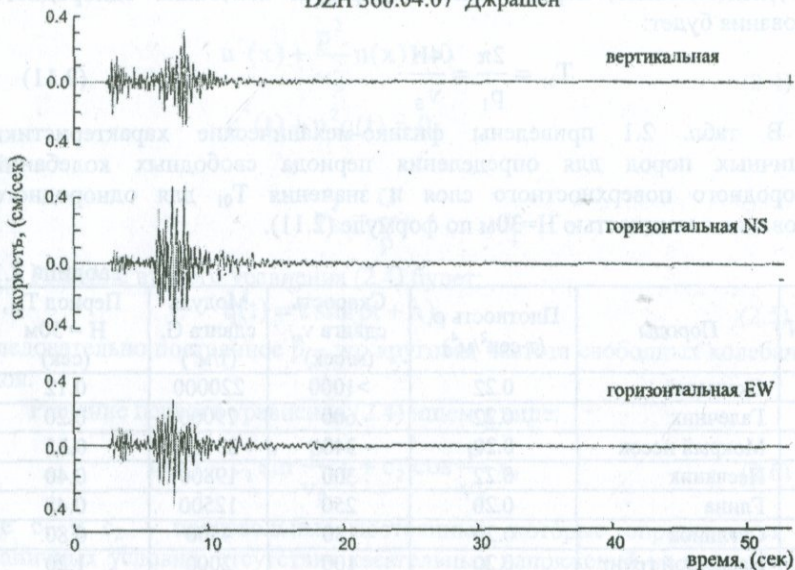
| NN | Породы         | Плотность $\rho$ ,<br>(г-сек <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> ) | Скорость<br>сдвига $v_s$ ,<br>(м/сек) | Модуль<br>сдвига $G$ ,<br>(т/м <sup>2</sup> ) | Период $T_{01}$ ,<br>$H = 30\text{м}$<br>(сек) |
|----|----------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1  | Скальный       | 0.22                                                        | >1000                                 | 220000                                        | 0.12                                           |
| 2  | Галечник       | 0.22                                                        | 600                                   | 79000                                         | 0.20                                           |
| 3  | Мокрый песок   | 0.20                                                        | 340                                   | 23120                                         | 0.35                                           |
| 4  | Песчаник       | 0.22                                                        | 300                                   | 19800                                         | 0.40                                           |
| 5  | Глина          | 0.20                                                        | 250                                   | 12500                                         | 0.48                                           |
| 6  | Суглинок       | 0.20                                                        | 150                                   | 4500                                          | 0.80                                           |
| 7  | Насыпной грунт | 0.20                                                        | 100                                   | 2000                                          | 1.20                                           |
| 8  | Супесь         | 0.20                                                        | 80                                    | 1280                                          | 1.50                                           |
| 9  | Сухой песок    | 0.20                                                        | 60                                    | 720                                           | 2.00                                           |

Согласно корням (2.9) для рассмотренного однородного основания периоды колебаний первой, второй и третьей форм колебаний связаны следующими соотношениями:

$$T_{02} = \frac{T_{01}}{3}, \quad T_{03} = \frac{T_{01}}{5}. \quad (2.11a)$$

Попутно отметим, что в аналогичных соотношениях оказываются и периоды первых трех форм колебаний  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  большинства жилых и общественных зданий массовой застройки [91].

Это сходство динамических характеристик оснований и надземных зданий имеет важное практическое значение. Оно позволяет при избежании резонансных явлений в зданиях по основной форме колебаний автоматически их избежать и по высшим – второй и третьей формам колебаний, и, наоборот, – в случае резонансных колебаний по первой форме вероятность их образования по высшим формам будет очень большая. Об эффекте влияния неоднородного поверхностного слоя на характер колебания грунтов при землетрясениях имеются многочисленные инструментальные подтверждения в виде записей одного и того же землетрясения на грунтах с различными геологическими условиями. В частности, это явление очень четко выявилось во время сильного афтершока от 31 декабря 1988 года с магнитудой  $M=4.7$  Спитакского землетрясения 1988 года [124, 134].



LEN 366:04:07 Гюмри

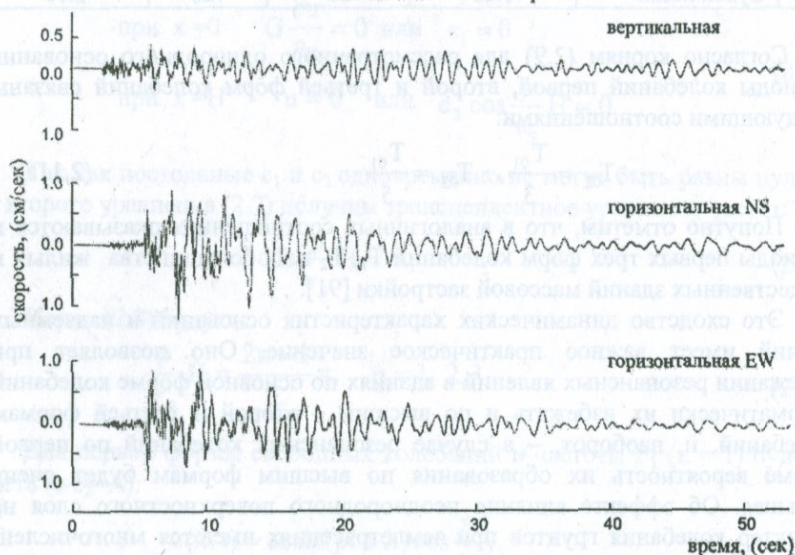


Рис. 2.7. Записи скоростей колебания грунтов на скальных участках в Джрашене (DZH) и на рыхлых участках в Гюмри (LEN) при афтершоке Спитакского землетрясения от 31 декабря 1988 года с  $M=4.7$  [124].



Это иллюстрировано на рис. 2.7, где показаны записи велисограмм грунта на почти одинаковом расстоянии от эпицентра в пос. Джрашен (скальные грунты) и на территории Гюмри (Ленинакан) на участках с многослойной толщей из хрупких материалов общей мощностью до 300 метров.

Как видно из рисунка, записи сильно отличаются друг от друга как по амплитуде, продолжительности интенсивных колебаний грунта, так и по величинам преобладающих периодов. В колебаниях грунта, записанных в Гюмри, преобладают длинопериодные (0.5-2.5сек) колебания, их амплитуды в 2 и более раз больше, чем в Джрашене, а продолжительность интенсивных сотрясений грунта в Гюмри – в 3 и более раз, чем в Джрашене.

**Скальные основания.** Ответственные сооружения: плотины, гидроэлектростанции и атомные станции обычно возводятся на скальных грунтах. Как и в случае рыхлых грунтов вопросы избежания несовпадения периодов колебаний скального основания и свободных колебаний наземного сооружения представляют значительный практический интерес. Известны многочисленные примеры сильных разрушений очень жестких сооружений, возводимых на скальных грунтах при землетрясениях с не очень большими магнитудами. Много таких случаев, в частности, имели место на территории Армении, когда многие жесткие церковные и оградительные сооружения, возведенные на скальных грунтах, получили серьезные повреждения, в то время как другие такие же сооружения, возведенные на обычных грунтах, или вовсе не пострадали или получили незначительные повреждения. В частности, такие случаи имели место при Гарнийском (1679), Арагатском (1848), Зангезурском (1931) землетрясениях. Как отмечает Окомото [59], такие случаи наблюдались и в Японии при землетрясениях в Имаите (1949) и Канто (1923). При сейсмических колебаниях скальных грунтов их перемещения обычно оказываются небольшими, а ускорения значительны в диапазоне коротких периодов.

Не редки также случаи, когда при одинаковых эпицентральных расстояниях (но не более чем 30-50км) ускорения скальных грунтов значительно (в 2 и более раз) превосходят ускорения рыхлых грунтов.

Это имело место и при упомянутом выше афтершоке Спитакского землетрясения, когда ускорение на другом скальном участке Кети в два раза оказалось больше, чем в Гюмри (см. рис.3.35).

Верхние слои скальных грунтов, примыкающие к поверхности Земли, обычно находятся в значительно выветренном и растресканном состоянии, чем более глубинные слои. Поэтому и в этом случае можно предположить о наличии в них некоторого условного поверхностного слоя и, следовательно, о возникновении преобладающих периодов колебаний в скальных грунтах. Это явление наиболее четко вырисовывается при наличии значительных изменений в топографии

местности в виде отдельных возвышенностей или глубоких оврагов. В таких случаях появляются дополнительные колебания горных массивов аналогично колебаниям надземных сооружений. Большинство исследователей считают, что в таких случаях значения преобладающих периодов колебаний грунта бывают в пределах 0.2сек.

Количество записей сильных землетрясений на скальных грунтах сравнительно меньше, чем на аллювиальных грунтах. Анализ имеющихся записей (акселерограмм) показывает, что их преобладающие периоды находятся в узком диапазоне от 0.1 до 0.3сек.

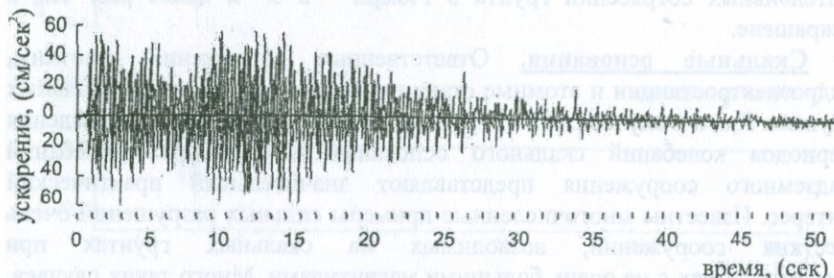


Рис. 2.8. Акселерограмма Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года, записанная в Ереване (ИСС N3, базальты, Ереван, ул.Аветисяна, 1) [94].

На рис. 2.1.3. и 2.8 показаны записи двух акселерограмм, полученные на станции инженерно-сейсмометрических наблюдений N1 и N3, расположенных на скальных грунтах (андезито-базальтовые отложения большой мощности) в городе Ереване при землетрясениях 16 июля 1973 года и 7 декабря 1988 года. Значения преобладающих периодов в обоих случаях, как видно из рисунков, находятся в диапазоне 0.1-0.15сек.

При теоретическом определении преобладающих периодов колебаний скальных грунтов в принципе можно пользоваться формулой (2.1) для однородного поверхностного слоя. Однако здесь сразу встанет вопрос — до каких глубин принять мощность слоя  $H$ . Для очень жестких грунтов, для которых значение скорости  $v_s$  превышает 1000м/сек, мощность слоя  $H$ , по-видимому, не должны принимать больше чем 30-50 метров, так как в таких случаях формула (2.1) может привести к нелогичным результатам. Так, например, если принять  $H = 200$ м, при  $v_s = 1500$ м/сек, для  $T_0$  получим  $4 \cdot 200 / 1500 = 0.53$ сек, что вряд ли будет в действительности иметь место для скальных оснований такой мощности. Если же принять  $H = 50$ м, то получим  $T_0 = 0.13$ сек, что можно считать вполне реальным. Это обстоятельство служит основанием предполагать, что при скальных грунтах во время землетрясений только верхний приповерхностный слой небольшой мощностью подвергается большим



горизонтальным ускорениям. Это косвенно подтверждается при измерениях величин ускорений скальных грунтов в различных по глубине уровнях. В частности, такие данные были получены непосредственными измерениями в разных глубинах вертикальной шахты электростанции Кинугава (Япония) во время ряда землетрясений [59]. Они показали, что на глубине 50м ускорения грунта в 2 и более раз меньше, чем на поверхности Земли. Это значит, что при скальных грунтах уменьшение сейсмического эффекта по глубине уменьшается быстрее, чем для аллювиальных грунтов.

Вышеизложенные количественные данные о преобладающих колебаниях аллювиальных и скальных грунтов в основном наблюдались при землетрясениях умеренной интенсивности. При сильных землетрясениях, когда деформация грунтов сопровождается пластическими и остаточными явлениями, величины преобладающих периодов могут подвергаться существенным изменениям. Причем, как показывают инструментальные наблюдения, в аллювиальных грунтах кроме увеличения величин преобладающих периодов до 2-3 раз существенно изменяется и акселерограмма грунта, как это имело место при землетрясении в Ниигата (рис.2.4).

Что касается поведения скальных грунтов при очень сильных землетрясениях, когда в них образуется множество трещин, то по аналогии с поведением каменных и бетонных конструкций можно предположить, что преобладающие периоды могут увеличиться до 1.5-2 раза. Это значит, что при очень сильных землетрясениях возможны колебания скальных грунтов с преобладающими периодами до 0.4-0.6сек.

Как бы парадоксально ни звучало, придется констатировать, что величины преобладающих периодов колебаний грунтов и свободных колебаний зданий и сооружений массовой застройки *находятся в одном и том же диапазоне от 0.1сек до 1.0сек*. Это обстоятельство существенно повышает вероятность возникновения резонансных явлений. При этом, чем дольше длится землетрясение, тем эта вероятность возрастет. По нашему убеждению, причиной большинства случаев обрушений и серьезных повреждений зданий и сооружений при сильных землетрясениях являются резонансные колебания. Об этом свидетельствуют и большие повреждения отдельных сооружений при низких уровнях амплитуд ускорений грунта (меньше чем  $0.1g$ ), наблюдаемые во время землетрясений на больших расстояниях от эпицентра. Это значит, что при проектировании новых зданий следует достоверно прогнозировать не только максимальную амплитуду ускорения грунта, но и величину преобладающего периода колебания грунта и длительность интенсивных участков на акселерограмме во время землетрясения. Такой прогноз позволит для каждого сооружения с определенным периодом собственных колебаний подобрать наиболее благоприятные грунтовые площадки строительства. Методы определения

периодов собственных колебаний зданий и сооружений различных конструктивных систем в настоящее время достаточно разработаны вплоть до готовых компьютерных программ их вычисления. Прямые методы определения преобладающих периодов колебания грунтов во время землетрясения фактически отсутствуют. По зарегистрированным во время землетрясения акселерограммам мы обычно непосредственно можем определить только максимальное значение ускорения. Для определения величин преобладающих периодов необходимо акселерограммы разложить в ряд Фурье, что сама собой не простая задача, и в начальном этапе регистрации акселерограмм это не производилось, так как о силе землетрясения судили только по величине максимального ускорения.

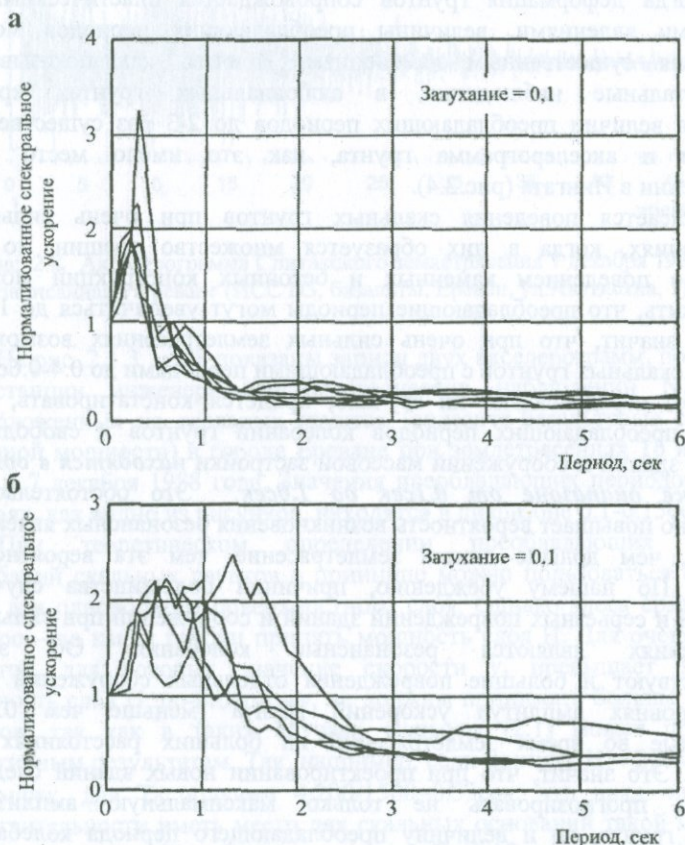


Рис. 2.9. Спектры реакции ускорений для скальных пород и твердых грунтов (а) и для рыхлой многослойной толщи (б) [73].



Самые общие сведения о величине преобладающих периодов колебаний грунта можно исчерпать из спектров реакции (по значениям периодов, соответствующим пиковым значениям ускорений), построенных по записям акселерограмм грунта, зарегистрированных на участках грунтов с различными геологическими разрезами. Таких спектров к настоящему времени накопилось в довольно большом количестве. Их сопоставительный анализ указывает, что в основном величины преобладающих периодов скальных грунтов во время землетрясения находятся в указанном диапазоне 0.15÷0.40сек, тогда как их значения для многослойных “мягких” грунтов находятся в широком диапазоне 0.5÷2.0сек, иногда доходя до 3.0 и более секунд. Это легко обнаруживается по рис.2.9, где построены спектры реакции ряда землетрясений, записанных на скальных и рыхлых грунтах.

Таким образом, основным фактором, влияющим на количественные характеристики периодов колебания грунта во время землетрясения, является геологическое строение верхней приповерхностной толщи рассматриваемого участка. В качестве *интегральной динамической характеристики* приповерхностной толщи логично *принимать спектр частот* (периодов) ее свободных колебаний. Нам также кажется *целесообразным грунтовые условия площадки строительства по сейсмическим свойствам классифицировать именно по величинам периодов свободных колебаний многослойной приповерхностной толщи.*

Величины периодов свободных колебаний многослойной приповерхностной толщи при проектировании новых зданий и сооружений можно прогнозировать двумя способами:

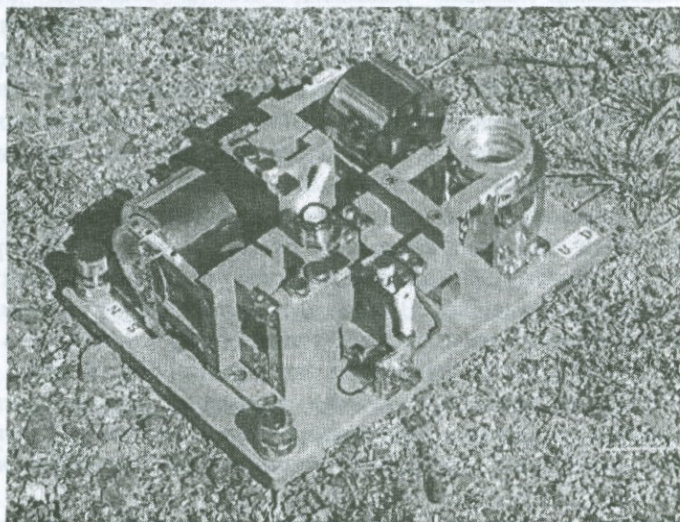
- путем записи микроколебаний на верхней поверхности толщи (на котловане строительной площадки) и ее спектрального анализа,
- решением волнового уравнения многослойной сплошной среды как континуума с соответствующими мощностями, упругими и плотностными характеристиками, установленными в результате инженерно-геологических изысканий и сейсмологических исследований.

## 2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕОБЛАДАЮЩИХ ПЕРИОДОВ ПО ЗАПИСЯМ МИКРОКОЛЕБАНИЙ

В грунте постоянно происходят колебания с незаметными амплитудами порядка нескольких микрон. Такие микроколебания в сейсмологии называются микросейсмами. Эти колебания можно рассматривать как упругие колебания приповерхностного слоя, т.е. они отображают основные упругие характеристики слоев поверхностной толщи. Этот метод определения преобладающих периодов был разработан в Японии [59]. В настоящее время он широко применяется и в других

странах. Для измерения микроколебаний на грунте устанавливается высокочувствительный трехкомпонентный велесограф (рис.2.10а), который регистрирует колебания грунта в течение нескольких минут. Затем при помощи специального регистра (рис. 2.10б) и электронного анализатора производится частотный анализ колебаний. При наличии указанной аппаратуры все операции выполняются весьма просто.

а.



б.

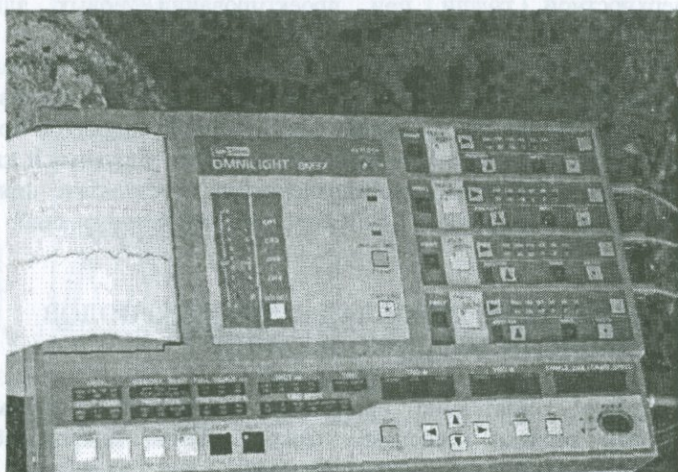


Рис. 2.10. Трехкомпонентный высокочувствительный велесограф типа UP-255 (а) и четырехканальный магнитный регистрирующий прибор типа FC-14 (б) (OMNILIGHT – 8М, Япония).



Эта простота является основным достоинством метода, позволяющая выполнить измерения в большем количестве числа точек исследуемой строительной площадки.

На рис.2.11 показан план основания опирания подошвы фундамента (в начале строительства) церкви св.Григория Просвятителя в Ереване и расположение точек измерения макроколебаний [105]. Грунтами основания являются пласты трещиноватых базальтов с прослойками глыб с песчаным заполнением до 20-30%. Измерения проводились в 12 точках в котловине на бетонной подготовке в трех взаимоперпендикулярных направлениях.

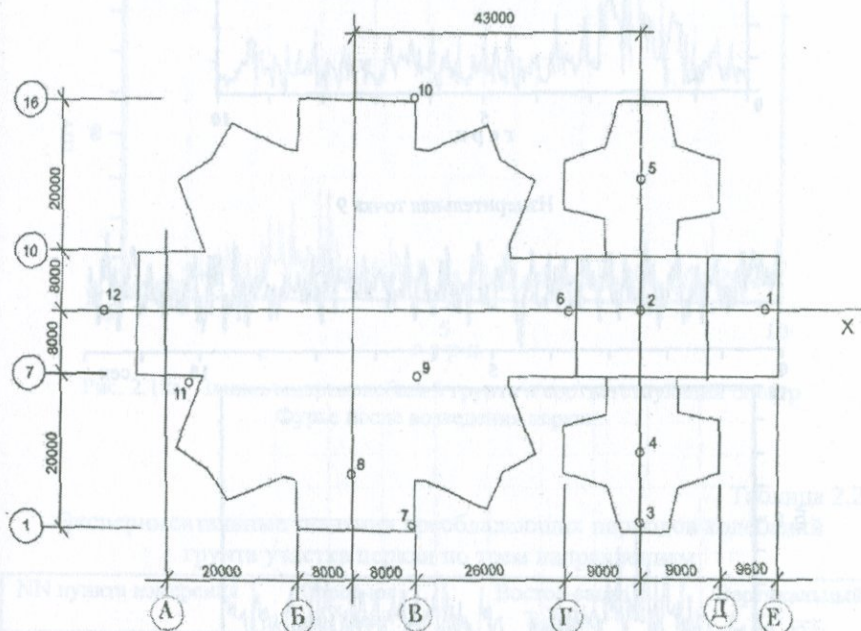
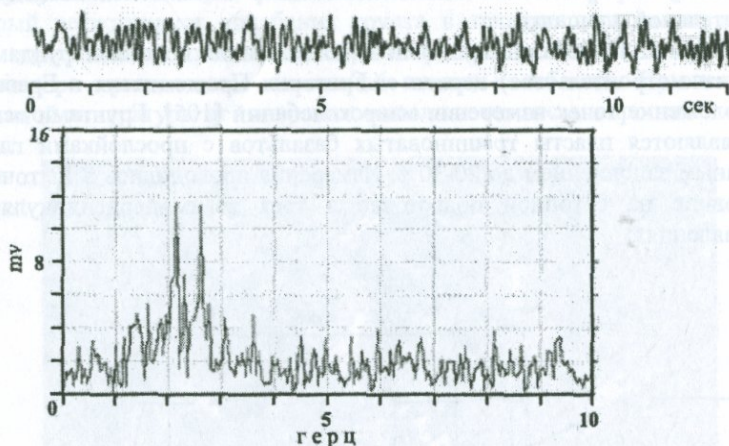


Рис. 2.11. Распределение измерительных пунктов для измерения микроколебаний основания (на бетонной подготовке) церкви св.Григория Просветителя.

На рис.2.12 показаны записи микроколебаний грунта и соответствующие их спектры Фурье для точек 8 и 9. Результаты итоговых измерений приведены в табл. 2.2.

### Измерительная точка 8



### Измерительная точка 9

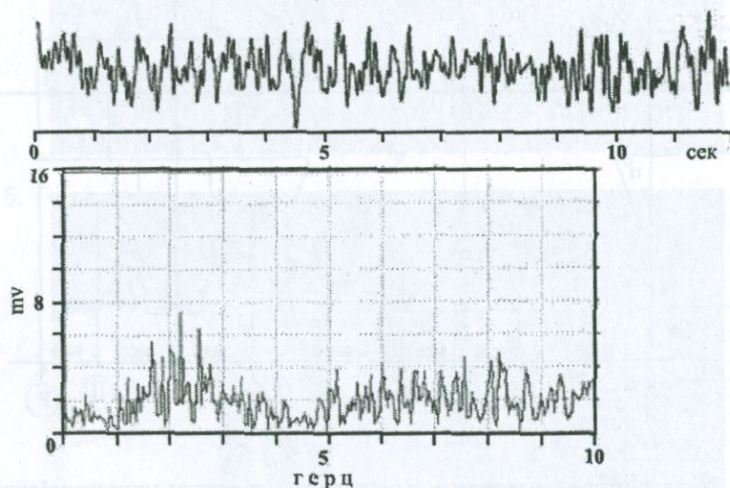


Рис. 2.12. Записи горизонтальных микроколебаний грунта и соответствующие спектры Фурье в точках 8 и 9.

Значение преобладающего периода микроколебаний грунта после полного возведения церкви размерами 58х58х54м составило 0,31-0,4сек (рис.2.12а), т.е. изменилось (уменьшилось) незначительно по сравнению с первоначальным его значением до возведения.



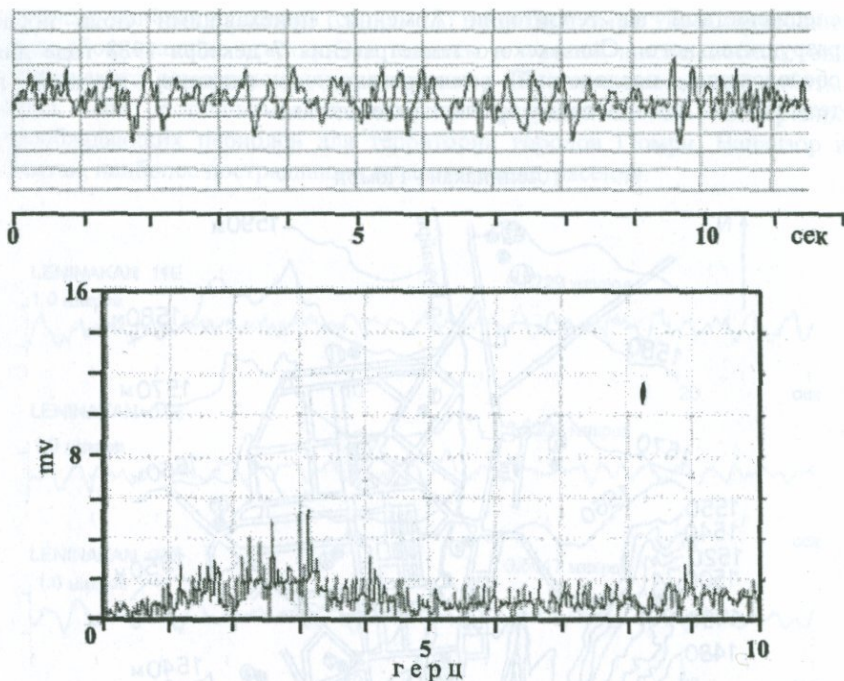


Рис. 2.12а. Запись микроколебаний грунта и соответствующий спектр Фурье после возведения церкви.

Таблица 2.2  
Экспериментальные значения преобладающих периодов колебаний  
грунта участка церкви по трем направлениям

| NN пункта измерения | Север-юг<br>$T_0^x$ сек. | Восток-запад<br>$T_0^y$ сек. | Вертикальный<br>$T_0^z$ сек. |
|---------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1                   | 0.44                     | 0.41                         | 0.36                         |
| 2                   | 0.5                      | 0.48                         | 0.4                          |
| 3                   | 0.42                     | 0.4                          | 0.3                          |
| 4                   | 0.4                      | 0.41                         | 0.33                         |
| 5                   | 0.41                     | 0.42                         | 0.34                         |
| 6                   | 0.36                     | 0.4                          | 0.36                         |
| 7                   | 0.36                     | 0.36                         | 0.36                         |
| 8                   | 0.5                      | 0.45                         | 0.33                         |
| 9                   | 0.42                     | 0.41                         | 0.33                         |
| 10                  | 0.42                     | 0.45                         | 0.36                         |
| 11                  | 0.43                     | 0.4                          | 0.3                          |
| 12                  | 0.41                     | 0.41                         | 0.41                         |
| Среднее значение    | 0.42                     | 0.41                         | 0.35                         |

Большое количество таких измерений было проведено японскими специалистами на территории Армении, приехавшими сюда после разрушительного Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года для обследования последствий землетрясения и оказания научной и технической помощи своим армянским коллегам.

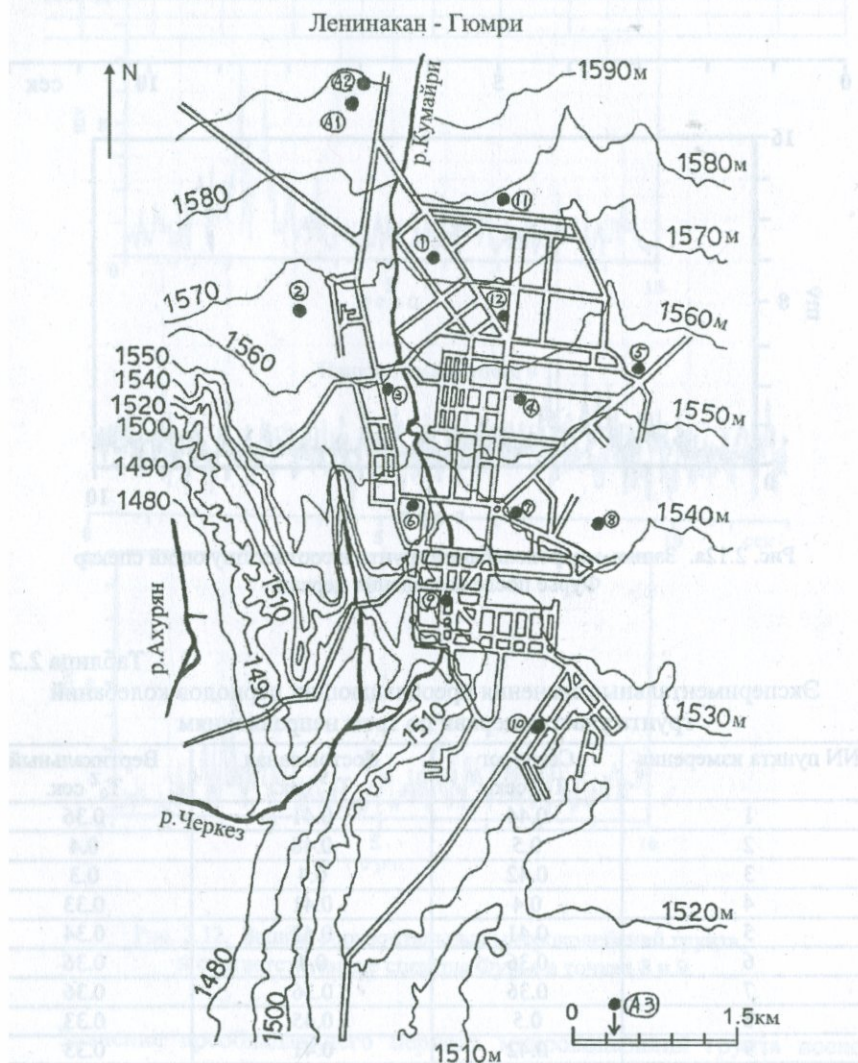


Рис. 2.13. Расположение участков записи микроколебаний в г. Ленинанке-Гюмри [205].



На многие вопросы причин массовых разрушений 9-этажных каркасно-панельных зданий (серия 111) в городе Гюмри эти исследования дали обоснованные ответы. Эти аспекты и полный анализ последствий Спитакского землетрясения приводятся в III главе настоящей работы. Здесь мы остановимся только на результатах по измерению преобладающих периодов для территории городов Гюмри, Ванадзор и Спитак, наиболее пострадавших во время землетрясения.

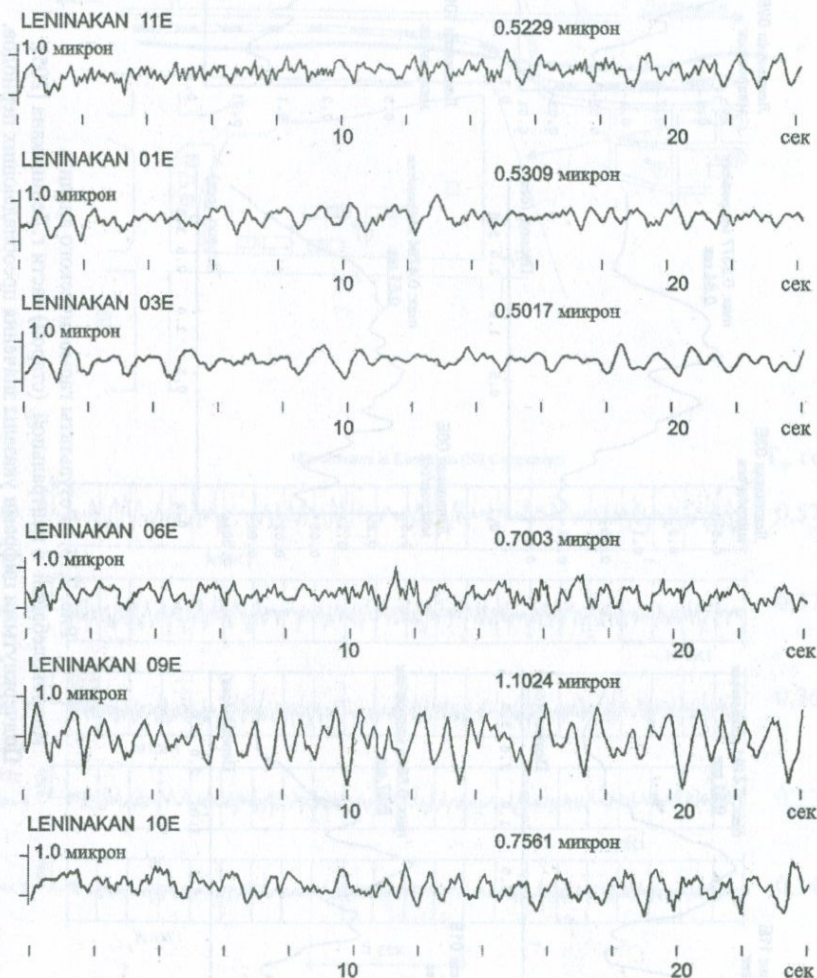


Рис. 2.14. Записи микроколебаний в г.Ленинакане [205].

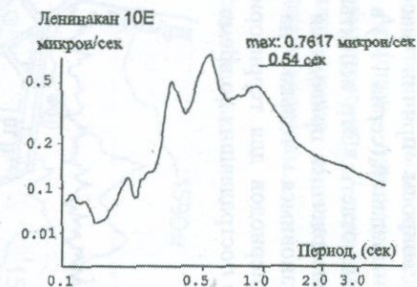
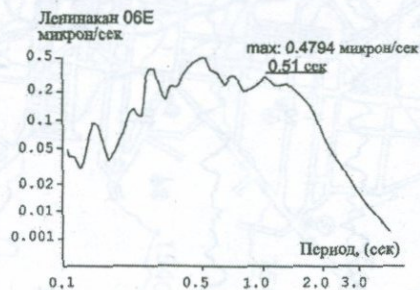
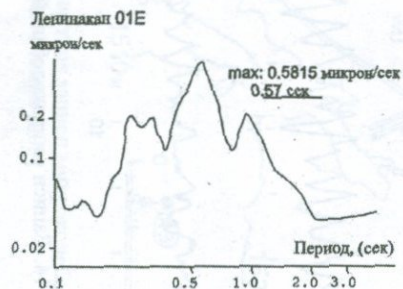
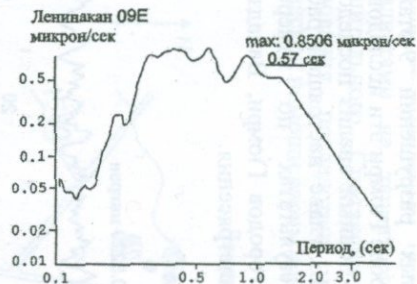
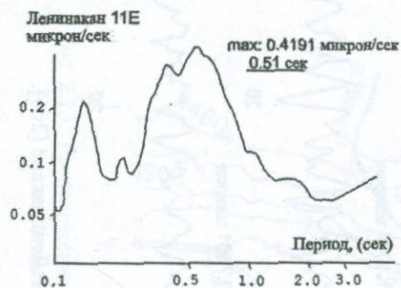


Рис. 2.15. Результаты гармонического анализа микроколебаний в центральной (старой) части г.Ленинакана [205]. Подчеркнутыми цифрами указаны значения преобладающих периодов.



На рис. 2.16-2.17 показаны схемы расположения высоко-чувствительных сейсмографов в городах Ванадзор и Спитак, полученные записи и значения преобладающих периодов, заимствованных из [166, 198, 205].

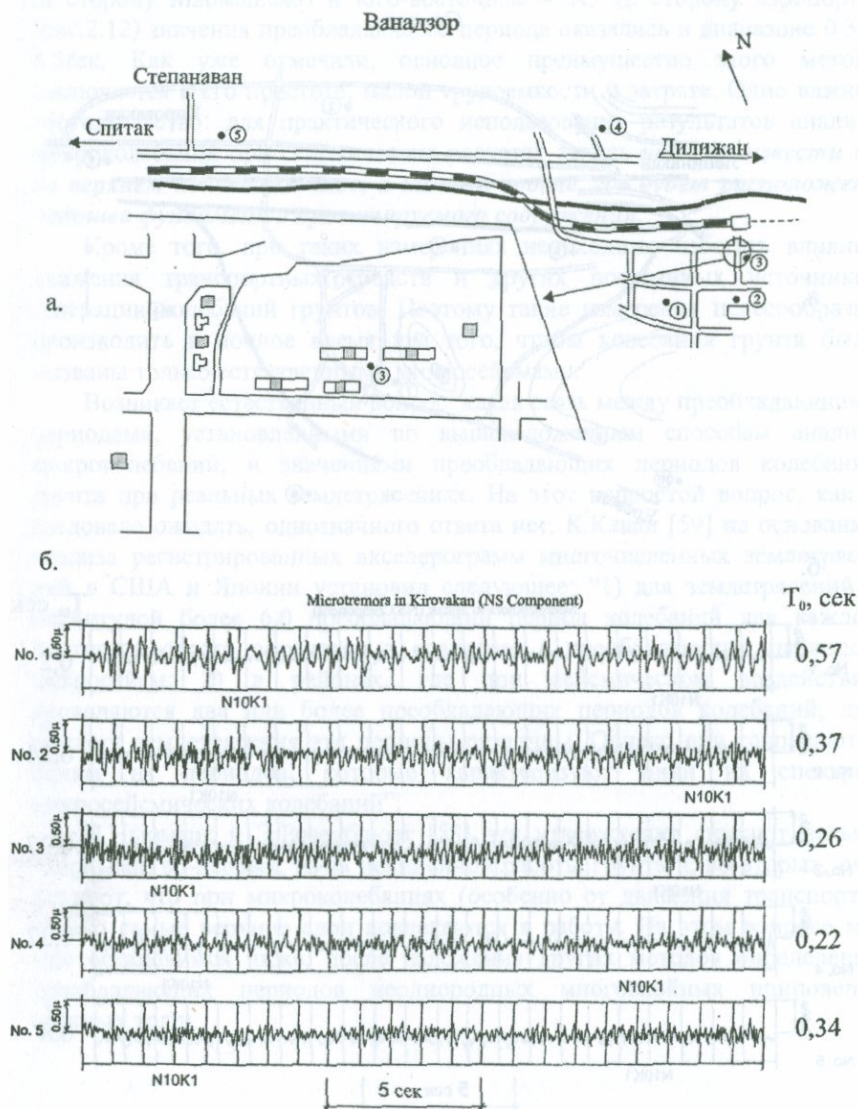
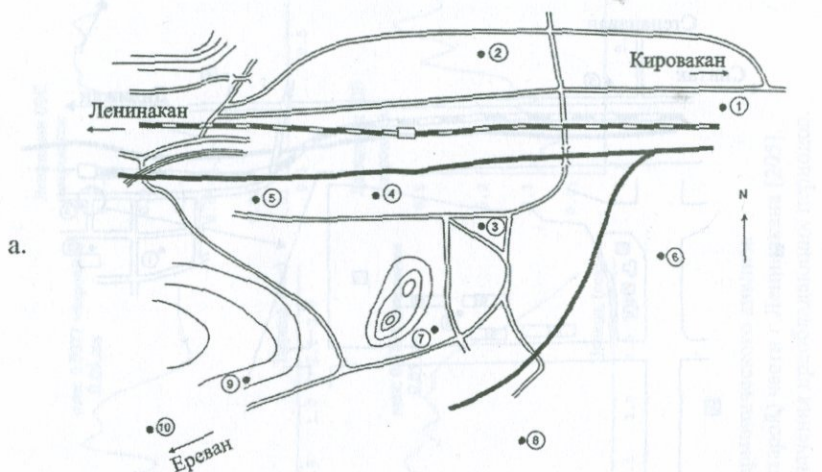


Рис. 2.16. Расположение участков (а), записи микроколебаний (б) и величины их преобладающих периодов г.Кировакан-Ванадзор [166, 198, 205].

Как видно из результатов приведенных измерений, значение преобладающих периодов центральной части города Гюмри находятся в диапазоне 0.51-0.64сек, в Ванадзоре 0.22-0.57сек и в Спитаке 0.2-0.43сек.

# Спитак



б.

## Microtremors in Spitak (NS Component)

$T_0$ , сек

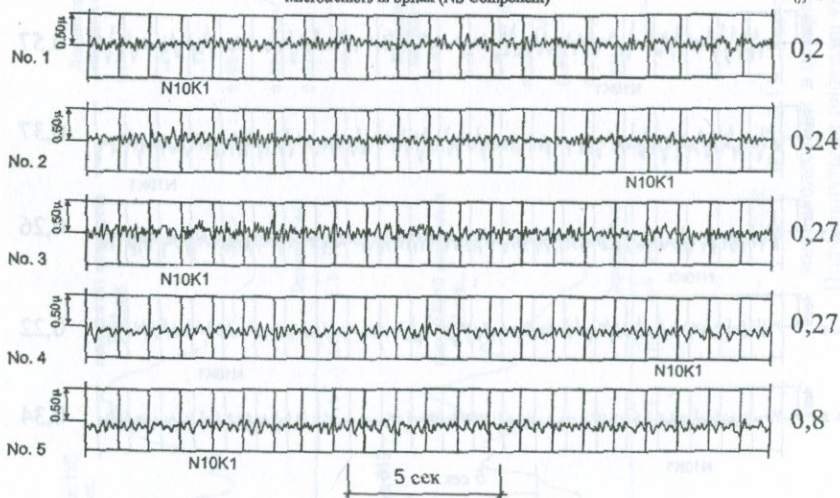


Рис. 2.17. Расположение участков (а), записи микроколебаний (б) и величины их преобладающих периодов г.Спитак [166, 198, 205].



Из рис. 2.15 видно, что на спектрах для Ленинка явно прослеживаются также преобладающие периоды со значением около 1.0сек. Согласно тем же источникам, в северо-западных участках А1 и А2 (в сторону Мармашена) и юго-восточном – А3 (в сторону аэропорта) (рис.2.12) значения преобладающего периода оказались в диапазоне 0.35-0.5сек. Как уже отмечали, основное преимущество этого метода заключается в его простоте, малой трудоемкости и затрате. Одно важное обстоятельство: для практического использования результатов анализа микроколебаний при сейсмических расчетах запись *надо произвести не на верхнем почвенном слое, а на том уровне, где будет расположена подошва фундамента проектируемого сооружения.*

Кроме того, при таких измерениях необходимо избегать влияния движения транспортных средств и других постоянных источников генерации колебаний грунтов. Поэтому такие измерения целесообразно производить в ночное время для того, чтобы колебания грунта были вызваны только естественными микросейсами.

Возникает естественный вопрос: какая связь между преобладающими периодами, установленными по вышеизложенным способам анализа микроколебаний, и значениями преобладающих периодов колебаний грунта при реальных землетрясениях. На этот непростой вопрос, как и следовало ожидать, однозначного ответа нет. К.Канаи [59] на основании анализа зарегистрированных акселерограмм многочисленных землетрясений в США и Японии установил следующее: “1) для землетрясений с магнитудой более 6.0 преобладающий период колебаний для каждой местности строго определен и совпадает с преобладающим периодом микросейсм; 2) в районах, где при сейсмическом воздействии проявляются два или более преобладающих периодов колебаний, для каждого землетрясения эти периоды различны. Однако они совпадают с одним из периодов, которые характеризуют пики на спектрах микросейсмических колебаний”.

Н.Ньюмарк и Э.Розенблюэт [58] эти утверждения считают весьма спорными, во-первых, из-за нелинейной работы грунта и, во-вторых, они считают, что при микроколебаниях (особенно от движения транспорта) только самые верхние слои вовлекаются в работу. На этом вопросе мы еще остановимся ниже, после изложения других методов определения преобладающих периодов неоднородных многослойных приповерхностных толщ.

## 2.5. ОБЩИЙ СЛУЧАЙ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДОВ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ НЕОДНОРОДНЫХ ОСНОВАНИЙ

Приповерхностную неоднородную толщу будем рассматривать как континуум, состоящий из  $n$  слоев со своими физико-химическими характеристиками – плотностями  $\rho_k$ , модулями сдвига  $G_k$  и мощностями  $H_k$  (рис.2.18).



Рис. 2.18. Расчетная схема неоднородной толщи.

Будем считать, что неоднородный поверхностный слой общей мощностью  $H$  опирается на “грунт основания”. При вертикальном распространении поперечных волн имеется только одна горизонтальная компонента  $u(x,t)$ , которая внутри каждого слоя должна удовлетворять волновому уравнению типа (1.75). Однако, учитывая то обстоятельство, что вязкие свойства среды мало влияют на периоды свободных колебаний, ими будем пренебрегать и в качестве волнового уравнения примем

$$G_k \frac{\partial^2 u_k(x,t)}{\partial x^2} - \rho_k \frac{\partial^2 u_k(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad h_{k-1} < x \leq h_k \quad (2.12)$$

$$k = 1, 2, \dots, n.$$

Для дальнейшего упрощения задачи нумерацию слоев будем начинать с верхнего слоя, начало координат принимать на поверхности земли и пользоваться обозначениями [97]:

$$h_k = \sum_{i=0}^k H_i, \quad h_0 = 0, \quad h_1 = H_1, \quad h_n = H. \quad (2.13)$$



Решение уравнений (2.12) ищем в виде

$$u_k(x,t) = u_k(x) \sin pt, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (2.14)$$

где  $p$  – искомая круговая частота свободных колебаний неоднородной поверхностной толщи,  $u_k(x,t)$  – деформация сдвига  $k$ -ого слоя.

Подставляя (2.14) в (2.12) для  $u_k(x)$ , получим:

$$u_k''(x) + \lambda_k^2 u_k(x) = 0, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (2.15)$$

где обозначено

$$\lambda_k^2 = \frac{p^2 \rho_k}{G_k}. \quad (2.16)$$

Решение уравнения (2.15) ищем в виде:

$$u_k(x) = A_k \sin \lambda_k x + B_k \cos \lambda_k x \quad h_{k-1} < x \leq h_k \quad (2.17) \\ k = 1, 2, \dots, n.$$

Для определения  $2n$  коэффициентов  $A_k$  и  $B_k$  и круговой частоты  $p$  имеем следующие два граничных условия:

$$\text{при } x=0 \quad u_1'(0) = 0 \quad (2.18)$$

$$\text{при } x=H \quad u_n(H) = 0$$

и  $2n-2$  условия равенства деформаций сдвига и напряжений на уровнях плоскостей раздела слоев, т.е.

$$u_k(h_k) = u_{k+1}(h_k)$$

$$G_k u_k'(h_k) = G_{k+1} u_{k+1}'(h_k) \quad (2.19)$$

$$k = 1, 2, \dots, n-1.$$

Подставляя (2.17) в граничные условия (2.18) и условия неразрывностей (2.19) для неизвестных  $2n$  коэффициентов  $A_k$  и  $B_k$  получим:

$$A_1 = 0$$

$$A_n \sin \lambda_n H + B_n \cos \lambda_n H = 0$$

$$A_k \sin \lambda_k h_k + B_k \cos \lambda_k h_k =$$

$$A_{k+1} \sin \lambda_{k+1} h_k + B_{k+1} \cos \lambda_{k+1} h_k \quad (2.20)$$

$$A_k G_k \lambda_k \cos \lambda_k h_k - B_k G_k \lambda_k \sin \lambda_k h_k =$$

$$A_{k+1} G_{k+1} \lambda_{k+1} \cos \lambda_{k+1} h_k - B_{k+1} G_{k+1} \lambda_{k+1} \sin \lambda_{k+1} h_k$$

$$k = 1, 2, \dots, n-1.$$

Так как система уравнений (2.20) относительно  $2n$  неизвестных коэффициентов  $A_k$  и  $B_k$  однородна, то единственное нетривиальное ее решение имеет место только при равенстве нулю детерминанта  $2n$  степени, образованного из коэффициентов неизвестных. Это и будет искомым сложное трансцендентное частотное уравнение для определения неизвестной частоты  $p$ . При двухслойном основании это будет детерминант 4 порядка, трехслойном — 6 порядка, шестислойном 12 порядка.

Для двухслойного основания этот детерминант будет иметь вид:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \lambda_2 (H_1 + H_2) & \cos \lambda_2 (H_1 + H_2) \\ \sin \lambda_1 H_1 & \cos \lambda_1 H_1 & \sin \lambda_2 H_1 & -\cos \lambda_2 H_1 \\ G_1 \lambda_1 \cos \lambda_1 H_1 & -G_1 \lambda_1 \sin \lambda_1 H_1 & -G_2 \lambda_2 \cos \lambda_2 H_1 & G_2 \lambda_2 \sin \lambda_2 H_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.21)$$

После раскрытия которого получим трансцендентное уравнение:

$$\sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_2 G_2}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} H_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{G_1}} \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} H_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{G_2}} - 1 = 0. \quad (2.22)$$

Аналогичным образом для трехслойного и четырехслойного основания получим:

при  $n = 3$

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_2 G_2}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 + \sqrt{\frac{\rho_2 G_2}{\rho_3 G_3}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 + \\ & + \sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_3 G_3}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 - 1 = 0 \end{aligned} \quad (2.23)$$

при  $n = 4$

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_2 G_2}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 + \sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_3 G_3}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 + \\ & + \sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_4 G_4}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_4 + \sqrt{\frac{\rho_2 G_2}{\rho_3 G_3}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 + \\ & + \sqrt{\frac{\rho_2 G_2}{\rho_4 G_4}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_4 + \sqrt{\frac{\rho_3 G_3}{\rho_4 G_4}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_4 - \\ & - \sqrt{\frac{\rho_1 G_1 \rho_3 G_3}{\rho_2 G_2 \rho_4 G_4}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_1 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_2 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_3 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} \alpha_4 - 1 = 0. \end{aligned} \quad (2.24)$$



где приняты обозначения:

$$\alpha_1 = H_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{G_1}}, \quad \alpha_2 = H_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{G_2}}, \quad \alpha_3 = H_3 \sqrt{\frac{\rho_3}{G_3}}, \quad \alpha_4 = H_4 \sqrt{\frac{\rho_4}{G_4}}, \quad (2.25)$$

а  $T_{0i} = \frac{2\pi}{\rho_i}$  - искомый период свободных колебаний толщи по  $i$ -ой форме.

Таким образом, несмотря на кажущуюся простоту задачи, получение числовых значений частот свободных колебаний для оснований с большим числом слоев связано с большими затруднениями, которые можно преодолеть только с помощью специальных компьютерных программ. Отметим, что полученные выше точные трансцендентные уравнения позволяют вычислить не только значение основного периода, но и периоды высших форм колебаний многослойной толщи.

Так как для любого  $k$ -ого слоя скорость распространения волн сдвига выражается формулой

$$v_{sk} = \sqrt{\frac{G_k}{\rho_k}},$$

то после их подстановки в уравнения (1.22)-(1.24) их можно выразить также в параметрах  $\rho_k$ ,  $v_{sk}$  и  $H_k$ . Например, для трехслойного основания (2.23) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_1 v_{s1}}{\rho_2 v_{s2}} \operatorname{tg} \frac{2\pi H_1}{T_0 v_{s1}} \operatorname{tg} \frac{2\pi H_2}{T_0 v_{s2}} + \frac{\rho_2 v_{s2}}{\rho_3 v_{s3}} \operatorname{tg} \frac{2\pi H_2}{T_0 v_{s2}} \operatorname{tg} \frac{2\pi H_3}{T_0 v_{s3}} + \\ & + \frac{\rho_1 v_{s1}}{\rho_3 v_{s3}} \operatorname{tg} \frac{2\pi H_1}{T_0 v_{s1}} \operatorname{tg} \frac{2\pi H_3}{T_0 v_{s3}} - 1 = 0. \end{aligned} \quad (2.23a)$$

При больших числах слоев с целью сокращения объема вычислений и использования частотных уравнений (2.22), (2.23) и (2.24) можно всю систему заранее привести к эквивалентным двух-, трех- или четырехслойным системам с приведенными (средними) характеристиками скоростей волн сдвига  $\bar{v}_{sk}$ , плотностей  $\bar{\rho}_k$  и мощностей  $\bar{H}_k$  и пользоваться соответствующими трансцендентными уравнениями (2.22) - (2.24). Средние параметры рекомендуется определять по формулам:

$$\bar{v}_{sk} = \frac{\sum_{i=m}^j H_i}{\sum_{i=m}^j \frac{H_i}{v_{si}}}, \quad \bar{\rho}_k = \frac{\sum_{i=m}^j H_i \rho_i}{\sum_{i=m}^j H_i}, \quad \bar{H}_k = \sum_{i=m}^j H_i. \quad (2.26)$$

Таким образом, характеристики  $k$ -ого слоя приведенной системы, вычисленные по (2.26), которые получаются от реальных характеристик чередующих друг друга  $j$ -м слоев от порядкового номера  $j$  до номера  $m$ . Чередующие  $j$ -м слои подбираются таким образом, чтобы их реальные характеристики мало отличались друг от друга. Это значит, что разные приведенные слои могут содержать разное количество реальных слоев.

## 2.6. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПРЕОБЛАДАЮЩИХ ПЕРИОДОВ

Ниже приводятся результаты решения трансцендентных уравнений (2.22) – (2.24) для конкретных 2-4-слойных оснований, а также для оснований с числом слоев  $n > 4$  с применением формулы (2.26).

1. Эль-Центро. Как уже было отмечено выше, запись землетрясения 18 мая 1940 года, которое было зафиксировано в сейсмической станции Эль-Центро, основание которой представляло собой двухслойную толщу со следующими параметрами (рис. 2.19).

$$H_1 = 20 \text{ м}$$

$$v_{s1} = 208 \text{ м/сек}$$

$$\rho_1 = 0.2 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4$$

$$H_2 = 12 \text{ м}$$

$$v_{s2} = 150 \text{ м/сек}$$

$$\rho_2 = 0.2 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4$$

Подставляя эти значения в трансцендентное уравнение (2.22) и решая его с помощью компьютера, получим следующие значения периодов для первых трех форм колебаний:

$$T_{01} = 0.785 \text{ сек}, T_{02} = 0.227 \text{ сек}, T_{03} = 0.143 \text{ сек}.$$

Эль-Центро

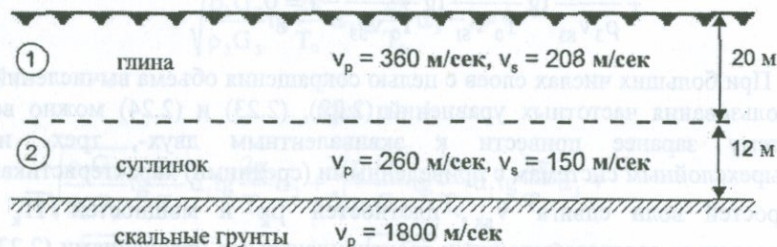


Рис. 2.19. Геологический разрез участка сейсмостанции Эль-Центро по [59].

Как было отмечено выше, значения преобладающих периодов по спектру реакции землетрясения, построенного по зарегистрированной акселерограмме (рис.2.2) оказались в пределах 0.25-0.6сек, которые сопоставимы с  $T_{01} = 0.78$  и  $T_{02} = 0.22$ .



2. **Кировакан.** По данным бурения, проведенного М.Егиняном и К.Каграманом [216] непосредственно после Спитакского землетрясения 1988 года в северо-западной части г.Кировакана (Ванадзор), параметры геологического разреза (рис. 2.20) имеют следующее значение:

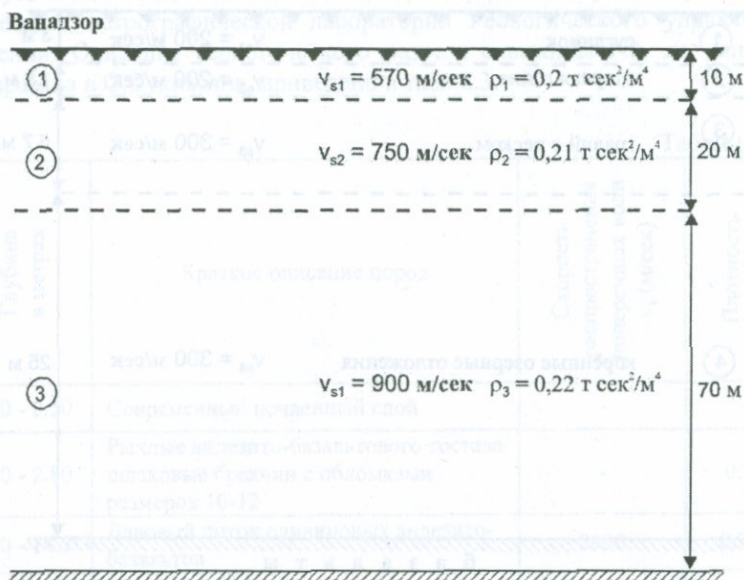


Рис. 2.20. Геологический разрез грунтового участка северо-западной части г.Кировакана [216].

- 1 слой – мелкий гравий с песком  $H_1=10\text{м}$ ,  $v_{s1}=520\text{--}620\text{м/сек}$
- 2 слой – мелкий гравий с валунами  $H_2=20\text{м}$ ,  $v_{s1}=600\text{--}900\text{м/сек}$
- 3 слой – плотный песок с валунами  $H_3=70\text{м}$ ,  $v_{s1}=900\text{м/сек}$ .

Решение трансцендентного уравнения (2.23) для этого трехслойного геологического разреза дало следующее значение для периодов свободных колебаний

$$T_{01}=0.441 \text{ сек}, T_{02}=0.158 \text{ сек}, T_{03}=0.097 \text{ сек}.$$

3. **Гукасян.** Во время Спитакского землетрясения на инженерно-сейсмометрической станции ИГИС НАН РА в 35км от Спитака в поселке Гукасян была получена трехкомпонентная акселерограмма. Геологический разрез участка (рис. 2.21) регистрации, по данным [216], имеет следующие параметры:

|                       |                              |                                                          |
|-----------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------|
| $H_1 = 3 \text{ м}$   | $v_{s1} = 200 \text{ м/сек}$ | $\rho_1 = 0.154 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$ |
| $H_2 = 1,8 \text{ м}$ | $v_{s2} = 200 \text{ м/сек}$ | $\rho_2 = 0.177 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$ |
| $H_3 = 5,7 \text{ м}$ | $v_{s3} = 300 \text{ м/сек}$ | $\rho_3 = 0.180 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$ |
| $H_4 = 25 \text{ м}$  | $v_{s4} = 300 \text{ м/сек}$ | $\rho_4 = 0.177 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$ |

Подставляя эти значения в трансцендентное уравнение (2.24), были получены следующие величины первых трех форм колебаний:

$$T_{01}=0.463 \text{ сек}, T_{02}=0.157 \text{ сек}, T_{03}=0.098 \text{ сек}.$$

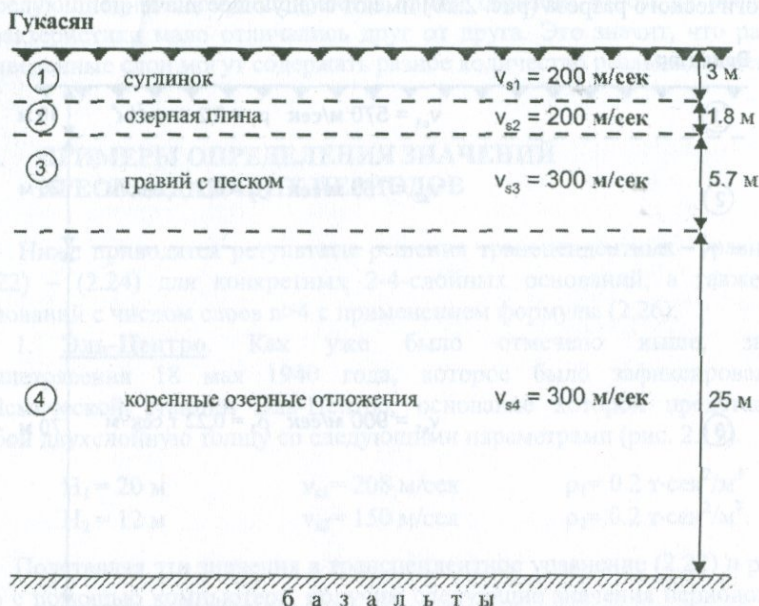


Рис. 2.21. Геологический разрез участка станции Гукасян [216].

Во время Спитакского землетрясения на этом участке была зарегистрирована трехкомпонентная акселерограмма (см. рис.3.16) как при основном толчке, так и при афтершоке через 4мин 15сек. Согласно спектрам реакции [130, 131], построенные по горизонтальным составляющим акселерограмм (рис.3.21а), величины периодов соответствующие пиковым значениям на спектре реакции (при  $\eta=2\%$ ) оказались (в секундах):

**по компоненте N-S**

0.33, 0.45 – при главном толчке

0.26, 0.43 – при афтершоке

**по компоненте E-W**

0.44, 0.6, 0.8 – при главном толчке

0.42, 0.9 – при афтершоке.

Как видно из приведенных данных, как при основном ударе, так и при афтершоке в спектре колебания грунта имели место колебания с периодом около 0.45сек, соответствующее расчетному значению периода свободных колебаний четырехслойного основания участка регистрации,



4. **Армянская АЭС.** В 1994 году в связи с мероприятиями по перепуску Армянской АЭС в программу дополнительных исследований по нашей инициативе были включены бурение 6 новых скважин глубиной по 50 метров для уточнения грунтовых условий площадки главного корпуса АЭС. Физико-механические характеристики кернов пород были изучены в петрографической лаборатории Геологического управления Армении. Описание геологического разреза скважины N2, по данным Э.Харазяна и С.Сукиасяна, приведено в табл.2.3.

Таблица 2.3

| Глубина<br>в метрах | Краткое описание пород                                                                 | Скорость<br>распространения<br>поперечных волн<br>$V_s$ (м/сек) | Плотность<br>$\rho$ , (т·сек <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> ) |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 0.00 - 0.50         | Современный почвенный слой                                                             | -                                                               | -                                                           |
| 0.50 - 2.80         | Рыхлые андезито-базальтового состава<br>шлаковые брекчии с обломками<br>размеров 10-12 | -                                                               | 0.21                                                        |
| 2.80 - 14.7         | Лавовый поток оливиновых андезито-<br>базальтов                                        | 2930                                                            | 0.232                                                       |
| 14.7 - 17.7         | Рыхлые шлаковые брекчии андезитов                                                      | -                                                               | -                                                           |
| 17.7 - 46.0         | Мощный поток двупироксеновых<br>андезитов                                              | 2860                                                            | 0.237                                                       |
| 46.0 - 50.7         | Рыхлые красновато-бурые шлаковые<br>брекчии                                            | -                                                               | 0.21                                                        |
| 50.7 - 51.0         | Андезиты плотные, тонкозернистые-<br>стекловатые                                       | -                                                               | -                                                           |

Согласно этим исследованиям, в скважине N2 зафиксированы верхний лавовый поток оливинового андезито-базальта мощностью 12м с перекрывающими своими же шлаковыми образованиями (мощностью до 2.5м), средний очень мощный (28.5м) поток двупироксеновых андезитов с перекрывающими андезитовыми шлаками (3м) и третий (нижний) лавовый поток также андезитового состава с 5-метровой покрывкой шлаковых образований. Таким образом, суммарная мощность лавовых образований – около 41 метра и шлаковых не более 10 метров. С учетом вышеизложенного расчетную схему можно рассматривать как двухслойное основание с сильно отличающимися друг от друга механическими характеристиками (рис.2.22).

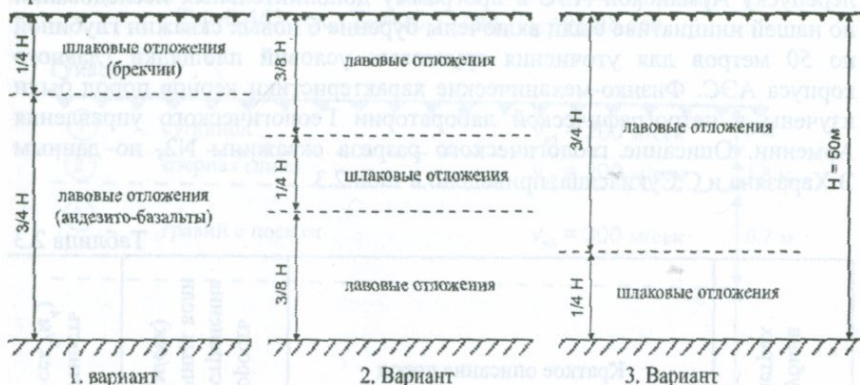


Рис. 2.22. Варианты геологического разреза площадки главного корпуса Армянской АЭС.

Для породы лавового потока скорость распространения волн сдвига можно принять как среднее из двух значений, приведенных в табл.2.3, т.е.  $v_s=2895\text{м/сек}$ , как скорость распространения поперечной волны в сплошном теле с плотностью  $\rho=0.23\text{т}\cdot\text{сек}^2/\text{м}^4$ . Что касается шлаковых отложений, то так как они также относятся к андезито-базальтовым отложениям, но имеют рыхлый характер, величина  $v_s$  для них будет значительно меньше: в пределах  $500\text{-}1000\text{м/сек}$  с плотностью  $\rho=0.21\text{т}\cdot\text{сек}^2/\text{м}^4$ .

Если пренебречь суммарным 10-метровым слоем шлаковых отложений, то по формуле (2.11) для однородного слоя при  $H=50\text{м}$  для преобладающего периода получим:

$$T_{01} = \frac{4 \cdot 50}{2895} = 0.069 \approx 0.07 \text{ сек}$$

По-видимому, правильно было бы предполагать, что действительное значение  $v_s$  из-за трещиноватости и других неоднородностей реальных условий строительной площадки будет не менее чем в два раза меньше, чем значение  $2895\text{м/сек}$ , полученное в результате лабораторного испытания сплошного небольшого образца (керна). В этом случае величина преобладающего периода может достигнуть  $T_{01}=0.14\text{сек}$ .

Теперь оценим влияние слоя шлаковых отложений, принимая следующие 3 предельных варианта их расположения в общей геологической колонке (рис.2.22):

1. Весь слой шлаковых отложений мощностью  $1/4H$  расположен наверху всего разреза.



2. Весь слой шлаковых отложений мощностью  $\frac{1}{4} H$  расположен в средней части разреза.
3. Весь слой шлаковых отложений мощностью  $\frac{1}{4} H$  расположен в нижней части разреза.

Нетрудно догадаться, что из рассмотренных трех вариантов величина преобладающего периода всего разреза при варианте 3 будет наибольшая. Поэтому при аналитических расчетах будем варьировать только двумя - 1 и 3 вариантами. При этом для лавовых отложений  $v_s$  принималась равной 2895м/сек, а для  $v_s$  шлаковых отложений были приняты три предположительных значения: 500, 750 и 1000м/сек. Значения преобладающих периодов, вычисленных по трансцендентному уравнению (2.22), приведены в табл.2.4.

Таблица 2.4

| T <sub>01</sub> по (2.22),<br>в сек. | 1 вариант                          |       |       | 3 вариант |       |       |
|--------------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-----------|-------|-------|
|                                      | Скорость шлаковых отложений, м/сек |       |       |           |       |       |
|                                      | 500                                | 750   | 1000  | 500       | 750   | 1000  |
|                                      | 0.110                              | 0.085 | 0.076 | 0.301     | 0.203 | 0.152 |

При расчетном варианте 2 значения  $T_{01}$  для трехслойного основания по трансцендентному уравнению (2.23) при  $v_s=500$ м/сек для шлаковых отложений оказалось  $T_{01}=0.226$ сек.

Преобладающие периоды площадки строительства АЭС с расчетными значениями, приведенными в табл. 2.4, были проявлены во время Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года (см. рис.3.21) на спектрах реакции, построенных по записанным на территории АЭС акселерограммам (0.24сек), при взрывных воздействиях (0.22сек) в 1992 году (Ф.Аракелян, В.Мнацаканян, О.Погосян), а также при анализах микроколебаний территории (0.066сек) АЭС, проведенных нами совместно с А.Хачяном.

Они подтвердились также по синтетической акселерограмме (ИГИС НАН РА), генерированной для площадки АЭС, и по построенному на ее основе спектру реакции\* (рис. 2.23).

\* См. сводный отчет по теме "Доизучение сейсмических условий Армянской АЭС". Армэнергосейсмопроект (координатор), НССЗ РА, ИГИС НАН РА, ИГН НАН РА, АРМНИИСА, ЕГУ, ГГЭ Армгосупрнедра, ГПО Армпромстроймат. Фонды ААЭС. Ереван, 1994.

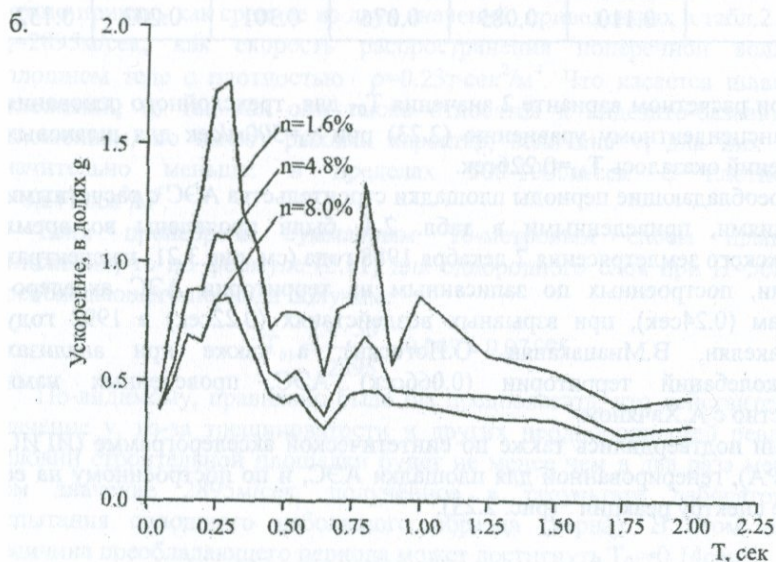
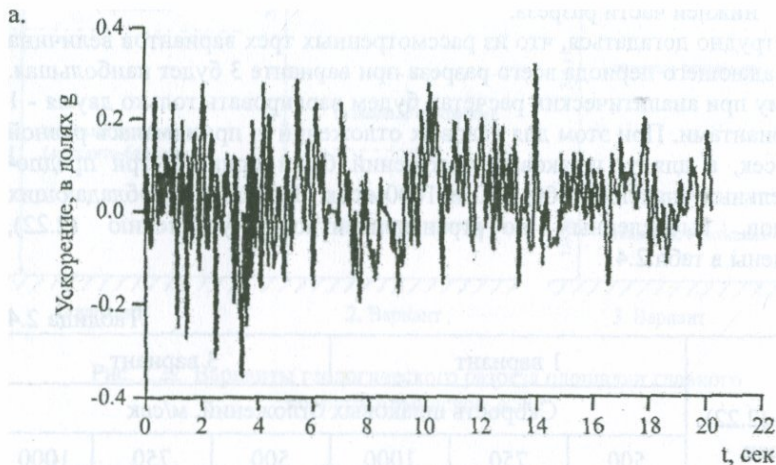


Рис. 2.23.

- а. Синтетическая расчетная акселерограмма площадки Армянской АЭС для уровня МРЗ.
- б. Спектр реакции по синтетической акселерограмме площадки Армянской АЭС для уровня МРЗ.



5.1. Ленинакан – Гюмри. После Спитакского землетрясения развернулась большая дискуссия относительно грунтовых условий г.Ленинакана в связи с массовыми разрушениями на территории города. Согласно данным ряда авторов [11,145,151,152,166,205,216], грунты старой центральной части города представляются в виде 350-метровой шестислойной колонки со следующими параметрами:

$$H_1 = 5.5 \text{ м}, \quad v_{s1} = 200 \text{ м/сек}, \quad \rho_1 = 0.20 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$$

$$H_2 = 7.0 \text{ м}, \quad v_{s2} = 300 \text{ м/сек}, \quad \rho_2 = 0.20 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$$

$$H_3 = 12.5 \text{ м}, \quad v_{s3} = 450 \text{ м/сек}, \quad \rho_3 = 0.21 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$$

$$H_4 = 25 \text{ м}, \quad v_{s4} = 350 \text{ м/сек}, \quad \rho_4 = 0.20 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$$

$$H_5 = 100 \text{ м}, \quad v_{s5} = 550 \text{ м/сек}, \quad \rho_5 = 0.21 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$$

$$H_6 = 200 \text{ м}, \quad v_{s6} = 800 \text{ м/сек}, \quad \rho_6 = 0.21 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4.$$

Виды материалов пород слоев и принятая расчетная схема геологического разреза показаны на рис.2.24.

Так как число слоев для этого разреза больше чем 4, согласно формулам (2.26), его сначала привели к трехслойному разрезу со следующими приведенными параметрами:

$$\bar{H}_1 = 12.5 \text{ м}, \quad \bar{v}_{s1} = 246 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_1 = 0.20 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4 \quad (1 \text{ и } 2 \text{ слоя})$$

$$\bar{H}_2 = 37.5 \text{ м}, \quad \bar{v}_{s2} = 378 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_2 = 0.203 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4 \quad (3 \text{ и } 4 \text{ слоя})$$

$$\bar{H}_3 = 300 \text{ м}, \quad \bar{v}_{s3} = 695 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_3 = 0.21 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4 \quad (5 \text{ и } 6 \text{ слоя}).$$

Подставляя эти данные в трансцендентное уравнение (2.23а), после его решения получили следующее значение первых трех периодов свободных колебаний разреза:

$$T_{01}=2.011 \text{ сек}, \quad T_{02}=0.711 \text{ сек}, \quad T_{03}=0.465 \text{ сек}.$$

Для оценки погрешности при проведении реального разреза к различным количествам слоев этот же 6-слойный разрез был приведен к 4-слойному разрезу с параметрами:

$$\bar{H}_1 = 12.5 \text{ м}, \quad \bar{v}_{s1} = 246 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_1 = 0.20 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4 \quad (1 \text{ и } 2 \text{ слоя})$$

$$\bar{H}_2 = 37.5 \text{ м}, \quad \bar{v}_{s2} = 378 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_2 = 0.203 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4 \quad (3 \text{ и } 4 \text{ слоя})$$

$$\bar{H}_3 = 100 \text{ м}, \quad \bar{v}_{s3} = 550 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_3 = 0.21 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4 \quad (5 \text{ слой})$$

$$\bar{H}_4 = 200 \text{ м}, \quad \bar{v}_{s4} = 800 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_4 = 0.21 \text{ т} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4 \quad (6 \text{ слой}).$$

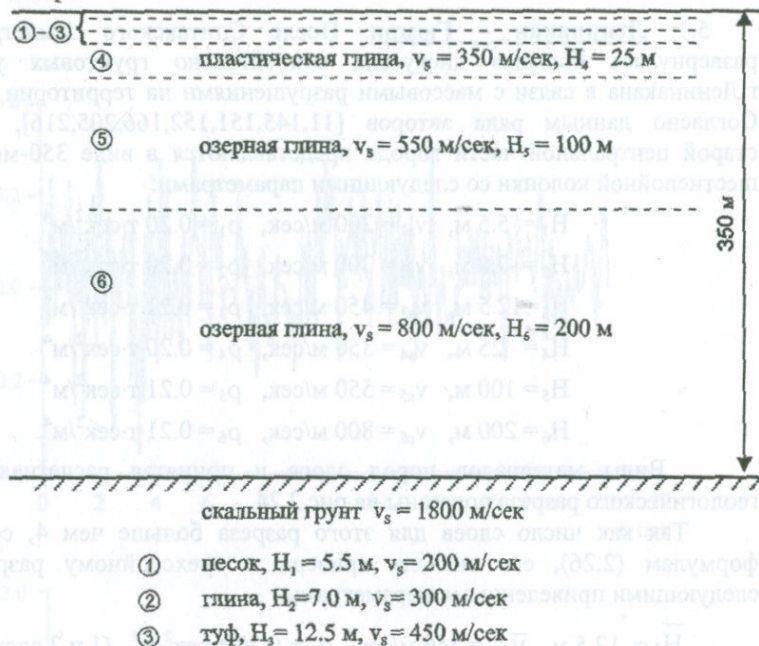


Рис. 2.24. Геологический разрез центральной части города Гюмри [145, 216].

В этом случае решения трансцендентного уравнения (2.24) для четырехслойного разреза дали следующие значения для периодов свободных колебаний:

$$T_{01} = 1.869 \text{ сек}, T_{02} = 0.751 \text{ сек}, T_{03} = 0.455 \text{ сек}.$$

Как видно из сопоставления полученных результатов, наибольшее отклонение при проведении 6-слойного разреза к трехслойному или четырехслойному имеет место для периода первой формы  $T_{01}$ , и оно не превышает 7% (в сторону уменьшения), что свидетельствует о приемлемости формул приведения (2.26) независимо от числа приведенных слоев.

Как было отмечено выше, в центральной части города Гюмри при микроколебаниях преобладали периоды со значениями 0.51-0.64 сек, которые близки к выше рассчитанным значениям периодов по второй и третьей форме колебаний. При измерении микроколебаний на участках A1, A2 (рис.2.12) с помощью длиннопериодных сейсмометров [166, 198, 205] помимо этих значений были обнаружены также периоды колебаний в диапазоне 1.5-2.5 сек. Записи велесограмм (рис.2.6) на территории Гюмри во время сильного афтершока 31 декабря 1988 года содержали колебания с периодами 0.8-2.0 [124], которые хорошо



согласуются с расчетными значениями по первой и второй форме колебания грунта. Таким образом, значение первого периода  $T_{01}$  колебания грунта в центральной части города Гюмри можно принять равным около 2.0сек, а значения последующих периодов  $T_{02}$  и  $T_{03}$  можно принимать равными соответственно 0.7 и 0.45сек.

5.2. Гюмри. Сразу после землетрясения 1988 года возник вопрос о новых территориях строительства массовой застройки для жителей, пострадавших от землетрясения. После долгих дискуссий была выбрана территория северо-западной части города на высоте около 1700 метров над уровнем моря – квартал Мармашен. На рис. 2.25 показан геологический разрез одного из участков этого квартала согласно данным японского специалиста К.Ишихара [151,152]. Здесь, в отличие от центральной старой части Гюмри, на глубине около 40 метров проявляются коренные породы (базальты), вследствие чего значительно изменяются величины преобладающих периодов грунта.

Параметры пятислойной неоднородной литологической колонки, согласно К.Ишихара, следующие:

|                         |                               |                                             |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|
| $H_1 = 5.6 \text{ м,}$  | $v_{s1} = 250 \text{ м/сек,}$ | $\rho_1 = 0.20 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4$  |
| $H_2 = 6.7 \text{ м,}$  | $v_{s2} = 450 \text{ м/сек,}$ | $\rho_2 = 0.21 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4$  |
| $H_3 = 5.7 \text{ м,}$  | $v_{s3} = 250 \text{ м/сек,}$ | $\rho_3 = 0.20 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4$  |
| $H_4 = 12.5 \text{ м,}$ | $v_{s4} = 600 \text{ м/сек,}$ | $\rho_4 = 0.22 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4$  |
| $H_5 = 10 \text{ м,}$   | $v_{s5} = 350 \text{ м/сек,}$ | $\rho_5 = 0.21 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4.$ |

Гюмри

|                 |               |                           |        |
|-----------------|---------------|---------------------------|--------|
| ①               | глина         | $v_s = 250 \text{ м/сек}$ | 5.6 м  |
| ②               | туф           | $v_s = 450 \text{ м/сек}$ | 6.7 м  |
| ③               | глина         | $v_s = 250 \text{ м/сек}$ | 5.7 м  |
| ④               | гравий,       | $v_s = 600 \text{ м/сек}$ | 12.5 м |
| ⑤               | озерная глина | $v_s = 350 \text{ м/сек}$ | 10.0 м |
| б а з а л ь т ы |               |                           |        |

Рис. 2.25. Геологический разрез участка Мармашен города Гюмри [152].

Для вычисления периодов свободных колебаний этого разреза первый и второй слой по формулам (2.26) были приведены к одному слою со следующими параметрами:

$$\bar{H}_1 = 12.3 \text{ м}, \quad \bar{v}_{s1} = 329 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_1 = 0.205 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4$$

Этот приведенный слой рассматривался с последующими тремя слоями и как четырехслойный эквивалент разреза по трансцендентному уравнению (2.24), были получены следующие значения периодов:

$$T_{01}=0.428 \text{ сек}, \quad T_{02}=0.17 \text{ сек}, \quad T_{03}=0.084 \text{ сек}.$$

6. **Мехико – Аламада Парк.** После известного сентябрьского Мексиканского землетрясения 1985г. с магнитудой  $M=8.1$  и эпицентром в Тихом океане, когда в центральной части города Мехико на расстоянии 400км от эпицентра многие высотные здания получили серьезные повреждения, грунтовые условия этих зданий стали предметом пристального внимания. Параметры одного из геологических разрезов из 14 слоев в районе Аламада Парк в центральной части города Мехико, согласно [126], приведены в табл.2.5.

Общая мощность всего разреза составляет 47.7м. Грунты участка в основном являются отложением старого озера и представлены толстым слоем глины. Породы всех слоев находятся в сильно обводненном состоянии. До глубины 33.5м наносы в основном состоят из илистой глины.

Таблица 2.5

| Номер<br>слоя | Породы                 | Мощность $H_k$<br>в м | Плотность $\rho_k$<br>$\text{т·сек}^2/\text{м}^4$ | Скорость $v_{s_k}$<br>в м/сек |
|---------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1.            | Насыпь                 | 5.5                   | 0.169                                             | 76.9                          |
| 2.            | Песок                  | 3.6                   | 0.153                                             | 114.4                         |
| 3.            | Суглинок I             | 6.6                   | 0.119                                             | 48.5                          |
| 4.            | Глинистый грунт        | 0.7                   | 0.180                                             | 62.3                          |
| 5.            | Суглинок II            | 3.3                   | 0.118                                             | 55.2                          |
| 6.            | Суглинок III           | 3.85                  | 0.126                                             | 61.0                          |
| 7.            | Суглинок IV            | 3.55                  | 0.120                                             | 62.5                          |
| 8.            | Суглинок $V_a$         | 1.9                   | 0.122                                             | 76.7                          |
| 9.            | Суглинок $V_b$         | 4.4                   | 0.119                                             | 77.7                          |
| 10.           | Песок                  | 4.7                   | 0.180                                             | 148                           |
| 11.           | Суглинок $I_a$         | 3.35                  | 0.129                                             | 87.0                          |
| 12.           | Вулканический<br>песок | 0.4                   | 0.178                                             | 105.9                         |
| 13.           | Суглинок $I_b$         | 3.3                   | 0.127                                             | 93.8                          |
| 14.           | Песок                  | 2.45                  | 0.130                                             | 138.4                         |



Согласно формулам (2.26) и данным табл.2.5, 14-слойный разрез был приведен к 4-слойному разрезу со следующими параметрами:

$$\bar{H}_1=15.7 \text{ м}, \quad \bar{V}_{s1}=65.59 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_1=0.144 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4 \quad (1-3 \text{ слой})$$

$$\bar{H}_2=11.4 \text{ м}, \quad \bar{V}_{s2}=59.7 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_2=0.121 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4 \quad (4-7 \text{ слой})$$

$$\bar{H}_3=11.0 \text{ м}, \quad \bar{V}_{s3}=97.37 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_3=0.146 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4 \quad (8-10 \text{ слой})$$

$$\bar{H}_4=9.5 \text{ м}, \quad \bar{V}_{s4}=99.82 \text{ м/сек}, \quad \bar{\rho}_4=0.131 \text{ т·сек}^2/\text{м}^4 \quad (11-14 \text{ слой}).$$

Решение трансцендентного уравнения (2.24) для этого эквивалентного четырехслойного разреза дало следующие значения периодов:

$$T_{01}=2.402 \text{ сек}, \quad T_{02}=0.852 \text{ сек}, \quad T_{03}=0.553 \text{ сек}.$$

На участке Alameda Park в г.Мехико при двух землетрясениях значения преобладающих периодов, установленные по максимальному значению на спектре скоростей (наибольший пик при нулевом затухании) имели следующие значения [126]:

- при землетрясении 11 мая 1962 года  
 $T_{01}=2.40 \text{ сек}$  по компоненте N11W  
 $T_{01}=2.35-2.50 \text{ сек}$  по компоненте N79E
- при землетрясении 19 мая 1962 года  
 $T_{01}=2.60 \text{ сек}$  по компоненте N11W  
 $T_{01}=2.40 \text{ сек}$  по компоненте N79E.

При землетрясении 19 сентября 1985 года на территории г.Мехико преобладающие периоды колебания грунта находились в диапазоне  $2.0 \div 2.6 \text{ сек}$ . Как видим, имеется хорошая сходимость между расчетными и регистрируемыми значениями преобладающих периодов.

## 2.7. УПРОЩЕННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНОГО ПЕРИОДА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ МНОГОСЛОЙНОГО ОСНОВАНИЯ

Как видно из вышеизложенного, определение периодов свободных колебаний невозможно без применения специальных компьютерных программ и самих компьютеров. Ниже излагается упрощенный метод определения величины основного периода свободного колебания толщи без применения компьютеров [164]. Мы предприняли попытку решить эту задачу путем последовательного приведения многослойной системы к эквивалентной двухслойной. С этой целью в трансцендентном уравнении для двухслойного основания (2.22) примем следующие обозначения (рис.2.26):

$$T_1 = \frac{4H_1}{v_{s1}} = 4H_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{G_1}} \quad (2.27)$$

$$T_2 = \frac{4H_2}{v_{s2}} = 4H_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{G_2}},$$

где  $T_1$  и  $T_2$  соответственно периоды основного тона свободных колебаний первого и второго слоев при условии их самостоятельного существования как однородного однослойного основания. С учетом этих обозначений уравнение (2.22) для двухслойного разреза можно представить в виде

$$\operatorname{tg} \frac{\pi T_1}{2 T_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi T_2}{2 T_0} = \frac{\rho_2 H_2 T_1}{\rho_1 H_1 T_2}, \quad (2.28)$$

где  $T_0$  – период свободных колебаний общей двухслойной системы.

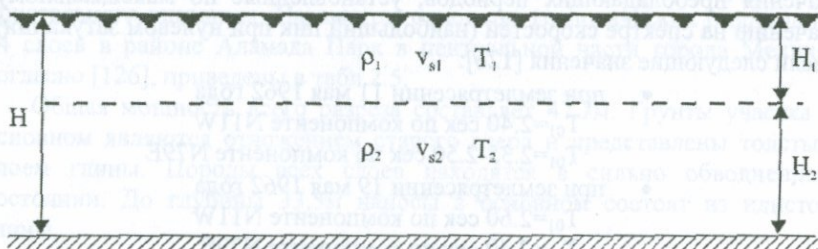


Рис. 2.26. Расчетная схема двухслойного разреза.

Обозначая

$$\frac{\pi T_1}{2 T_0} = \theta, \quad \frac{H_1}{H_2} = \alpha, \quad \frac{T_1}{T_2} = \beta \quad (2.29)$$

и принимая  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , уравнение (2.28) принимает вид

$$\operatorname{tg} \theta \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{\beta} = \frac{\beta}{\alpha}. \quad (2.30)$$

Следовательно, окончательное выражение для неизвестного периода  $i$ -ой формы  $T_{0i}$  будет

$$T_{0i} = \frac{\pi}{2\theta_i} T_1. \quad (2.31)$$

где  $\theta_i$  – корни трансцендентного уравнения (2.30) при заданных параметрах  $\alpha = H_1/H_2$  и  $\beta = T_1/T_2$ .



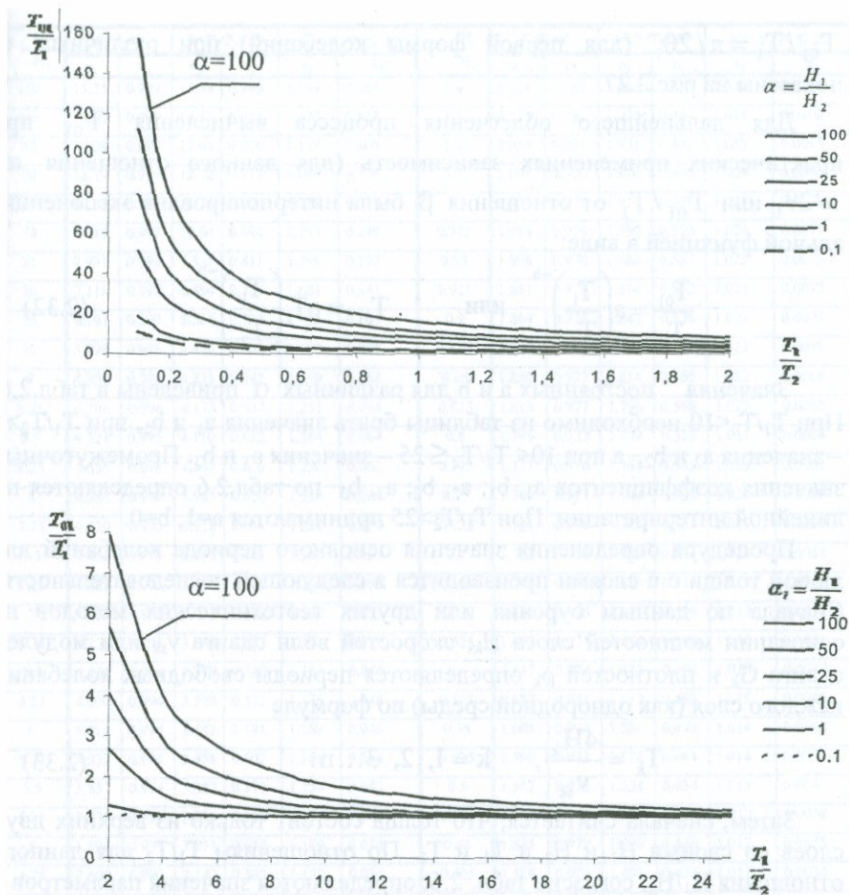


Рис. 2.27. Графическая зависимость основного периода двухслойного основания (2.17), полученная на основе решения частотного уравнения (2.30).

Для охвата всех практически возможных случаев двухслойной толщи были вычислены корни уравнения (2.30) для следующих диапазонов параметров  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$0.025 \leq \alpha \leq 100, \quad 0.025 \leq \beta \leq 25$$

с очень маленькими интервалами. Всего было принято 91 значение для  $\alpha$  и 64 значений для  $\beta$ , т.е. были вычислены все  $91 \cdot 64 = 5824$  корни (первых трех форм колебаний) уравнение (2.30).

Таким образом, фактически, были рассчитаны корни трансцендентного уравнения для 5824 различных вариантов двухслойной толщи. Для некоторых вариантов графические зависимости

$T_{01}/T_1 = \pi/2\theta_1$  (для первой формы колебаний) при различных  $\alpha$  показаны на рис.2.27.

Для дальнейшего облегчения процесса вычисления  $T_{01}$  при практических применениях зависимость (для данного отношения  $\alpha$ )  $\pi/2\theta_1$  или  $T_{01}/T_1$  от отношения  $\beta$  была интерполирована экспоненциальной функцией в виде:

$$\frac{T_{01}}{T_1} = a \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{-b} \quad \text{или} \quad T_{01} = a T_1 \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{-b}. \quad (2.32)$$

Значения постоянных  $a$  и  $b$  для различных  $\alpha$  приведены в табл.2.6. При  $T_1/T_2 < 10$  необходимо из таблицы брать значения  $a_1$  и  $b_1$ , при  $T_1/T_2 > 1$  — значения  $a_2$  и  $b_2$ , а при  $10 < T_1/T_2 \leq 25$  — значения  $a_3$  и  $b_3$ . Промежуточные значения коэффициентов  $a_1, b_1; a_2, b_2; a_3, b_3$  по табл.2.6 определяются по линейной интерпретации. При  $T_1/T_2 > 25$  принимаются  $a=1, b=0$ .

Процедура определения значения основного периода колебаний для любой толщ  $s$  с  $n$  слоями производится в следующей последовательности. Сначала по данным бурения или других геотехнических методов на основании мощностей слоев  $H_k$ , скоростей волн сдвига  $v_{sk}$  или модулей сдвига  $G_k$  и плотностей  $\rho_k$  определяются периоды свободных колебаний каждого слоя (как однородной среды) по формуле

$$T_k = \frac{4H_k}{v_{sk}}, \quad k = 1, 2, 3 \dots n. \quad (2.33)$$

Затем, сначала считается, что толща состоит только из верхних двух слоев со своими  $H_1$  и  $H_2$  и  $T_1$  и  $T_2$ . По отношениям  $T_1/T_2$  для данного отношения  $H_1/H_2$ , согласно табл. 2.6, определяются значения параметров  $a$  и  $b$  и по формуле (2.32) вычисляется период свободных колебаний *условной двухслойной* толщ (из первых двух слоев). Этот период обозначается через  $T_{01}^{1-2}$ . Далее, верхние два слоя рассматриваются как один эквивалентный слой с мощностью  $H_1+H_2$  и уже вычисленным периодом  $T_{01}^{1-2}$  и его уже рассматривают с третьим слоем с мощностью  $H_3$  и периодом  $T_3$ .

Аналогичным образом по отношениям  $T_{01}^{1-2}/T_3$  и  $(H_1+H_2)/H_3$  по той же табл. 2.6 определяются новые значения параметров  $a$  и  $b$  и по той же формуле (2.32) вычисляется период свободных колебаний *условной трехслойной* толщ, который обозначается  $T_{01}^{1-3}$ . Этот процесс продолжается для всех слоев. Полученное в последнем этапе значение периода  $T_{01}^{1-n}$  и будет искомым значением основного периода свободных колебаний всей толщ с  $n$  слоями. В иной форме (с помощью масштабных графиков) такой подход был применен в работе [170].

Таблица 2.6



| $\alpha = \frac{H_1}{H_2}$ | $T_1/T_2 < 1$ |       | $1 < T_1/T_2 < 10$ |       | $10 < T_1/T_2 \leq 25$ |        | $\alpha = \frac{H_1}{H_2}$ | $T_1/T_2 < 1$ |       | $1 < T_1/T_2 < 10$ |       | $10 < T_1/T_2 \leq 25$ |        |
|----------------------------|---------------|-------|--------------------|-------|------------------------|--------|----------------------------|---------------|-------|--------------------|-------|------------------------|--------|
|                            | $a_1$         | $b_1$ | $a_2$              | $b_2$ | $a_3$                  | $b_3$  |                            | $a_1$         | $b_1$ | $a_2$              | $b_2$ | $a_3$                  | $b_3$  |
| 100                        | 15.75         | 0.999 | 15.34              | 0.940 | 5.124                  | 0.465  | 1.4                        | 2.174         | 0.982 | 1.980              | 0.455 | 1.038                  | 0.0111 |
| 90                         | 14.94         | 0.999 | 14.52              | 0.934 | 4.636                  | 0.438  | 1.3                        | 2.116         | 0.982 | 1.926              | 0.439 | 1.035                  | 0.0102 |
| 80                         | 14.09         | 0.999 | 13.64              | 0.926 | 4.157                  | 0.408  | 1.2                        | 2.056         | 0.981 | 1.871              | 0.422 | 1.032                  | 0.0095 |
| 70                         | 13.19         | 0.999 | 12.72              | 0.917 | 3.689                  | 0.376  | 1.1                        | 1.994         | 0.980 | 1.814              | 0.405 | 1.029                  | 0.0086 |
| 60                         | 12.38         | 0.98  | 11.73              | 0.906 | 3.235                  | 0.339  | 1                          | 1.930         | 0.979 | 1.913              | 0.598 | 1.027                  | 0.0079 |
| 50                         | 11.16         | 0.999 | 10.64              | 0.890 | 2.797                  | 0.298  | 0.975                      | 1.914         | 0.979 | 1.897              | 0.593 | 1.026                  | 0.0077 |
| 25                         | 7.937         | 0.998 | 7.335              | 0.811 | 1.799                  | 0.172  | 0.95                       | 1.898         | 0.978 | 1.880              | 0.587 | 1.025                  | 0.0075 |
| 20                         | 7.118         | 0.998 | 6.494              | 0.779 | 1.621                  | 0.141  | 0.925                      | 1.881         | 0.978 | 1.864              | 0.582 | 1.025                  | 0.0073 |
| 15                         | 6.191         | 0.997 | 5.564              | 0.734 | 1.451                  | 0.109  | 0.9                        | 1.864         | 0.978 | 1.847              | 0.576 | 1.024                  | 0.0071 |
| 10                         | 5.098         | 0.996 | 4.478              | 0.662 | 1.290                  | 0.075  | 0.875                      | 1.847         | 0.978 | 1.831              | 0.571 | 1.023                  | 0.0069 |
| 9                          | 4.850         | 0.996 | 4.236              | 0.642 | 1.259                  | 0.068  | 0.85                       | 1.830         | 0.977 | 1.814              | 0.565 | 1.022                  | 0.0066 |
| 8.75                       | 4.786         | 0.996 | 4.173              | 0.637 | 1.251                  | 0.066  | 0.825                      | 1.813         | 0.977 | 1.796              | 0.558 | 1.022                  | 0.0065 |
| 8.5                        | 4.721         | 0.995 | 4.110              | 0.632 | 1.244                  | 0.064  | 0.8                        | 1.795         | 0.977 | 1.779              | 0.552 | 1.021                  | 0.0063 |
| 8.25                       | 4.655         | 0.995 | 4.047              | 0.626 | 1.236                  | 0.062  | 0.775                      | 1.777         | 0.976 | 1.761              | 0.545 | 1.020                  | 0.0061 |
| 8                          | 4.588         | 0.995 | 3.983              | 0.620 | 1.228                  | 0.060  | 0.75                       | 1.760         | 0.977 | 1.744              | 0.538 | 1.020                  | 0.0059 |
| 7.75                       | 4.520         | 0.995 | 3.918              | 0.614 | 1.221                  | 0.059  | 0.725                      | 1.741         | 0.976 | 1.726              | 0.531 | 1.019                  | 0.0057 |
| 7.5                        | 4.452         | 0.995 | 3.851              | 0.608 | 1.213                  | 0.057  | 0.7                        | 1.723         | 0.976 | 1.708              | 0.524 | 1.018                  | 0.0055 |
| 7.25                       | 4.382         | 0.995 | 3.784              | 0.601 | 1.205                  | 0.055  | 0.675                      | 1.704         | 0.975 | 1.689              | 0.516 | 1.018                  | 0.0053 |
| 7                          | 4.311         | 0.995 | 3.717              | 0.594 | 1.198                  | 0.053  | 0.65                       | 1.686         | 0.975 | 1.671              | 0.508 | 1.017                  | 0.0051 |
| 6.75                       | 4.239         | 0.995 | 3.648              | 0.587 | 1.191                  | 0.051  | 0.625                      | 1.667         | 0.975 | 1.652              | 0.500 | 1.016                  | 0.005  |
| 6.5                        | 4.165         | 0.994 | 3.578              | 0.580 | 1.183                  | 0.049  | 0.6                        | 1.647         | 0.974 | 1.633              | 0.492 | 1.016                  | 0.0047 |
| 6.25                       | 4.090         | 0.994 | 3.508              | 0.572 | 1.176                  | 0.048  | 0.575                      | 1.637         | 0.971 | 1.613              | 0.483 | 1.015                  | 0.0045 |
| 6                          | 4.014         | 0.994 | 3.442              | 0.564 | 1.169                  | 0.046  | 0.55                       | 1.608         | 0.974 | 1.594              | 0.473 | 1.014                  | 0.0043 |
| 5.75                       | 3.937         | 0.994 | 3.458              | 0.602 | 1.161                  | 0.044  | 0.525                      | 1.590         | 0.973 | 1.574              | 0.464 | 1.014                  | 0.0042 |
| 5.5                        | 3.857         | 0.994 | 3.382              | 0.593 | 1.154                  | 0.042  | 0.5                        | 1.567         | 0.973 | 1.554              | 0.454 | 1.013                  | 0.004  |
| 5.25                       | 3.776         | 0.993 | 3.304              | 0.584 | 1.147                  | 0.040  | 0.475                      | 1.547         | 0.973 | 1.533              | 0.443 | 1.012                  | 0.0038 |
| 5                          | 3.694         | 0.993 | 3.331              | 0.635 | 1.139                  | 0.038  | 0.45                       | 1.525         | 0.972 | 1.516              | 0.446 | 1.012                  | 0.0035 |
| 4.75                       | 3.609         | 0.993 | 3.145              | 0.563 | 1.132                  | 0.036  | 0.425                      | 1.504         | 0.972 | 1.491              | 0.421 | 1.011                  | 0.0034 |
| 4.5                        | 3.523         | 0.992 | 3.051              | 0.551 | 1.125                  | 0.034  | 0.4                        | 1.482         | 0.972 | 1.469              | 0.409 | 1.010                  | 0.0032 |
| 4.25                       | 3.434         | 0.992 | 2.979              | 0.541 | 1.118                  | 0.033  | 0.375                      | 1.460         | 0.971 | 1.447              | 0.396 | 1.010                  | 0.003  |
| 4                          | 3.342         | 0.992 | 2.894              | 0.528 | 1.110                  | 0.031  | 0.35                       | 1.437         | 0.971 | 1.424              | 0.382 | 1.009                  | 0.0028 |
| 3.75                       | 3.249         | 0.991 | 2.898              | 0.575 | 1.103                  | 0.029  | 0.325                      | 1.414         | 0.971 | 1.401              | 0.368 | 1.008                  | 0.0026 |
| 3.5                        | 3.152         | 0.991 | 2.805              | 0.561 | 1.096                  | 0.027  | 0.3                        | 1.390         | 0.971 | 1.378              | 0.353 | 1.008                  | 0.0024 |
| 3.25                       | 3.053         | 0.990 | 2.710              | 0.545 | 1.089                  | 0.025  | 0.275                      | 1.366         | 0.971 | 1.353              | 0.337 | 1.007                  | 0.0022 |
| 3                          | 2.949         | 0.990 | 2.612              | 0.528 | 1.082                  | 0.023  | 0.25                       | 1.341         | 0.971 | 1.329              | 0.320 | 1.006                  | 0.002  |
| 2.75                       | 2.843         | 0.989 | 2.512              | 0.510 | 1.075                  | 0.021  | 0.225                      | 1.315         | 0.971 | 1.303              | 0.301 | 1.006                  | 0.0018 |
| 2.5                        | 2.731         | 0.988 | 2.408              | 0.490 | 1.068                  | 0.019  | 0.2                        | 1.289         | 0.971 | 1.276              | 0.281 | 1.005                  | 0.0016 |
| 2.25                       | 2.617         | 0.987 | 2.398              | 0.557 | 1.061                  | 0.017  | 0.175                      | 1.261         | 0.972 | 1.267              | 0.305 | 1.004                  | 0.0014 |
| 2                          | 2.494         | 0.986 | 2.282              | 0.531 | 1.054                  | 0.015  | 0.15                       | 1.233         | 0.973 | 1.237              | 0.280 | 1.004                  | 0.0012 |
| 1.9                        | 2.444         | 0.986 | 2.234              | 0.520 | 1.051                  | 0.015  | 0.125                      | 1.203         | 0.974 | 1.206              | 0.251 | 1.003                  | 0.001  |
| 1.8                        | 2.392         | 0.985 | 2.185              | 0.508 | 1.049                  | 0.014  | 0.1                        | 1.172         | 0.975 | 1.173              | 0.218 | 1.002                  | 0.0008 |
| 1.7                        | 2.340         | 0.984 | 2.135              | 0.496 | 1.046                  | 0.013  | 0.075                      | 1.139         | 0.977 | 1.137              | 0.181 | 1.002                  | 0.0006 |
| 1.6                        | 2.284         | 0.984 | 2.084              | 0.483 | 1.043                  | 0.012  | 0.05                       | 1.103         | 0.981 | 1.098              | 0.136 | 1.001                  | 0.0004 |
| 1.5                        | 2.231         | 0.983 | 2.032              | 0.469 | 1.040                  | 0.0118 | 0.025                      | 1.062         | 0.986 | 1.054              | 0.079 | 1.000                  | 0.0002 |

Если в каком-то  $k$ -ом этапе окажется, что  $T_{01}^{1-k}/T_k > 25$ , то в качестве  $T_{01}^{1-k}$  принимается:

$$T_{01}^{1-k} = T_{01}^{1-(k-1)} + T_k. \quad (2.34)$$

В случае наличия среди слоев очень тонкого слоя с номером  $k$ , его можно объединить со следующим  $k+1$  слоем с приведенными мощностью  $\bar{H}_k$  и скоростью  $\bar{v}_{sk}$ :

$$\bar{H}_k = H_k + H_{k+1} \quad \bar{v}_{sk} = \frac{H_k + H_{k+1}}{\frac{H_k}{v_{sk}} + \frac{H_{k+1}}{v_{sk+1}}}. \quad (2.35)$$

В этом случае число слоев искусственно уменьшается на единицу.

Для иллюстрации метода рассмотрим два характерных примера. В качестве первого примера определим первый период шестислойного разреза для грунтов г.Гюмри (рис.2.24), рассмотренного выше (пример 5.1). Пять последовательных шагов будут выглядеть следующим образом:

$$1) \quad T_1 = \frac{4 H_1}{V_{s1}} = 0.11, \quad T_2 = \frac{4 H_2}{V_{s2}} = 0.093,$$

$$\alpha = \frac{H_1}{H_2} = 0.785, \quad \beta = \frac{T_1}{T_2} = 1.178 > 1,$$

из табл. 2.6 находим  $a_2=1.769, b_2=0.548$

по формуле (2.32)  $T_{01}^{1-2} = 1.769 \times 0.11 \times (1.178)^{-0.548248} = 0.177 \text{ сек.}$

$$2) \quad T_{01}^{1-2} = 0.177, \quad T_3 = \frac{4 H_3}{V_{s3}} = 0.111,$$

$$\alpha = \frac{H_1 + H_2}{H_3} = 1, \quad \beta = \frac{T_{01}^{1-2}}{T_3} = 1.6 > 1,$$

из табл. 2.6 находим  $a_2=1.913, b_2=0.598$

по формуле (2.32)  $T_{01}^{1-3} = 1.913 \times 0.177 \times (1.6)^{-0.598} = 0.256 \text{ сек.}$

$$3) \quad T_{01}^{1-3} = 0.256, \quad T_4 = \frac{4 H_4}{V_{s4}} = 0.285,$$

$$\alpha = \frac{H_1 + H_2 + H_3}{H_4} = 1, \quad \beta = \frac{T_{01}^{1-3}}{T_4} = 0.898 < 1,$$

из табл. 2.6 находим  $a_1=1.930, b_1=0.980$

по формуле (2.32)  $T_{01}^{1-4} = 1.930 \times 0.256 \times (0.898)^{-0.980} = 0.550 \text{ сек.}$



$$4) \quad T_{01}^{1-4} = 0.550, \quad T_5 = \frac{4 H_5}{V_{s5}} = 0.727,$$

$$\alpha = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{H_5} = 0.5, \quad \beta = \frac{T_{01}^{1-4}}{T_5} = 0.7569 < 1,$$

из табл. 2.6 находим  $a_1=1.567, b_1=0.973$

по формуле (2.32)  $T_{01}^{1-5} = 1.567 \times 0.550 \times (0.756)^{-0.973} = 1.131$  сек.

$$5) \quad T_{01}^{1-5} = 1.131, \quad T_6 = \frac{4 H_6}{V_{s6}} = 1,$$

$$\alpha = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5}{H_6} = 0.75, \quad \beta = \frac{T_{01}^{1-5}}{T_6} = 1.131,$$

из табл. 2.6 находим  $a_2=1.744, b_2=0.538$

по формуле (2.32)  $T_{01}^{1-6} = 1.744 \times 1.131 \times (1.131)^{-0.538} = 1.846$  сек.

Окончательно получим

$$T_{01}^{1-6} = T_{01} = 1.846 \text{ сек.}$$

Отметим, что для этого примера решение трансцендентного уравнения дало

$$T_{01} = 1.869 \text{ сек.}$$

Как видим, отклонение несущественно — около 1% в сторону уменьшения.

В качестве второго примера ниже приводится последовательность операций по вычислению  $T_{01}$  для 14-слойного участка Аламада Парк - Мексика (пример 6). Последовательность начальных 1, 2, 3 и последних 11, 12 и 13 шагов будет выглядеть следующим образом:

$$1) \quad T_1 = \frac{4 H_1}{V_{s1}} = 0.286, \quad T_2 = \frac{4 H_2}{V_{s2}} = 0.125,$$

$$\alpha = \frac{H_1}{H_2} = 1.527, \quad \beta = \frac{T_1}{T_2} = 2.272,$$

из табл. 2.6  $a_2=2.05, b_2=0.47$

по формуле (2.32)  $T_{01}^{1-2} = 2.05 \times 0.286 \times (2.272)^{-0.47} = 0.398$  сек.

$$2) \quad T_{01}^{1-2} = 0.398, \quad T_3 = \frac{4 H_3}{V_{s3}} = 0.544, \quad \beta = \frac{T_{01}^{1-2}}{T_3} = 0.732,$$

$$\alpha = \frac{H_1 + H_2}{H_3} = 1.378,$$

из табл. 2.6  $a_1=2.17, b_1=0.982$

по формуле (2.32)  $T_{01}^{1-3} = 2.17 \times 0.398 \times (0.732)^{-0.982} = 1.155$  сек.

$$3) T_{01}^{1-3} = 1.155, T_4 = \frac{4 H_4}{V_{s4}} = 0.044, \beta = \frac{T_{01}^{1-3}}{T_4} = 25.966 > 25,$$

$$\alpha = \frac{H_1 + H_2 + H_3}{H_4} = 22.428,$$

$$\text{принимаем } T_{01}^{1-4} = T_{01}^{1-3} + T_4 = 1.155 + 0.0449 = 1.200 \text{ сек.}$$

.....

$$11) T_{01}^{1-11} = 2.24385, T_{12} = \frac{4 H_{12}}{V_{s12}} = 0.0151, \beta = \frac{T_{01}^{1-11}}{T_{12}} = 148.6 > 25,$$

$$\alpha = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 + H_7 + H_8 + H_9 + H_{10} + H_{11}}{H_{12}} = 103.625,$$

$$\text{принимаем } T_{01}^{1-12} = T_{01}^{1-11} + T_{12} = 2.243 + 0.015 = 2.258 \text{ сек.}$$

$$12) T_{01}^{1-12} = 2.258, T_{13} = \frac{4 H_{13}}{V_{s13}} = 0.1407, \beta = \frac{T_{01}^{1-12}}{T_{13}} = 16.052 > 10,$$

$$\alpha = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 + H_7 + H_8 + H_9 + H_{10} + H_{11} + H_{12}}{H_{13}} = 12.682,$$

из табл. 2.6  $a_3 = 1.376, b_3 = 0.093$

$$\text{по формуле (2.32)} \quad T_{01}^{1-13} = 1.376 \times 2.258 \times (16.052)^{-0.093} = 2.397 \text{ сек.}$$

$$13) T_{01}^{1-13} = 2.397, T_{14} = \frac{4 H_{14}}{V_{s14}} = 0.070, \beta = \frac{T_{01}^{1-13}}{T_{14}} = 33.863 > 25,$$

$$\alpha = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 + H_7 + H_8 + H_9 + H_{10} + H_{11} + H_{12} + H_{13}}{H_{14}} = 8.428,$$

$$\text{принимаем } T_{01}^{1-14} = T_{01}^{1-13} + T_{14} = 2.397 + 0.070 = 2.468 \text{ сек.}$$

Окончательно получим

$$T_{01}^{1-14} = T_{01} = 2.468 \text{ сек.}$$

Для этого примера решение трансцендентного уравнения дало

$$T_0 = 2.402 \text{ сек.}$$

Как и в предыдущем примере, отклонение составляет всего около 2%.

Сравнительный анализ результатов по вычислению значений основного периода  $T_{01}$  различных разрезов по трансцендентным уравнениям (2.22)-(2.24) и по предлагаемой методике приведен в табл. 2.7.



| N<br>N | Число<br>слоев   | Местность  | Величина $T_{01}$ в сек.                               |                                |                        |
|--------|------------------|------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|
|        |                  |            | По трансцен-<br>дентным<br>уравнениям<br>(2.22)-(2.24) | По упро-<br>щенной<br>методике | Откло-<br>нения<br>в % |
| 1      | 2                | Эль-Центро | 0.785                                                  | 0.745                          | 5.1                    |
| 2      | 3                | Ванадзор   | 0.441                                                  | 0.461                          | 4.5                    |
| 3      | 4                | Гукасян    | 0.463                                                  | 0.482                          | 4.1                    |
| 4      | 4                | Калифорния | 1.585                                                  | 1.606                          | 1.3                    |
| 5      | 5 ( $\bar{4}$ )  | Гюмри      | 0.428                                                  | 0.474                          | 9.7                    |
| 6      | 6 ( $\bar{4}$ )  | Гюмри      | 1.896                                                  | 1.846                          | 1.2                    |
| 7      | 14 ( $\bar{4}$ ) | Мехико     | 2.402                                                  | 2.468                          | 2.7                    |

Данные таблицы подтверждают, что предлагаемый упрощенный способ обеспечивает достаточную точность при вычислении первого периода неоднородного многослойного основания, *исключая раскрытие детерминантов высших порядков для получения сложных трансцендентных уравнений и их решения с применением специальных программ и компьютеров.*

## 2.8. ПЕРИОДЫ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ НЕОДНОРОДНОГО ОСНОВАНИЯ

Как было отмечено выше в 2.3, при однородном приповерхностном слое природы высших форм колебаний отличаются от основной формы нечетными числами 3, 5, 7 ...  $2n-1$ . Возникает естественный вопрос: в каких пределах изменяются эти отношения при неоднородных разрезах. В общем случае получить ответ на поставленный вопрос весьма затруднительно. Поэтому будем ограничиваться изучением этого вопроса для двухслойного разреза с большим диапазоном изменения характеристик слоев (рис. 2.26). Считаем, что эти результаты в той или другой мере могут быть использованы и для многослойных разрезов. При этом будем ограничиваться исследованиями величин периодов второй и третьей форм колебаний  $T_{02}$  и  $T_{03}$ . В качестве исходного трансцендентного уравнения для определения  $T_{01}$ ,  $T_{02}$  и  $T_{03}$  было принято уравнение (2.30) при больших изменениях значений  $\alpha = H_1/H_2$  и  $\beta = T_1/T_2$ .

Таблица 2.8.1

$$v_{s2} = 800 \text{ м/сек}$$

| $v_{s1}$ ,<br>м/сек | $\frac{H_1}{H}$ | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1 |
|---------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| 50                  | $T_{01}/T_{02}$ | 1.88 | 2.96 | 3.05 | 3    | 3.02 | 3.00 | 2.95 | 2.99 | 3.12 | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 3.15 | 5.15 | 5.07 | 4.94 | 4.99 | 5.00 | 4.92 | 5.10 | 5.20 | 5 |
| 100                 | $T_{01}/T_{02}$ | 1.54 | 3.27 | 2.87 | 2.98 | 2.99 | 3.00 | 3    | 3.00 | 2.99 | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 3.48 | 5.27 | 3.73 | 4.77 | 4.98 | 4.99 | 5.00 | 5.00 | 5    | 5 |
| 150                 | $T_{01}/T_{02}$ | 1.99 | 1.77 | 2.39 | 2.87 | 2.97 | 2.98 | 2.99 | 2.99 | 3    | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 3.43 | 3.53 | 3.43 | 3.92 | 4.73 | 4.95 | 4.99 | 5    | 5    | 5 |
| 200                 | $T_{01}/T_{02}$ | 2.42 | 1.79 | 2.09 | 2.62 | 2.91 | 2.98 | 2.99 | 3    | 3    | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 3.56 | 3.79 | 3.57 | 3.64 | 5.57 | 4.83 | 4.98 | 4.99 | 5    | 5 |
| 400                 | $T_{01}/T_{02}$ | 2.94 | 2.52 | 2.22 | 2.27 | 2.50 | 2.88 | 2.94 | 2.99 | 3    | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 4.6  | 4.00 | 4.18 | 4.13 | 4.01 | 4.2  | 4.65 | 4.98 | 5    | 5 |
| 600                 | $T_{01}/T_{02}$ | 2.98 | 2.87 | 2.68 | 2.58 | 2.61 | 2.71 | 2.87 | 2.96 | 3    | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 4.9  | 4.56 | 4.47 | 4.56 | 4.54 | 4.46 | 4.57 | 4.82 | 5    | 5 |
| 700                 | $T_{01}/T_{02}$ | 3    | 2.93 | 2.84 | 2.75 | 2.72 | 2.79 | 2.9  | 2.96 | 3    | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 5    | 4.77 | 4.67 | 4.74 | 4.70 | 4.67 | 4.70 | 4.88 | 5    | 5 |

Таблица 2.8.2

$$v_{s1} = 800 \text{ м/сек}$$

| $v_{s2}$ ,<br>м/сек | $\frac{H_1}{H}$ | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1 |
|---------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|---|
| 50                  | $T_{01}/T_{02}$ | 3.02 | 3.13 | 3.34 | 3.66 | 4.09 | 4.68 | 5.55  | 6.97  | 10.06 | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 5.09 | 5.45 | 6.02 | 6.76 | 7.73 | 8.99 | 10.8  | 20.44 | 17.64 | 5 |
| 100                 | $T_{01}/T_{02}$ | 3.02 | 3.13 | 3.34 | 3.65 | 4.08 | 4.67 | 5.52  | 12.79 | 8.55  | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 5.09 | 5.45 | 6.01 | 6.75 | 7.70 | 8.96 | 10.71 | 26.57 | 20.8  | 5 |
| 150                 | $T_{01}/T_{02}$ | 3.02 | 3.13 | 3.34 | 3.65 | 4.07 | 4.64 | 5.46  | 6.65  | 6.13  | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 5.09 | 5.44 | 6    | 6.73 | 7.67 | 8.87 | 6.65  | 9.51  | 10.22 | 5 |
| 200                 | $T_{01}/T_{02}$ | 3.02 | 3.12 | 3.33 | 3.63 | 4.04 | 4.60 | 5.35  | 6.06  | 4.87  | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 5.08 | 5.44 | 5.98 | 6.70 | 11.1 | 8.68 | 8.99  | 8.06  | 9.06  | 5 |
| 400                 | $T_{01}/T_{02}$ | 3.01 | 3.11 | 3.29 | 3.54 | 6.73 | 4.19 | 4.26  | 6.73  | 3.30  | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 5.07 | 5.38 | 5.85 | 6.40 | 8.73 | 6.44 | 6.34  | 8.73  | 5.89  | 5 |
| 600                 | $T_{01}/T_{02}$ | 3.01 | 3.07 | 3.20 | 5.72 | 3.51 | 3.54 | 3.41  | 3.21  | 3.04  | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 5.05 | 5.27 | 5.57 | 7.72 | 5.61 | 5.56 | 5.71  | 5.59  | 5.18  | 5 |
| 700                 | $T_{01}/T_{02}$ | 3.00 | 3.05 | 3.14 | 3.24 | 3.30 | 3.29 | 3.2   | 3.09  | 3.01  | 3 |
|                     | $T_{01}/T_{03}$ | 5.03 | 5.19 | 5.36 | 5.39 | 5.32 | 5.34 | 5.41  | 5.28  | 5.06  | 5 |

В табл. 2.8.1 приведены значения  $T_{01}/T_{02}$  и  $T_{01}/T_{03}$  соответственно, когда скорости волн сдвига второго-нижнего слоя  $v_{s2}$  — постоянна и равна 800м/сек, а скорости первого — верхнего слоя  $v_{s1}$  изменяются в пределах от 50м/сек до 700м/сек при различных отношениях мощности первого слоя  $H_1$  и  $k$  общей мощности  $H$ . Аналогичные результаты, когда  $v_{s1}$  постоянна (800м/сек), а значение  $v_{s2}$  изменяется от 50м/сек до 700м/сек,



приведены в табл.2.8.2. В обеих таблицах реальные отношения периодов для вариантов, близкие к 3 и 5, выделены серым фоном. Из табл. 2.8.2 видно, что наибольшее отличие  $T_{01}/T_{02}$  и  $T_{01}/T_{03}$  соответственно от 3 и 5 в сторону увеличения имеет место, когда под мощным жестким первым слоем с  $v_{S1}=800\text{м/сек}$  будет расположен нижний рыхлый слой с  $v_{S2}=50\div150\text{м/сек}$  с небольшой мощностью. Это говорит о том, что в таких разрезах величины периодов второй и третьей форм колебаний будут значительно меньше, чем периоды основной формы колебания, и поэтому их влиянием, как очень высокочастотной составляющей воздействия, можно пренебречь. И наоборот, из табл. 2.8.1 видно, что наибольшее отличие  $T_{01}/T_{02}$  и  $T_{01}/T_{03}$  от 3 и 5 в сторону уменьшения имеет место, когда над жестким мощным нижним слоем с  $v_{S2}=800\text{м/сек}$  расположен верхний рыхлый слой с  $v_{S1}=50\div150\text{м/сек}$  с небольшой мощностью ( $H_1/H=0.1\div0.15$ ). В этом случае  $T_{02}$  и  $T_{03}$  будут иметь сопоставимые со значением  $T_{01}$  величины и поэтому пренебречь их влиянием в общем воздействии нельзя.

Что касается значения самого периода основной формы  $T_{01}$ , то для его вычисления выведены соответствующие корректирующие коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$ , для  $H=30\text{-метрового}$  основания, принятого в нормах сейсмостойкого строительства многих стран мира. Эти значения приведены в табл. 2.9.1 и 2.9.2. Причем  $k_1$  соответствует случаю, когда  $v_{S2}=800\text{м/сек}$ , а  $v_{S1}$  изменяется в пределах  $25\div700\text{м/сек}$ , а  $k_2$  - когда  $v_{S1}=800\text{м/сек}$  и  $v_{S2}$  изменяется в пределах  $25\div700\text{м/сек}$ .

**В первом случае**

**во втором случае**

$$T_{01} = \frac{4H}{v_{S2}} k_1, \quad T_{01} = \frac{4H}{v_{S1}} k_2. \quad (2.35)$$

Для заштрихованных вариантов табл.2.9.1. влиянием верхнего слоя на  $T_{01}$  можно пренебречь.

Вычисления показали, что при общей мощности  $H=30\text{м}$ , значения периодов  $T_{01}$  при  $v_{S2}=800\text{м/сек}$  и  $v_{S2}=1000\text{м/сек}$  для  $H_1/H>0.4$  мало отличаются друг от друга, поэтому величину  $v_S=800\text{м/сек}$  можно считать нижним пределом для коренных при определении  $T_{01}$  при установлении категории грунта по сейсмическим свойствам (см. 2.11).

Экспериментальные значения отношений  $T_{01}/T_{02}$  и  $T_{01}/T_{03}$  были получены для ряда участков территории г.Токио [59]. Согласно данным Окомото, территория центральной части г.Токио разделена однокилометровой сеткой-картой. На ней указаны преобладающие частоты в местах пересечения линий.

Таблица 2.9.1

$$T_{01} = \frac{4H}{v_{s2}} k_1 \quad (H=30\text{м}, v_{s2} = 800\text{м/сек})$$

| $v_{s1}$<br>м/сек | $\frac{H_1}{H}$ | 0.05 | 0.1  | 0.15 | 0.2  | 0.3  | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.8   | 0.9   |
|-------------------|-----------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 25                | $k_1$           | 1.63 | 3.22 | 4.82 | 6.42 | 9.61 | 12.40 | 16.02 | 19.19 | 25.38 | 26.88 |
| 50                | $k_1$           | 1.04 | 1.66 | 2.45 | 3.24 | 4.94 | 6.34  | 8.02  | 9.61  | 13.08 | 14.22 |
| 100               | $k_1$           | 1.00 | 1.07 | 1.34 | 1.70 | 2.48 | 3.27  | 4.56  | 4.84  | 6.42  | 7.20  |
| 150               | $k_1$           | 0.99 | 1.01 | 1.09 | 1.27 | 1.73 | 2.24  | 2.75  | 3.26  | 4.30  | 4.81  |
| 200               | $k_1$           | 0.99 | 1.00 | 1.03 | 1.11 | 1.39 | 1.75  | 2.11  | 2.49  | 3.24  | 3.62  |
| 300               | $k_1$           | 0.99 | 0.99 | 1.03 | 1.02 | 1.13 | 1.30  | 1.51  | 1.74  | 2.18  | 2.43  |
| 400               | $k_1$           | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.04 | 1.13  | 1.25  | 1.39  | 1.69  | 1.84  |
| 500               | $k_1$           | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.05  | 1.11  | 1.20  | 1.39  | 1.491 |
| 600               | $k_1$           | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 1.01  | 1.04  | 1.08  | 1.20  | 1.26  |
| 700               | $k_1$           | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.98  | 0.98  | 0.98  | 1.07  | 1.10  |

Таблица 2.9.2

$$T_{01} = \frac{4H}{v_{s1}} k_2 \quad (H=30\text{м}, v_{s1} = 800\text{м/сек})$$

| $v_{s2}$<br>м/сек | $\frac{H_1}{H}$ | 0.1   | 0.2  | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6  | 0.7   | 0.8   | 0.9  | 0.95 |
|-------------------|-----------------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|
| 25                | $k_2$           | 32.3  | 32.4 | 32.15 | 31.5  | 30.3  | 28.4 | 25.72 | 21.9  | 16.1 | 11.6 |
| 50                | $k_2$           | 16.14 | 16.2 | 16.07 | 15.74 | 15.13 | 14.2 | 12.87 | 10.96 | 8.08 | 5.85 |
| 100               | $k_2$           | 8.07  | 8.09 | 8.02  | 7.78  | 7.57  | 7.11 | 6.45  | 5.51  | 4.1  | 3.02 |
| 150               | $k_2$           | 5.38  | 5.04 | 5.36  | 5.25  | 5.06  | 4.76 | 4.33  | 3.71  | 2.8  | 2.12 |
| 200               | $k_2$           | 4.03  | 4.05 | 4.02  | 3.95  | 3.8   | 3.59 | 3.3   | 2.83  | 2.2  | 1.69 |
| 300               | $k_2$           | 2.69  | 2.7  | 2.7   | 2.64  | 2.55  | 2.42 | 2.23  | 1.96  | 1.57 | 1.32 |
| 400               | $k_2$           | 2.02  | 2.03 | 2.02  | 1.99  | 1.93  | 1.85 | 1.72  | 1.55  | 1.31 | 1.17 |
| 500               | $k_2$           | 1.16  | 1.62 | 1.62  | 1.6   | 1.57  | 1.51 | 1.43  | 1.31  | 1.17 | 1.09 |
| 600               | $k_2$           | 1.35  | 1.35 | 1.35  | 1.35  | 1.32  | 1.29 | 1.24  | 1.17  | 1.09 | 1.05 |
| 700               | $k_2$           | 1.15  | 1.16 | 1.17  | 1.16  | 1.15  | 1.14 | 1.11  | 1.08  | 1.04 | 1.02 |

Анализ карты показывает, что для более высоко расположенных площадок (район Минато) характерно наличие одного преобладающего периода, а для центрального низкорасположенного района (район Кото) – нескольких площадок с тремя и более преобладающими периодами. Для некоторых узлов полученные значения периодов второй и третьей форм колебаний приведены в табл. 2.10 [59], где указаны также вычисленные нами их отношения.



Таблица 2.10

| NN<br>узла       | Частоты первых трех форм<br>колебаний, в герцах |                  |                  | Отношения                     |                               |
|------------------|-------------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                  | $f_1 = 1/T_{01}$                                | $f_2 = 1/T_{02}$ | $f_3 = 1/T_{03}$ | $f_2/f_1;$<br>$T_{01}/T_{02}$ | $f_3/f_1;$<br>$T_{01}/T_{03}$ |
| 1                | 0.6                                             | 2.0              | 3.5              | 3.3                           | 5.8                           |
| 2                | 0.6                                             | 1.9              | 3.2              | 3.1                           | 5.3                           |
| 3                | 0.5                                             | 1.5              | 2.5              | 3.0                           | 5.0                           |
| 4                | 0.6                                             | 1.7              | 3.0              | 2.8                           | 5.0                           |
| 5                | 0.5                                             | 1.7              | 2.3              | 2.8                           | 4.6                           |
| 6                | 0.6                                             | 1.8              | 3.1              | 3.0                           | 5.1                           |
| 7                | 0.5                                             | 1.4              | 2.4              | 2.8                           | 4.8                           |
| 8                | 0.6                                             | 1.7              | 2.6              | 2.8                           | 4.3                           |
| 9                | 0.6                                             | 1.8              | 3.0              | 3.0                           | 5.0                           |
| 10               | 0.8                                             | 2.5              | 4.3              | 3.1                           | 5.3                           |
| 11               | 0.8                                             | 2.3              | 4.0              | 2.8                           | 5.0                           |
| 12               | 1.1                                             | 3.2              | -                | 2.9                           | -                             |
| 13               | 1.7                                             | 4.1              | -                | 3.0                           | -                             |
| 14               | 1.6                                             | 4.8              | -                | 3.0                           | -                             |
| 15               | 1.4                                             | 4.5              | -                | 2.8                           | -                             |
| Среднее значение |                                                 |                  |                  | 2.9                           | 5.02                          |

Как видно из таблицы, для 15 узлов средние значения отношений экспериментально установленных значений периодов  $T_{01}/T_{02}$  и  $T_{01}/T_{03}$  составляют соответственно 2.9 и 5.02, т.е. близки к отношениям для однородных разрезов.

## 2.9. ПРИБЛИЖЕННЫЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВОГО ПРЕОБЛАДАЮЩЕГО ПЕРИОДА НЕОДНОРОДНОГО ОСНОВАНИЯ

В некоторых случаях, когда параметры слоев незначительно отличаются друг от друга значение первого преобладающего периода можно вычислить и различными приближенными способами. Рассмотрим два из таких способов, получивших широкое практическое применение и в других областях теории колебаний.

**1. Энергетический способ.** Как известно из теории колебаний сплошной среды, при приближенных способах определения первого периода можно добиваться высокой степени точности, если принятая в качестве приближенной функции упругой линии при свободных колебаниях  $u(x)$  удовлетворяет граничным условиям задачи. В случае много-

слоистого основания (рис.2.18) в качестве такой функции можно принимать функцию формы колебания для однородного слоя (2.10) в виде:

$$u(x, t) = A \cos \frac{\pi x}{2H} \sin \frac{2\pi}{T_{01}} t, \quad (2.37)$$

где  $T_{01}$  - неизвестный пока период собственных колебаний. Выражение (2.37) удовлетворяет двум граничным условиям задачи, а именно: на свободной поверхности отсутствие касательного напряжения

$$x = 0 \quad u'(0, t) = 0, \quad (2.38)$$

на уровне коренных пород отсутствие сдвиговой деформации

$$x = H \quad u(H, t) = 0. \quad (2.39)$$

Кроме того, как мы видели выше, выражение (2.37) является точным решением (2.6) однородного основания с мощностью  $H$ . Известно, что для консервативных систем (без учета затухания свободных колебаний) потенциальная и кинетическая энергия удовлетворяют условию:

$$K_{\max} = \Pi_{\max}. \quad (2.40)$$

В среде, подвергающейся только деформации сдвига, потенциальная и кинетическая энергия будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{2} \int_0^H G(x) \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 dx \\ K &= \frac{1}{2} \int_0^H \rho(x) \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 dx. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Применительно к неоднородной системе, показанной на рис.2.18, подставляя (2.37) в (2.40) и (2.41), соответственно для  $\Pi_{\max}$  и  $K_{\max}$  получим:

$$\begin{aligned} \Pi_{\max} &= \frac{1}{2} A^2 \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} G_k \left( \frac{\pi}{2H} \right)^2 \sin^2 \frac{\pi x}{2H} dx = \\ &= \frac{1}{2} A^2 \sum_{k=1}^n G_k \frac{\pi^2}{4H^2} \left[ \frac{h_k - h_{k-1}}{2} - \frac{H}{2\pi} \left( \sin \frac{\pi h_k}{H} - \sin \frac{\pi h_{k-1}}{H} \right) \right] \\ K_{\max} &= \frac{1}{2} A^2 \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \rho_k \left( \frac{2\pi}{T_{01}} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi x}{2H} dx = \\ &= \frac{1}{2} A^2 \sum_{k=1}^n \rho_k \left( \frac{2\pi}{T_{01}} \right)^2 \left[ \frac{h_k - h_{k-1}}{2} + \frac{H}{2\pi} \left( \sin \frac{\pi h_k}{H} - \sin \frac{\pi h_{k-1}}{H} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.42)$$



Подставляя значения (2.42) в (2.40) и после несложных операций для основного периода  $T_{01}$ , получим [97]:

$$T_{01} = 4H \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \rho_k \left[ H_k + \frac{H}{\pi} \left( \sin \frac{\pi h_k}{H} - \sin \frac{\pi h_{k-1}}{H} \right) \right]}{\sum_{k=1}^n G_k \left[ H_k - \frac{H}{\pi} \left( \sin \frac{\pi h_k}{H} - \sin \frac{\pi h_{k-1}}{H} \right) \right]}} \quad (2.43)$$

По полученной формуле (2.43) можно вычислить преобладающий период  $T_{01}$  любого основания с любым количеством слоев  $n$ . Если вместо модулей упругости слоев  $G_k$  известны скорости волн сдвига слоев  $v_{sk}$ , то в формуле (2.43) их можно заменить по следующей формуле:

$$G_k = \rho_k v_{sk}^2. \quad (2.44)$$

Отметим одну особенность формулы (2.43). Согласно теореме Релея, истинное значение периода первой формы колебания, т.е. по трансцендентным уравнениям (2.22)-(2.24), всегда больше значения периода, найденного энергетическим методом, т.е. по формуле (2.43).

**2. Способ послойного суммирования.** Этот способ обосновывается следующими соображениями. Как видно из (2.11) для однородного основания значение основного периода  $T_{01}$  прямо пропорционально мощности слоя  $H$  и обратно – скорости волн сдвига  $v_s$ . Поэтому, если мысленно представить однородное основание как состоящее из отдельных частей, то формулу (2.11) можно интерпретировать как сумму периодов его отдельных частей. На этом основании, если мощности  $H_k$  и скорости  $v_{sk}$  *мало отличаются друг от друга*, то для такого основания общий период  $T_{01}$  всего основания можно приближенно принимать как сумму периодов  $T_{01k}$  отдельных слоев, т.е.

$$T_{01} = \sum_{k=1}^n T_{01k}, \quad T_{01k} = \frac{4H_k}{v_{sk}}, \quad (2.45)$$

где  $n$  - число слоев разреза, или окончательно

$$T_{01} = 4 \sum_{k=1}^n \frac{H_k}{v_{sk}}. \quad (2.46)$$

Формулой (2.46) пользуются во многих работах, в частности, в книге Окомото [59] и в [177].

**3. Способ осредненной скорости.** Аналогично второму этот способ также применяется при незначительных отличиях в величинах скоростей волн сдвига  $v_{sk}$ . Фактически суть способа заключается в том, что вместо отдельных значений скоростей слоев  $v_{sk}$  можно принимать их

осредненные значения  $\bar{v}_s$  и пользоваться формулой для однородного слоя с общей мощностью  $H = \sum_{i=1}^n H_i$  и осредненной величиной скоростей  $\bar{v}_s$ .

Тогда преобладающий период  $T_{01}$  можно вычислить по формуле

$$T_{01} = \frac{4H}{\bar{v}_s}. \quad (2.47)$$

Так как, чем больше мощность  $k$ -ого слоя  $H_k$  его влияние на общий период  $T_{01}$  будет больше, значение  $\bar{v}_s$  логичнее определить по формуле:

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{k=1}^n H_k}{\sum_{k=1}^n \frac{H_k}{v_{sk}}}, \quad (2.48)$$

где  $n$  — число всех слоев.

В случае, когда вместо  $v_{sk}$  известны  $G_k$  и  $\rho_k$ , формулу (2.48) на основании (2.44) можно представить в виде:

$$\bar{v}_s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n G_k H_k}{\sum_{k=1}^n \rho_k H_k}}. \quad (2.49)$$

Такой способ определения  $\bar{v}_s$ , в частности, рекомендуется американской ассоциацией "Сейсмическая безопасность зданий" [177] и французскими нормами по сейсмостойкому строительству [180].

Легко убедиться, что значения  $T_{01}$ , вычисленные по формуле (2.45) и (2.47), дадут одинаковую величину.

В самом деле, подставляя (2.48) в (2.47) получим:

$$T_{01} = \frac{4 \sum_{k=1}^n H_k \cdot \sum_{k=1}^n \frac{H_k}{v_{sk}}}{\sum_{k=1}^n H_k} = 4 \sum_{k=1}^n \frac{H_k}{v_{sk}}, \quad (2.50)$$

что совпадает с формулой (2.46).

Как показал сравнительный анализ результатов по вычислению  $T_{01}$  для рассмотренных выше примеров по приближенным формулам (2.43) и (2.46) и по трансцендентным уравнениям (2.22)-(2.24) погрешности по приближенным формулам могут достигнуть 20-30%. Причем при



применении формулы (2.43) значение  $T_{01}$  по сравнению с точным всегда получается в меньшую сторону, а при применении формулы (2.46) как в меньшую, так и в большую сторону.

## 2.10. НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ХАРАКТЕРЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТОВ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Результаты по определению преобладающих периодов вышерассмотренных примеров и сравнительный анализ с их значениями, установленными на этих же площадках при записях микроколебаний или регистрациях реальных землетрясений, позволяют отметить два важных обстоятельства. Во-первых, расчетные значения периодов по формулам (2.22)-(2.32) и (2.43)-(2.47) с достаточной степенью точности совпадают с результатами гармонических анализов микроколебаний и, с другой стороны, значения расчетных периодов довольно близки к значениям зарегистрированных (по акселерограммам) во время реальных землетрясений на тех же площадках.

Как было отмечено выше, еще в 60-х годах прошлого столетия К.Канаи установил, что при землетрясениях с магнитудой  $M > 6$  реальные значения преобладающих периодов колебания грунта приближаются к их значениям (наибольшему или обертому), установленным экспериментально путем гармонического анализа микроколебаний грунта данной местности. Результаты исследований, приведенные в ряде работ, показали что значения преобладающих периодов по пиковым значениям ускорений на спектре реакции и по спектру Фурье по акселерограмме одного и того же землетрясения отличаются очень незначительно. При этом максимальное (наибольшее из пиковых) значение ускорения на спектре реакции может иметь место как для низких, так и для высших гармониках колебания грунта.

По нашему мнению, вышеизложенное свидетельствует о том, что во время сильного землетрясения в деле *формирования периодов* акселерограмм на поверхности Земли (на строительной площадке) *главную роль играют периоды свободных колебаний приповерхностной неоднородной толщи*. Это означает, что на данной строительной площадке акселерограммы, зарегистрированные от разных землетрясений, должны иметь примерно одинаковые преобладающие периоды. Обратите внимание речь идет *только о периодах*. Амплитуды ускорений, в зависимости от магнитуды землетрясения и эпицентрального расстояния, будут различными. Это явление косвенным образом неоднократно наблюдалось при реальных землетрясениях: на спектрах реакций построенные по акселерограммам, зарегистрированные на скальных грунтах, пиковые значения ускорений соответствовали коротким периодам с узким диапазоном, а на рыхлых грунтах, наоборот – длинным

периодам с широким диапазоном изменений (см. рис.2.9). Это упрощенное предположение о генерации частотного состава акселерограмм сильных землетрясений значительно облегчит также принципы формулирования синтетических акселерограмм для данной строительной площадки. В этом случае в качестве преобладающих периодов акселерограммы можно принимать расчетные периоды свободных колебаний приповерхностной толщи, а ожидаемое максимальное значение ускорения грунта вычислять по эмпирическим формулам в зависимости от магнитуды возможных очагов  $M$ , их глубины  $h$  и эпицентрального расстояния  $\Delta$  [см. формулы (1.143) и (2.123)].

Предположение о решающей роли периодов свободных колебаний (преобладающих периодов) приповерхностной толщи в формировании колебательного процесса на поверхности Земли во время сильного землетрясения, нам кажется, откликается с механикой возникновения землетрясения как результат внезапного разрыва сплошной среды и распространения энергии этого разрыва посредством упругих сейсмических волн. Сейсмические волны в верхних, менее стесненных с точки зрения деформирования слоях Земли, нарушают их статическое равновесие, вследствие чего в них возникают сдвиговые колебательные процессы (аналогичные свободным сдвиговым колебаниям сплошной упругой среды конечных размеров с заданными физико-механическими параметрами) с преобладающими периодами, равными периодам свободных колебаний среды. В результате суперпозиции этих затухающих гармонических колебаний формируется акселерограмма землетрясения данного участка поверхности Земли. Амплитуды этой акселерограммы будут обусловлены как размерами разрыва в очаге (магнитудой землетрясения), так и эпицентральным расстоянием места регистрации. Длительность сотрясения (акселерограммы) будет обусловлена как величиной начальной амплитуды, так и динамическими характеристиками (периодами свободных колебаний) приповерхностной толщи: чем больше уровень начального возмущения (магнитуды) и больше значение преобладающих периодов и меньше коэффициент затухания пород, тем длительнее землетрясение (сотрясение) в данной местности. На продолжительность сотрясений будет влиять также эпицентральное расстояние и характер неоднородностей, подстилающих слоев места регистрации. На сильно неоднородных участках суммарный характер колебаний на поверхности Земли существенно будет зависеть от характера многократно отраженных и преломленных от нижних слоев и вновь выходящих в верхний слой сейсмических волн. Эти отраженные и преломленные волны, суммируясь с начальной падающей волной на верхнем слое, непрерывно будут порождать новые дополнительные перемещения и ускорения. Поэтому продолжительность сотрясения на таких участках искусственно продлится в несколько раз по сравнению с продолжительностью на однородных участках.



## 2.11. СПОСОБ ВЫЧИСЛЕНИЯ СЕЙСМОГРАММЫ ПО МОДЕЛИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ КАК МГНОВЕННОГО РАЗРЫВА СПЛОШНОСТИ

Все описанные выше аспекты формирования акселерограмм на поверхности Земли можно смоделировать математически. В самом деле, как было изложено выше (1.16), самое простое толкование землетрясения – это мгновенный разрыв среды, в результате которого происходит мгновенное вспарывание блоков с образованием их относительной подвижки (рис.2.28). После разрыва каждый блок будет совершать движение, сходное со свободными колебаниями некоторой условной консольной плиты определенной длины (см. рис.1.50), вызванное начальной скоростью  $v$  у свободного конца (разрыва). На достаточном удалении от очаговой зоны (более 10км от линии разрыва) горизонтальными деформациями глубинных пород по сравнению с деформациями верхних напластований ввиду их незначительности можно пренебречь. Верхние, близкие к поверхности Земли породы блоков не только по физико-механическим характеристикам существенно отличаются от глубинных пород, но и подвергнуты существенно меньшим сжимающим напряжениям, благодаря чему они обладают большой сдвиговой деформативностью в горизонтальных и вертикальных направлениях. Их объем незначительный по сравнению с объемом блоков.

Они неоднородны не только по глубине, но и по направлениям, горизонтальным к поверхности Земли. Поэтому при мгновенном разрыве среды эти породы будут подвергаться дополнительным инерционным перемещениям, в результате зафиксирования которых сейсмографом мы получаем сейсмограмму землетрясения на поверхности Земли. Фактически полное перемещение любой точки на поверхности Земли будет состоять из двух частей: *переносного перемещения блока (подвижка) как твердого тела и инерционного перемещения приповерхностной толщи относительно блока*. Вблизи очаговой зоны будут преобладать переносные перемещения, а в удаленных зонах – относительные инерционные перемещения.

Если из тела блоков на достаточном расстоянии от разрыва выделить какую-то призматическую область с единичной шириной и глубиной  $H$ , то она в общем случае на любом участке по длине разрыва  $L$  будет представлять собой неоднородную многослойную колонку с различными физико-механическими характеристиками. Как мы видели выше, исследования колебаний таких колонок отличается от колебаний однородной колонки только математическими трудностями. Главное отличие неоднородной системы от однородной это существенное отличие в отношениях низших и высших форм колебаний в спектрах частот свободных колебаний.

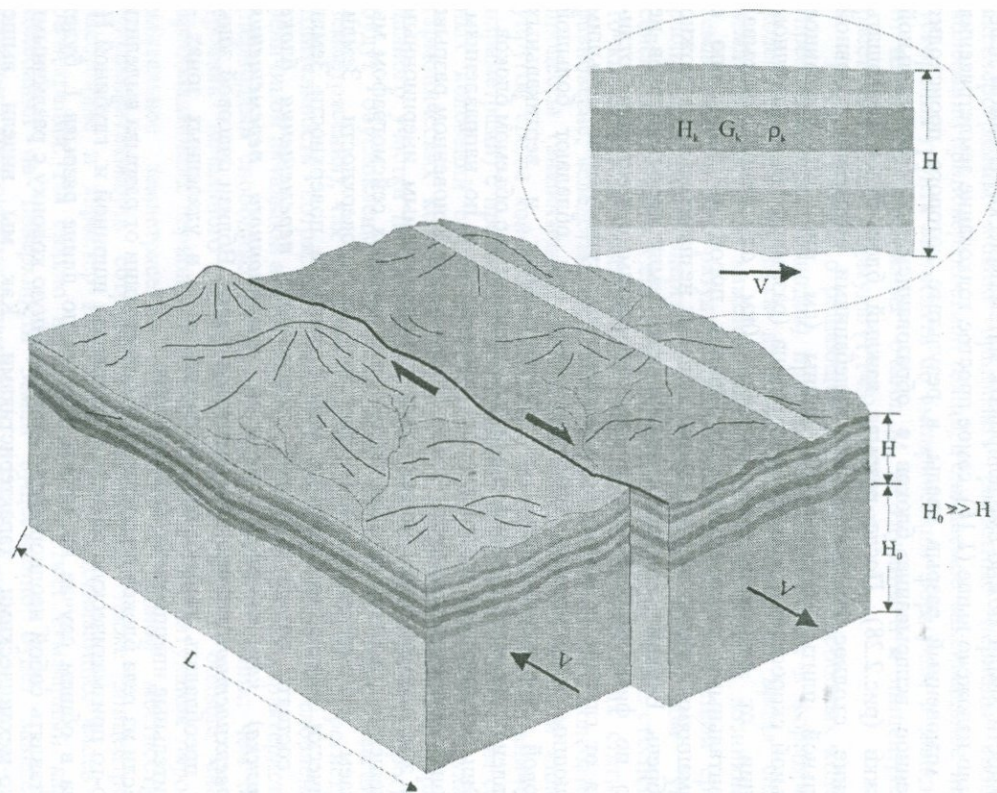


Рис. 2.28. Схематическое изображение испарения и механическая модель верхних напластований.



Поэтому с целью избежания сложных математических выражений и простоты задачи для вычлнения основных особенностей характера колебания грунтов выделенную область пока будем считать однородной. Тогда математическая постановка задачи будет заключаться в следующем: найти выражение функции перемещения  $u(x,t)$ , удовлетворяющее уравнению:

$$G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} = 0, \quad (2.50)$$

со следующими граничными:

$$\begin{aligned} \text{при } x=0 \quad G \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} &= 0 \\ \text{при } x=H \quad u(H,t) &= 0 \end{aligned} \quad (2.51)$$

и начальными:

$$\begin{aligned} \text{при } t=0 \quad u(x,0) &= 0 \\ \text{при } t=0 \quad \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} &= v \end{aligned} \quad (2.52)$$

условиями, где  $G$  – модуль сдвига породы,  $\rho$  – плотность,  $\eta$  – вязкость,  $H$  – мощность колонки,  $v$  – скорость блоков после их испарывания. Как было отмечено в первой главе, величина  $v$  в зависимости от скорости испарывания в ближней зоне изменяется в пределах 100-150см/сек. На других расстояниях от очага значения  $v$  будут резко уменьшаться.

Решение уравнения (2.50) будем искать методом разделения переменных, представив его следующим образом:

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i(x) q_i(t), \quad (2.53)$$

где  $u_i(x)$  – функции только координаты  $x$ , а  $q_i(t)$  – функции только времени  $t$ . Подставляя (2.53) в (2.50) и требуя, чтобы развенство удовлетворялось для любого номера  $i$ , получим:

$$G u_i'' q_i - \rho u_i q_i'' + \eta u_i'' q_i' = 0. \quad (2.54)$$

Разделив (2.54) на произведение  $u_i \left( q_i + \frac{\eta}{G} q_i' \right)$ , приходим к равенству:

$$\frac{G u_i''}{\rho u_i} = - \frac{q_i''}{q_i + \frac{\eta}{G} q_i'} = -p_i^2, \quad (2.55)$$

Левая часть (2.55) зависит только от переменной  $x$ , а правая — только от времени  $t$ . Для тождественного выполнения равенства (2.55) необходимо, чтобы обе части были равны одной и той же постоянной. Обозначая эту постоянную через  $p_i^2$  получим следующие два уравнения:

$$u_i'' + \lambda_i^2 u_i = 0 \quad \frac{p_i^2 P}{G} = \lambda_i^2 \quad (2.56)$$

$$q_i'' + 2n_i q_i' + p_i^2 q_i = 0 \quad \frac{\eta p_i^2}{G} = 2n_i. \quad (2.57)$$

Решение уравнения (2.56) будет:

$$u_i(x) = A_i \sin \lambda_i x + B_i \cos \lambda_i x, \quad (2.58)$$

где  $A_i$  и  $B_i$  — постоянные интегрирования.

Из граничных условий (2.51) будем иметь:

$$G A_i \lambda_i \cos \lambda_i 0 = 0 \quad (2.59)$$

$$A_i \sin \lambda_i H + B_i \cos \lambda_i H = 0.$$

Следовательно,

$$A_i = 0, \quad B_i \neq 0, \quad \cos \lambda_i H = 0. \quad (2.60)$$

Из последнего (частотного) уравнения (2.60) получим:

$$\lambda_i H = (2i - 1) \frac{\pi}{2}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (2.61)$$

Таким образом

$$u_i(x) = B_i \cos \frac{2i - 1}{2} \frac{\pi}{H} x. \quad (2.62)$$

Решение второго уравнения (2.57) будет:

$$q_i(t) = e^{-n_i t} (C_{1i} \sin p_i^* t + C_{2i} \cos p_i^* t), \quad (2.63)$$

где  $p_i^*$  — круговая частота свободных колебаний  $i$ -ой формы с учетом вязкости пород и определяется по формуле

$$p_i^* = \sqrt{p_i^2 - n_i^2}. \quad (2.64)$$



Учитывая (2.56) и (2.61), для круговой частоты  $p_i^*$  получим:

$$p_i^* = \sqrt{\frac{G}{\rho} \frac{(2i-1)^2 \pi^2}{4H^2} - \left( \frac{\eta p_i^2}{2G} \right)^2}$$

Для большинства горных пород  $p_i^2 \ll p_i^2$ , поэтому в формуле (2.64) влиянием  $p_i$  в тригонометрических функциях можно пренебречь, и решение (2.63) представить в виде:

$$q_i(t) = e^{-n_i t} (C_{1i} \sin p_i t + C_{2i} \cos p_i t), \quad (2.65)$$

где

$$p_i = \frac{2i-1}{2H} \pi \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \frac{2i-1}{2H} \pi v_s, \quad i = 1, 2, \dots \quad (2.66)$$

Таким образом, общим решением задачи будет:

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} x e^{-n_i t} (C_{1i} \sin p_i t + C_{2i} \cos p_i t). \quad (2.67)$$

Из первого начального условия (2.52) будем иметь:

$$\sum_{i=1}^{\infty} B_i \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} x (C_{1i} \cdot 0 + C_{2i} \cdot 1) = 0. \quad (2.68)$$

Так как условие (2.68) должно выполняться для любой точки  $x$  по высоте колонки и, кроме того, коэффициент  $B_i$  не может быть равным нулю, то должно быть

$$C_{2i} = 0.$$

Из второго начального условия (2.52) получим:

$$\sum_{i=1}^{\infty} B_i \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} x \cdot 1 \cdot C_{1i} p_i \cdot 1 = v. \quad (2.69)$$

Умножая обе части уравнения (2.69) на  $\cos \frac{2j-1}{2} \frac{\pi}{H} x$ , интегрируя в пределах от 0 до  $H$  и учитывая ортогональность форм колебаний в виде:

$$\int_0^H \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} x \cos \frac{2j-1}{2} \frac{\pi}{H} x dx = 0 \quad (2.70)$$

при  $i \neq j$ ,

получим

$$B_i C_{ii} p_i \int_0^H \cos^2 \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} x dx = v \int_0^H \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{x} dx.$$

Следовательно, для произведения  $B_i C_{ii}$  получится

$$B_i C_{ii} = \frac{v \delta_i}{p_i}, \quad (2.71)$$

где

$$\delta_i = \frac{\int_0^H \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} x dx}{\int_0^H \cos^2 \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} x dx} = \frac{4 \cdot (-1)^{1+i}}{(2i-1)\pi}. \quad (2.72)$$

В случае неоднородной колонки функция перемещения  $u(x, t)$  будет кусочно-гладкой:

$$u(x, t) = u_k(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} (A_{ki} \sin \lambda_{ki} x + B_{ki} \sin \lambda_{ki} x) q_i(t) \quad (2.73)$$

для  $h_{k-1} < x < h_k$ ,  $k=1, 2, \dots, n$ .

Входящие в (2.73) функции времени  $q_i(t)$ , как и для однородной среды, будут иметь вид (2.63).

Входящие в  $u_k(x, t)$  и  $q_i(t)$  неизвестные коэффициенты  $A_{ki}$ ,  $B_{ki}$  и  $C_{ii}$ ,  $C_{2i}$  будут определяться из уравнения (2.20), начальных условий

(2.52), а собственные частоты  $p_i = \lambda_{ki} \sqrt{\frac{G_k}{\rho_k}}$  из трансцендентных частот-

ных уравнений (2.22)-(2.24). Коэффициент  $\delta_i$  в этом случае будет иметь вид [91]:

$$\delta_i = \frac{\sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} u_{ki} \rho_k dx}{\sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} u_{ki}^2 \rho_k dx}. \quad (2.74)$$



Подставляя полученные значения коэффициентов  $A_i, B_i, C_{1i}$  и  $C_{2i}$  в решение (2.67) для перемещения  $u(x, t)$ , окончательно получим:

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{v \delta_i}{p_i} e^{-n_i t} \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi x}{H} \sin p_i t \quad (2.75)$$

или

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} v \frac{T_{0i}}{2\pi} \delta_i e^{-n_i t} \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi x}{H} \sin \frac{2i-1}{2} \frac{\pi v_s t}{H}.$$

Соответствующие ускорения слоев при малых  $n_i$  будет:

$$u''(x, t) \cong \sum_{i=1}^{\infty} v \frac{2\pi}{T_{0i}} \delta_i e^{-n_i t} \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi x}{H} \sin \frac{2i-1}{2} \frac{\pi v_s t}{H}. \quad (2.76)$$

Перемещения (сейсмограмма) и ускорение (акселерограмма) на поверхности Земли (при  $x=0$ ) будут:

$$\begin{aligned} u_0(t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{T_{0i}}{2\pi} v \delta_i e^{-n_i t} \sin \frac{2\pi}{T_{0i}} t \\ u_0''(t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\pi}{T_{0i}} v \delta_i e^{-n_i t} \sin \frac{2\pi}{T_{0i}} t, \end{aligned} \quad (2.77)$$

где  $T_{0i} = \frac{2\pi}{p_i} = \frac{1}{2i-1} \frac{4H}{v_s}$  - преобладающие периоды колебания грунта.

Так как амплитуды всех гармоник (2.77) со временем сильно уменьшаются, то в формуле (2.77) при отыскании максимума можно ограничиваться 3-5 членами ряда.

Таким образом, на поверхности Земли перемещение и ускорение грунта будут представлять собой суперпозицию затухающих гармонических колебаний с периодами, равными периодам свободных колебаний (преобладающих периодов) приповерхностного слоя.

В случае неоднородной колонки, которое в действительности будет иметь место, выражения для перемещения и ускорения на поверхности Земли будет иметь аналогичный (2.77) вид. Величину коэффициента затухания  $n_i$  для всех форм колебаний можно принять одинаковой и равной среднему значению от коэффициентов затухания пород разных слоев. Главное отличие будет в коэффициентах  $\delta_i$  и в соотношениях  $T_{01}/T_{02}, T_{01}/T_{03}, \dots, T_{01}/T_{0n}$ . Если при однородной колонке эти отношения являются нечетными числами 3, 5, 7, ...  $2n-1$ , то при неоднородной колонке они могут быть совершенно другими в зависимости от мощностей, плотностей и модулей сдвига пород слоев (см. приведенные в 2.6 примеры) и их расположения по высоте колонки. Поэтому амплитуды

перемещений и ускорений по разным гармоникам будут зависеть от спектра преобладающих периодов  $T_{0i}$  и форм колебаний неоднородной колонки  $u_{ki}(x)$ . В результате этого максимальное перемещение и ускорение на поверхности Земли, которое получится в результате суммирования во времени по всем гармоникам, будет существенно зависеть от характера неоднородности колонки. В зависимости от отношения периодов первых 3-5 форм колебаний моменты наступления максимальных ускорений на сейсмограммах и акселерограммах на поверхности Земли также будут сильно зависеть от характера неоднородности колонки.

Главная особенность полученных формул (2.77) заключается в том, что перемещение и ускорение грунта существенно зависят от сейсмической категории грунта. Согласно (2.77), *на скальных грунтах значения ускорения будут больше, чем на рыхлых грунтах*. Это явление неоднократно подтвердилось инструментально при регистрациях сильных землетрясений.

Максимальные значения перемещения  $u_0(t)$  и ускорений грунта  $u_0''(t)$ , согласно формулам (2.77), для  $v=30\text{см/сек}$  (IX баллов по шкале MSK-64) при учете только первого члена рядов (2.77) соответственно составят:

- для скальных грунтов с  $T_{01}=0.35\text{сек}$ ,  $n \approx 5\%$  ( $\delta = 0.3$ )

$$u_{0\max}=1.96\text{см}, u_{0\max}''=0.63g,$$

- для рыхлых грунтов с  $T_{01}=0.8\text{сек}$ ,  $n \approx 3\%$  ( $\delta = 0.2$ )

$$u_{0\max}=4.62\text{см}, u_{0\max}''=0.28g.$$

Если периоды колебания основания отличаются в 1, 3, 5 раз, то моменты наступления максимальных амплитуд членов ряда (2.27) во времени и по направлению (знаку  $\delta_i$ ) совпадают, что приводит к сильному росту суммарной величины (особенно ускорений). Это графически показано на рис.2.29 для ускорения  $u_0''(t)$ , вычисленное по формуле (2.77). Поэтому при таком же значении для  $v=30\text{см/сек}$  с учетом трех форм колебаний для максимальных перемещений и ускорений грунта были получены:

- для скальных грунтов ( $T_{01}=0.35\text{сек}$ )  $u_{0\max}=2.21\text{см}$ ,  $u_{0\max}''=1.62g$ ,

- для рыхлых грунтов ( $T_{01}=0.8\text{сек}$ )  $u_{0\max}=5.24\text{см}$ ,  $u_{0\max}''=0.78g$ .

Из приведенных данных видно, что и для скальных и для рыхлых грунтов учет высших форм колебаний приводит к увеличению ускорения грунта, вычисленного только по первой форме колебания соответственно в 2.57 и 2.78 раза, а для перемещения грунта – всего в 1.12 и 1.13 раза.



На рис. 2.29а показаны соответствующие сейсмограммы и акселерограммы для скальных и рыхлых грунтов, вычисленные по формулам (2.77) с учетом трех членов рядов.

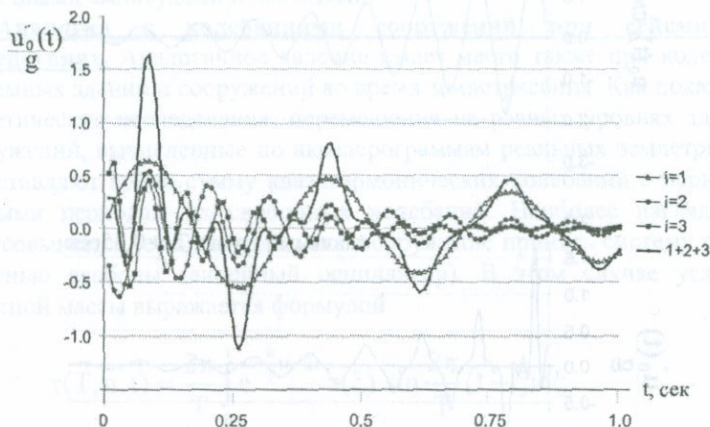


Рис. 2.29. Акселерограммы для скального грунта с учетом трех форм (1+2+3) колебаний и по 1, 2 и 3 форме колебаний в отдельности.

Формуле (2.75) можно дать и волновую интерпретацию. Как мы отметили выше, движение грунта на поверхности Земли во время землетрясения (сейсмограмма) – это результат суммирования неоднократно преломленных и отраженных от нижних слоев поперечных сейсмических волн. К этому выводу приводят и формулы (2.75) и (2.76). В самом деле, воспользуясь известным положением о том [25], что *любая стоящая волна может быть заменена парой бегущих волн*, так как имеет место равенство:

$$2 \cos \frac{k\pi}{l} x \sin \frac{k\pi}{l} ct = \sin \frac{k\pi}{l} (x + ct) + \sin \frac{k\pi}{l} (ct - x), \quad (2.78)$$

и наоборот, *любая бегущая волна может быть представлена как пара стоящих волн* с фазами, сдвинутыми на  $\pi/2$ , так как

$$\sin \frac{k\pi}{l} (x + ct) = \sin \frac{k\pi x}{l} \cos \frac{k\pi ct}{l} + \cos \frac{k\pi x}{l} \sin \frac{k\pi ct}{l} \quad (2.79)$$

где  $c$  – скорость распространения волны, формулу (2.75) в случае однородного основания, согласно (2.78), можно представить в виде:

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{vT_{0i}\delta_i}{4\pi} e^{-\alpha_i t} \left[ \sin \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} (x + v_s t) + \sin \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} (v_s t - x) \right], \quad (2.80)$$

где  $v_s$  – скорость волн сдвига в однородной среде.

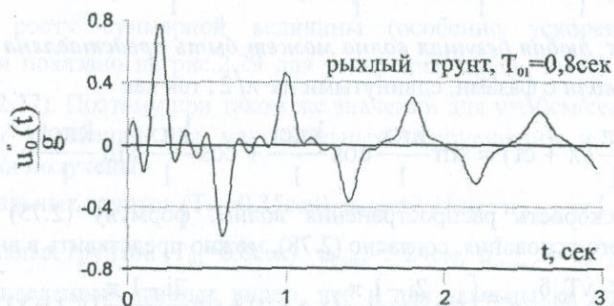
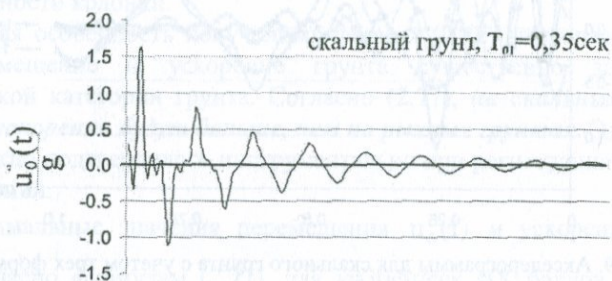
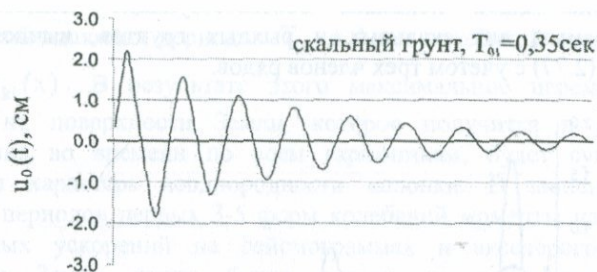


Рис. 2.29а. Сейсмограммы и акселерограммы для скальных и рыхлых грунтов, вычисленные по формулам (2.77) с учетом трех форм колебаний.



Формула (2.80) показывает, что перемещения на поверхности Земли, а в случае неоднородного основания также на всех слоях, представляют собой сумму множества падающих и отраженных затухающих волн с различными амплитудами и частотами.

**Аналогия с колебаниями сооружений при сейсмических воздействиях.** Аналогичное явление имеет место также при колебаниях надземных зданий и сооружений во время землетрясения. Как показывают теоретические исследования, перемещения на разных уровнях зданий и сооружений, вычисленные по акселерограммам реальных землетрясений, представляют собой сумму квазигармонических колебаний с периодами, равными периодам их свободных колебаний. Наиболее наглядно это вырисовывается, если за надземное сооружение принять систему с одной степенью свободы (линейный осциллятор). В этом случае ускорение инертной массы выражается формулой

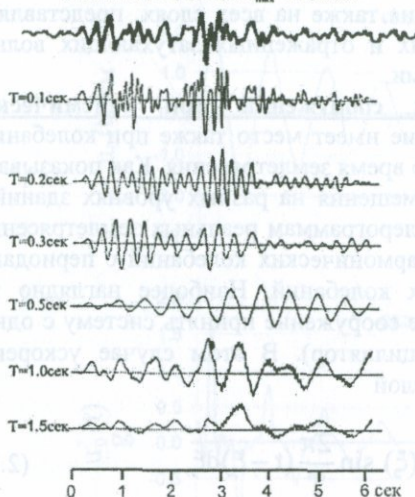
$$\tau(T, n, t) = \frac{2\pi}{T} \int_0^t e^{-\frac{n}{T}(t-\xi)} a(\xi) \sin \frac{2\pi}{T}(t-\xi) d\xi, \quad (2.81)$$

где  $T$  – период свободного колебания осциллятора (надземного сооружения),  $n$  – коэффициент затухания,  $a(t)$  – акселерограмма грунта.

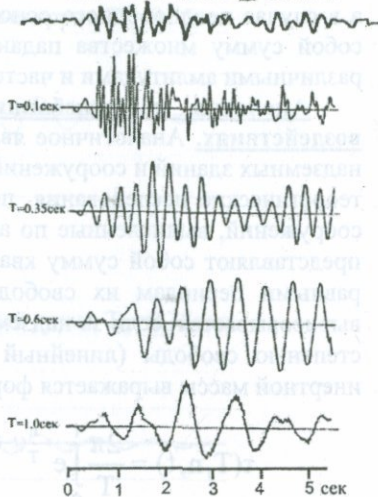
На рисунке 2.30 показаны акселерограммы и графики  $\tau(t)$ , вычисленные по формуле (2.81) для различных  $T$  для четырех разных землетрясений ( $n=5\%$ ). Графики подтверждают, что периоды вычисленных по формуле (2.81) ускорений (реакции) инертной массы с достаточной точностью равны периодам свободных колебаний  $T$  осциллятора независимо от акселерограммы землетрясения. На рисунке 2.31 показаны графики изменения во времени перемещений и сейсмических инерционных сил (ускорений) этажей 9-этажного каркасного здания с диафрагмами жесткости с учетом трех форм свободных колебаний ( $T_1 = 0.78$ ,  $T_2 = 0.26$ ,  $T_3 = 0.15$ сек), вычисленных по акселерограмме землетрясения в Hollister [91]. Их характер указывает на наличие суперпозиции по трем формам свободных колебаний бруса.

Графики изменения во времени ускорений на разных уровнях по высоте многоэтажных каменных, железобетонных и металлических зданий, мостов и высотных плотин были зарегистрированы во время ряда сильных землетрясений. В частности, в большом количестве их было зарегистрировано во время Ломо-Приетского землетрясения в Калифорнии 17 октября 1989 года [128]. Некоторые из них приведены на рис.2.31-3.33. Синхронные акселерограммы землетрясения на грунте (Free Field) и ускорении на уровнях перекрытий 2-го и 3-го этажей трехэтажного металлического здания с размером в плане  $28 \times 76$  и высотой 14.6 метров (CSMIP Station N57562, San Jose) показаны на рис. 2.32.

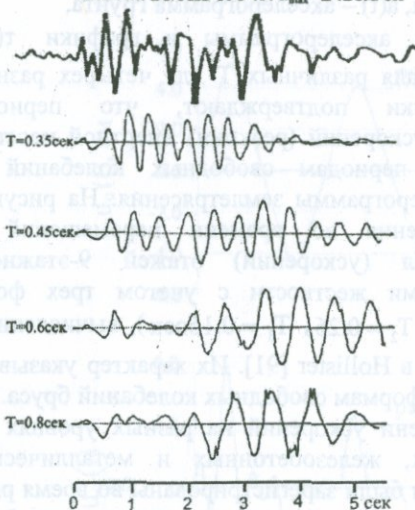
Ferndale 3/X/1941r.  $a_{\max}=93\text{см/с}^2$



Hollister 9/III/1949r.  $a_{\max}=123\text{см/с}^2$



Eureka 21/XII/1954г.  $a_{\max}=242\text{см/с}^2$



Taft 12/I/1954г.  $a_{\max}=68\text{см/с}^2$

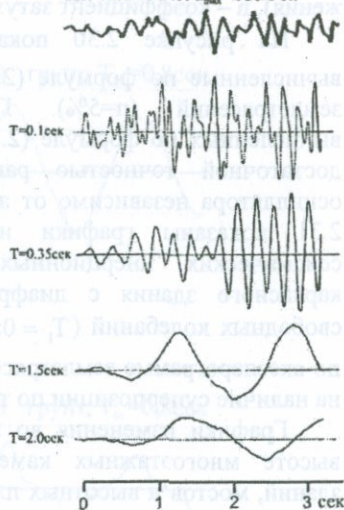


Рис. 2.30. Изменения во времени ускорения  $\tau(t)$  инертной массы линейного осциллятора с различными периодами свободных колебаний  $T$  и коэффициентом затухания  $\mu=5\%$  при четырех различных землетрясениях [91].

Жирными показаны исходные акселерограммы.



Как видно из рисунка, на ускорениях этажей преобладают периоды около 0.6сек и 0.2сек, что являются периодами свободных колебаний самого здания. На рисунке 2.32 показаны изменения ускорений перекрытий 5-го, 9-го, 12-го этажей и покрытия 14-этажного железобетонного каркасного здания с диафрагмами жесткостей (в четырех углах в плане) в Santa Rose.

Общая высота здания 40 метров, размеры в плане 26х25 метров (CSMIP Station N68489). Здесь преобладающий период – 1.25-1.30сек.

Приведем еще один характерный случай, наблюдаемый во время этого же землетрясения. На рис. 2.34 показаны ускорения перекрытий 16-го, 39-го и 44-го этажей 47-этажного здания из металлического каркаса со связями жесткости общей высотой 150м и размерами в плане 37х54м (CSMIP Station N58532).

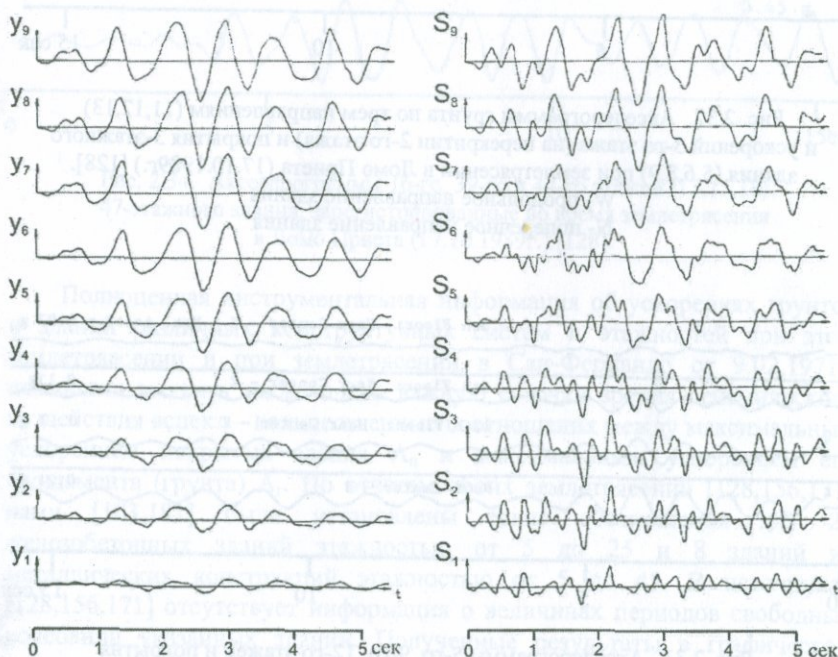


Рис. 2.31. Графики изменения перемещений  $y_k$  и сейсмических сил  $S_k$  (ускорений) этажей 9-этажного каркасного здания по акселерограмме землетрясения в Hollister 9.03.1949.

Из рисунка видно, что преобладающие периоды записей ускорений этажей приблизительно равны 0.9-1.1сек и 0.4-0.6. Уверенно можно считать это значение периодов 2 и 3 форм свободных колебаний здания.

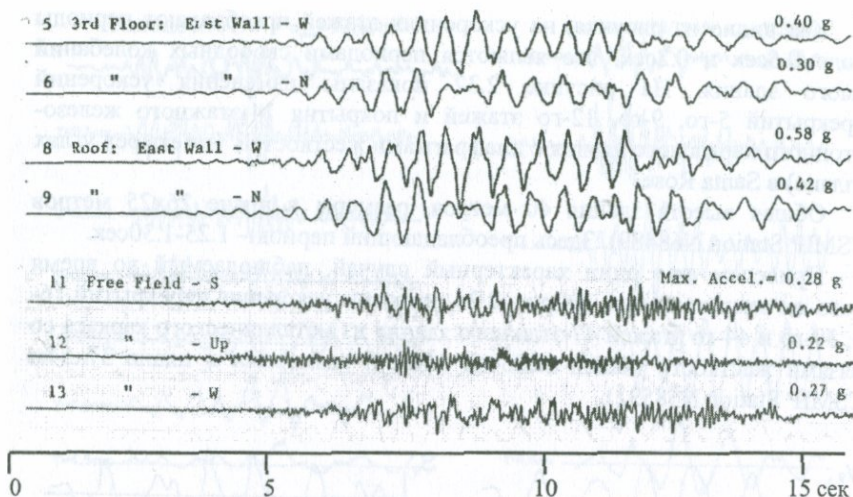


Рис. 2.32. Акселерограммы грунта по трем направлениям (11,12,13) и ускорений 3-го этажа (на перекрытии 2-го этажа) и покрытия 3-этажного здания (5,6,8,9) при землетрясении в Ломо Приета (17.10.1989г.) [128].

W- продольное направление здания

N- поперечное направление здания

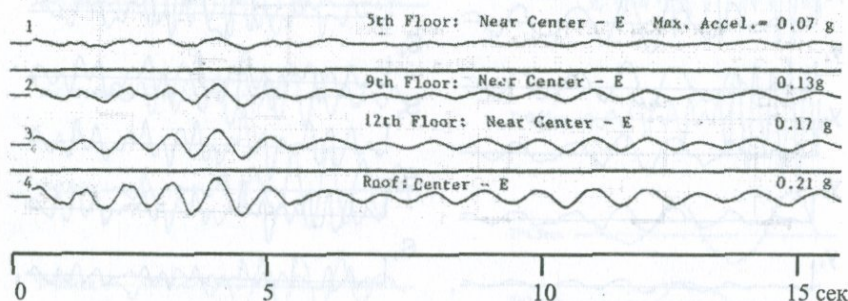


Рис. 2.33. Акселерограммы 5-го, 9-го, 12-го этажей и покрытия 14-этажного здания (1,2,3,4), зарегистрированные во время землетрясения в Ломо Приета (17.10.1989г.) [128].

Период первой формы колебания зданий такой высоты, согласно Американским нормам, будет около 3.5-4.0сек и, естественно, по этой форме ускорения здания (реакции), вызванного землетрясением, будет так мало по сравнению с ускорениями, вызванными по второй и третьей формам колебания, что их доли в общей суммарной величине ускорений



на записях не будут обнаруживаться. Это утверждение подтверждается и тем, что максимальное ускорение 39 этажа (0.13g) меньше, чем максимальное ускорение 16-го этажа (0.19g). Кроме того, при внимательном осмотре записей 16-го, 39-го и 44-го этажей можно обнаружить их антифазность, что тоже подтверждает, что приведенные записи ускорений являются суммарной реакцией здания по второй и третьей формам его свободных колебаний.

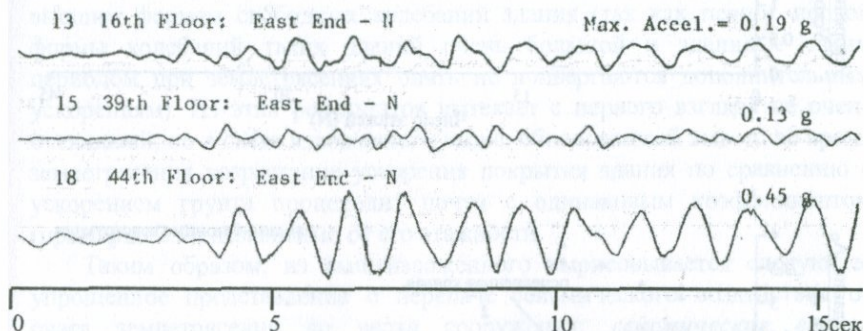


Рис. 2.34. Акселерограммы 16-го, 39-го и 44-го этажей (13,15,18) 47-этажного здания, зарегистрированные во время землетрясения в Ломо Приета (17.10.1989г.) [128].

Полноценная инструментальная информация об ускорениях грунтов и зданий различных конструктивных систем и этажностей при этом землетрясении и при землетрясении в Сан-Фернандо от 9.02.1971г. позволили выявить также очень важную с точки зрения сейсмического воздействия аспект – количественные соотношения между максимальным ускорением покрытия здания  $A_n$  и максимальным ускорением его фундамента (грунта)  $A_f$ . По отчетам обоих землетрясений [128,156,171] нами [103,181] были установлены такие соотношения для 22 железобетонных зданий этажностью от 5 до 25 и 8 зданий из металлических конструкций этажностью от 5 до 45. В источниках [128,156,171] отсутствует информация о величинах периодов свободных колебаний указанных зданий. Полученные результаты в графическом виде представлены на рис. 2.35. Следует отметить, что одновременная запись ускорения грунта (фундамента) и покрытия здания при реальных сильных землетрясениях очень редкое явление и полученные результаты, по нашему мнению, имеют большое теоретическое и практическое значение, в частности, для установления максимального значения коэффициента динамичности или спектра реакции.

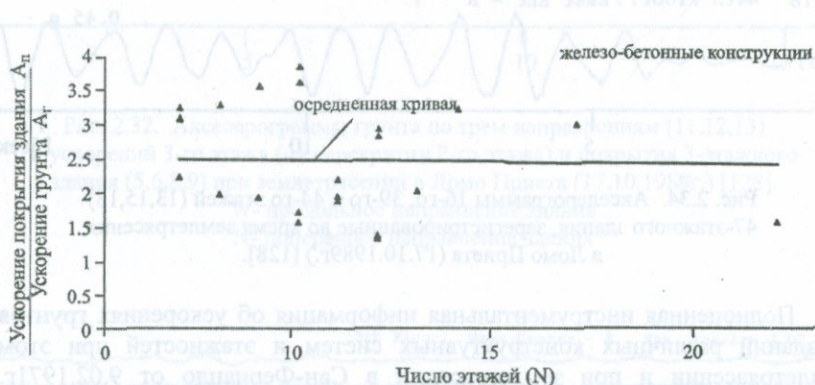
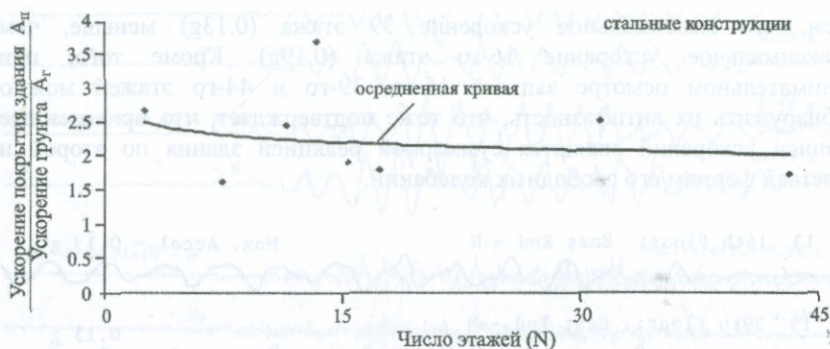


Рис. 2.35. Зависимость отношения ускорения покрытия здания к ускорению грунта в зависимости от их этажности [103, 181].

Как видно из приведенных результатов, минимальное значение  $A_n/A_r$  равно 1.2, максимальное – 4.1. При этом минимальное значение зарегистрировано для высотных зданий этажностью 25-45. Наиболее важный вывод из полученных результатов можно сделать такой: *как для высотных металлических зданий до 45 этажей, так и для железобетонных зданий до 25 этажей среднее значение  $A_n/A_r$  приближается к 2.5*. Этот результат подтверждает достоверность максимального значения нормализованного безразмерного спектра реакции, равного 2.5, принятого в нормативных документах по сейсмостойкому строительству большинства стран мира. Отметим, что так как величины ускорений на уровне покрытий высотных зданий зарегистрированы во время реального землетрясения, то следует считать, что величины этих ускорений есть результат суперпозиции (суммирования) ускорений по



нескольким формам собственных колебаний. Из этого следует второй важный вывод: в суммарной зарегистрированной величине ускорения покрытия малоэтажных зданий основную долю составило ускорение, соответствующее первой форме свободного колебания (так как периоды высших форм свободных колебаний для таких зданий очень маленькие и по ним во время землетрясений здание почти не подвергается дополнительным ускорениям), и, наоборот, в высотных зданиях основную долю зарегистрированного ускорения покрытия составляют ускорения по высшим формам свободных колебаний здания (так как период первой формы колебаний таких зданий очень большой и здания с таким периодом при землетрясениях опять не подвергаются дополнительным ускорениям). Из этих результатов вытекает с первого взгляда не очень очевидный, но в свете изложенного выше, обоснованный вывод: во время землетрясения возрастание ускорения покрытия здания по сравнению с ускорением грунта происходит почти с одинаковым коэффициентом (примерно 2.5), независимо от его этажности.

Таким образом, из вышеизложенного вырисовывается следующее упрощенное представление о передаче сейсмического воздействия от очага землетрясения до верха сооружения: *сейсмические волны, распространяющиеся от очага землетрясения на поверхности Земли, генерируют колебания грунта с преобладающими периодами, равными периодам свободных колебаний приповерхностной толщи грунта, которые в свою очередь в наземном сооружении вызывают новые колебания с преобладающими периодами, равными периодам свободных колебаний самих сооружений. Это значит, что в процессе землетрясения происходит двойная фильтрация сейсмических волн – сначала в приповерхностной толще, а потом в самом сооружении.*

В заключение отметим, что по интерпретации характера колебания грунта на поверхности Земли в зависимости от различных факторов в литературе доминируют разные мнения. В работе Э.Фаччиоли и Д.Резендица [87] на основании анализа реальных записей колебания грунта во время землетрясения сформулированы следующие два предположения: “Приведенные примеры показывают, что для сильных колебаний на относительно близком расстоянии от очага при *стабильном поведении грунтов* влияние местных грунтов условий часто оказывается не самым главным фактором” и “отсюда следует, что когда в отложениях преобладают *слабые прослойки*, распределение поверхностных колебаний в эпицентральной зоне при сильных землетрясениях в большей мере зависит от динамики местных грунтовых условий, чем от механизма очага или характеристик волнопроводящих путей”.

## 2.12. КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

Как мы уже неоднократно отметили, анализ результатов записей землетрясений показывает, что величины горизонтальных, вертикальных и вращательных перемещений, скоростей и ускорений грунта, при прочих равных условиях, существенно зависит от структуры геологического разреза места регистрации, физико-механических, прочностных, деформационных и акустических свойств залегающих пластов. Кроме того, анализ результатов последствий землетрясений показывает, что характер и особенности повреждений зданий и сооружений во время землетрясения также различны в зависимости от грунтовых условий. На рыхлых грунтах во время землетрясения преимущественно наблюдаются значительные осадки, наклоны и даже полные опрокидывания сооружений, а на скальных грунтах — повсеместные трещины, большие относительные перемещения и остаточные деформации по всему телу сооружения. Таким образом, грунтовые условия не только влияют на кинематические параметры сейсмического воздействия, но и существенно изменяют характер повреждения сооружения. Все эти обстоятельства должны найти отражение в Нормах по сейсмостойкому строительству как в виде количественных коэффициентов при определении величин инерционных сейсмических сил, так и в виде принципов проектирования. Для этого необходимо от общих понятий рыхлых и скальных грунтов перейти к выработке детальных рекомендаций по разделению грунтов площадки строительства на специальные категории по сейсмическим свойствам.

При классификации грунтовых условий по сейсмическим свойствам для норм сейсмостойкого строительства, по нашему мнению, необходимо исходить из следующих соображений:

- категорийность площадки строительства по сейсмическим свойствам должна устанавливаться на основании количественных показателей динамических характеристик геологического разреза,
- степень усиления или понижения уровня сейсмического воздействия (величина ожидаемого ускорения грунта) должна зависеть как от категории грунта, так и от силы землетрясения,
- очертание спектра реакции (безразмерного динамического коэффициента) на грунтах разной категории должно быть разным.

Возникает естественный вопрос о числе категории грунтов. В принципе, чем на большее число категорий разделить грунтовые условия, тем большая возможность более дифференцированного учета их влияния. В нормах США по сейсмостойкому строительству [212] их число равно 6. В нормах других стран их число 3 или 4. Для деления грунтов на большое число категорий необходимо провести более детальные инженерно-геологические изыскания и сейсмологические исследования,



что не всегда под силу проектным организациям. По-видимому, разделение на 4 категории можно считать наиболее оптимальным, подразумевая под ним: скальные, полускальные, рыхлые и мягкие грунты.

Задача определения категории грунта существенно затрудняется особенно для неоднородных оснований, состоящих из нескольких пластов (слоев) с мощностью  $H_k$ , плотностью  $\rho_k$  и модулем сдвига  $C_k$  от самых твердых до самых мягких. Очевидно, что главную роль в передаче энергии сейсмических волн сооружению играет верхний слой грунта, на который опирается фундамент сооружения. С другой стороны, кинематические параметры верхнего слоя в свою очередь обусловлены физико-механическими и акустическими свойствами нижележащих слоев. Здесь возникает естественный вопрос: до какой глубины  $H$  разреза нижележащие слои грунта оказывают ощутимые влияния на амплитуду и период ускорения верхнего слоя. Как мы видели выше, для скальных грунтов значение  $H$  можно принимать в пределах 30-50 метров, а для аллювиальных грунтов до уровня коренных пород – от 10 до 300 и более метров. Поэтому, *в качестве интегральной характеристики грунтов, для установления их категоричности по сейсмическим свойствам целесообразно принимать величину преобладающего периода  $T_{01}$ , так как на ее формирование, как мы видели выше, влияют физико-механические и мощностные характеристики всех слоев.* Кроме того, известно, что при любом динамическом воздействии отношение периодов свободных и вынужденных колебаний играет решающую роль. При сейсмических воздействиях преобладающий период колебания грунта фактически это период вынужденных колебаний для надземных зданий и сооружений. В некоторых странах за характеристику категоричности неоднородных оснований принимают среднюю скорость поперечных волн  $\bar{v}_s$  по формуле (2.48), что фактически соответствует вышесказанному, учитывая связь между  $T_{01}$  и  $\bar{v}_s$  согласно формуле (2.47). Основное различие заключается лишь в том, что величина  $T_{01}$  в этом случае вычисляется приближенным способом.

Для однородных грунтов скальных оснований основную роль при определении их категоричности могут играть прочностные показатели грунта и мощность слоя, а для оснований из рыхлых пород – их консистенция, пористость, влажность и мощность слоя. В табл. 2.11 и 2.12 иллюстрированы приемы разделения однородных и неоднородных оснований по сейсмическим категориям, принятым в нормах по сейсмостойкому строительству Республики Армения [75] в 2006 году. Для неоднородных оснований за расчетную категорию из двух вариантов по табл. 2.12 (в зависимости от среднего значения скоростей распространения поперечных волн  $\bar{v}_s$  и преобладающего периода  $T_{01}$ ) принимается категория с большим порядковым номером.

| Категория одно-родных грунтовых оснований | <i>Грунты в пределах более чем 30-метрового слоя, считая от планировочной отметки</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- скальные грунты всех видов, с пределом прочности на одноосное сжатие 15 МПа и более;</li> <li>- крупнообломочные грунты из магматических пород, плотные, маловлажные, содержащие до 30% песчано-глинистого заполнения;</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| II                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- скальные грунты с пределом прочности на одноосное сжатие менее 15 МПа;</li> <li>- крупнообломочные грунты, не отнесенные к I категории;</li> <li>- пески гравелистые, крупные и средней крупности, плотные и средней плотности, маловлажные;</li> <li>- пески мелкие и пылеватые, плотные и средней плотности, маловлажные;</li> <li>- пылевато-глинистые грунты с показателем консистенции <math>I_L \leq 0.5</math> при коэффициенте пористости <math>e \leq 0.9</math> для глин и суглинков и <math>e \leq 0.7</math> - для супесей;</li> </ul>                                                          |
| III                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- пески гравелистые, крупные и средней крупности, плотные и средней плотности, водонасыщенные;</li> <li>- пески мелкие и пылеватые, плотные и средней плотности, влажные;</li> <li>- пылевато-глинистые грунты с показателем консистенции <math>0.5 &lt; I_L \leq 0.7</math></li> <li>- пылевато-глинистые грунты с показателем консистенции <math>I_L \leq 0.5</math> при коэффициенте пористости <math>0.9 &lt; e \leq 1.5</math> для глин, <math>0.9 &lt; e \leq 1.0</math> для суглинков и <math>0.7 &lt; e \leq 0.9</math> - для супесей;</li> <li>- обводненные насыпные и почвенные грунты;</li> </ul> |
| IV                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- пески рыхлые, независимо от крупности, водонасыщенные;</li> <li>- пески мелкие и пылеватые, плотные и средней плотности, водонасыщенные;</li> <li>- пылевато-глинистые грунты (супеси, суглинки и глины) с показателем консистенции <math>I_L \geq 0.75</math>, глинистые грунты с показателем консистенции <math>0.5 &lt; I_L \leq 0.75</math> при коэффициенте пористости <math>e &gt; 1.5</math> для глин, <math>e &gt; 1.0</math> для суглинков и <math>e &gt; 0.9</math> - для супесей;</li> <li>- обводненные, насыпные и почвенные грунты;</li> <li>- плывуны, биогенные грунты и илы.</li> </ul>    |

**Примечания:**

1. Допускается наличие в составе грунта i категории тонких слоев грунта i+1 категории общей мощностью не более чем 10 метров или грунтов i+2 категории общей мощностью не более чем 5м.
2. Для грунтов IV категории достаточно наличие 10-метрового слоя от планировочной отметки.
3. При прогнозировании подъема уровня грунтовых вод или обводнения грунтов в процессе эксплуатации сооружения категорию грунта следует определить в зависимости от свойств грунта в водонасыщенном состоянии.
4. При проектировании зданий с подземными этажами глубина разреза считается от уровня подошвы фундамента.



| <i>Категория<br/>неоднородных<br/>грунтовых<br/>оснований</i> | Значение средней скорости $\bar{V}_s$<br>распространения поперечных волн<br>в пределах всей неоднородной<br>среды <b>Н</b> от планировочной отметки<br>до плотных пород с $V_s \geq 800$ м/с,<br>по формуле (2.48), м/с | Значение преобладающего<br>периода $T_0$ для всей<br>неоднородной среды <b>Н</b> от<br>планировочной отметки<br>до плотных пород<br>с $V_s \geq 800$ м/с, сек |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I                                                             | $\bar{V}_s > 800$                                                                                                                                                                                                       | $T_0 \leq 0.3$                                                                                                                                                |
| II                                                            | $500 < \bar{V}_s < 800$                                                                                                                                                                                                 | $0.3 < T_0 \leq 0.6$                                                                                                                                          |
| III                                                           | $150 < \bar{V}_s < 500$                                                                                                                                                                                                 | $0.6 < T_0 \leq 0.8$                                                                                                                                          |
| IV                                                            | $\bar{V}_s < 150$                                                                                                                                                                                                       | $T_0 > 0.8$                                                                                                                                                   |

Значение  $\bar{V}_s$  и  $T_0$  определяется теоретически или экспериментально в процессе проведения инженерно-геологических изысканий и сейсмологических исследований. При установлении значений  $\bar{V}_s$  и  $T_0$  по микросейсам или в результате регистрации слабых взрывов за расчетные значения, из-за нелинейной работы грунтов, соответственно принимаются  $0.77\bar{V}_s$  и  $1.3T_0$  от фактически измеренных значений  $\bar{V}_s$  и  $T_0$ . Для скальных пород со скоростью поперечных волн  $V_s$  больше чем 1500 м/сек любой однородный разрез с мощностью более чем 10 метров можно отнести к I категории. Верхний слой, на который опирается фундамент сооружения, должен иметь мощность не менее 5 метров, в противном случае этот слой целесообразно удалить.

Для грунтов IV категории достаточно наличие 10-метрового слоя от уровня подошвы фундамента. Тип фундамента, его конструктивные особенности и глубина заложения, а также изменения характеристик грунта в результате его закрепления на локальном участке не могут стать основой для изменения категории площадки строительства по сейсмическим свойствам.

**Коэффициенты грунтовых условий.** Влияние локальных грунтовых условий (категорийность грунта) на колебания земной поверхности при землетрясениях является конечным результатом сложного процесса сейсмического воздействия. При этом, в зависимости от категории грунта, уровень сейсмического воздействия может или существенно увеличиться, или, наоборот, — уменьшиться. Данные имеющихся инструментальных наблюдений показывают, что показатели изменения уровня сейсмического воздействия в зависимости от грунтовых условий разные при слабых и сильных землетрясениях. При этом качественные показатели отличия величин перемещений и ускорений грунта в зависимости от грунтовых

условий также различны. Как правило, при одинаковом эпицентральной расстоянии максимальные перемещения грунта, в зависимости от грунтовых условий места регистрации, отличаются друг от друга в значительно большей степени, чем ускорения грунта. При слабых землетрясениях перемещения на рыхлых – аллювиальных породах могут в 10 и более раз превышать значения перемещений на скальных – плотных породах, тогда когда отношение ускорений на тех же грунтах редко превышает 2 раза. Такие явления наблюдались во время большого числа землетрясений и, в частности, во время умеренных авершоков Спитакского землетрясения 1988 года, результаты которых для четырех мест регистрации с разными грунтовыми условиями приведены в табл.3.6 главы 3. В некоторых случаях определенную роль в усилении или уменьшении сейсмического эффекта в зависимости от грунтовых условий играет эпицентральное расстояние и глубина очага. Один из наиболее обоснованных вариантов графического представления зависимости между ускорениями на скальных и рыхлых грунтах при землетрясениях разной интенсивности показан на рис. 2.36, заимствованный у Х.Б.Сиди и И.М.Идрисса [149, 193]. На рисунке пунктиром показана рекомендуемая зависимость между ускорениями на участках со скальными и рыхлыми грунтами. Сплошными прямоугольниками показаны диапазоны реально зарегистрированных данных при двух известных землетрясениях: 1985 года в Мехико и 1989 года в Ломо Приета.

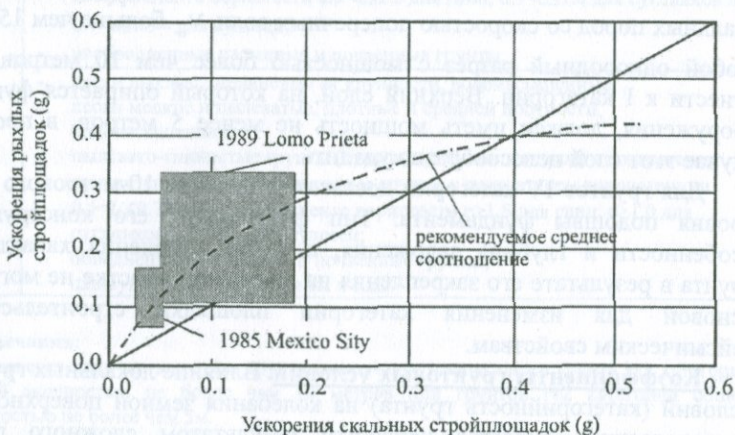


Рис. 2.36. Зависимость между ускорениями на скальных и рыхлых грунтах [177].

Как видно из рисунка (по пунктирной кривой), при относительно слабых землетрясениях значения ускорения на рыхлых грунтах зарегистрированы в среднем до 2 раза больше, чем на скальных



грунтовых участках; при сравнительно умеренных землетрясениях они почти равны, а при сильных землетрясениях происходит обратное явление – ускорение на скальных грунтах больше, чем на рыхлых.

Непосредственное воплощение аспектов учета влияния грунтовых условий при строительстве в сейсмических районах производится посредством национальных норм сейсмостойкого строительства. По нашему мнению, наиболее комплексный и дифференцированный учет факторов грунтовых условий рекомендуется нормами США [212]. В табл.2.13 приведены значения коэффициента  $C_a$ , на которое умножается значение горизонтальной сейсмической нагрузки в зависимости от категории грунта и сейсмической зоны для территории США.

Таблица 2.13

| Тип грунтового<br>профиля<br>(категория) | Безразмерные значения коэффициента $C_a$ |            |           |           |            |
|------------------------------------------|------------------------------------------|------------|-----------|-----------|------------|
|                                          | Фактор сейсмических зон $Z$              |            |           |           |            |
|                                          | $Z = 0.075$                              | $Z = 0.15$ | $Z = 0.2$ | $Z = 0.3$ | $Z = 0.4$  |
| $S_A$                                    | 0.06                                     | 0.12       | 0.16      | 0.24      | 0.32 $N_a$ |
| $S_B$                                    | 0.08                                     | 0.15       | 0.20      | 0.30      | 0.40 $N_a$ |
| $S_C$                                    | 0.09                                     | 0.18       | 0.24      | 0.33      | 0.40 $N_a$ |
| $S_D$                                    | 0.12                                     | 0.22       | 0.28      | 0.36      | 0.44 $N_a$ |
| $S_E$                                    | 0.19                                     | 0.30       | 0.34      | 0.36      | 0.36 $N_a$ |

В табл. 2.13 коэффициент  $Z$  представляет собой отношение ожидаемого ускорения грунта данной зоны к ускорению свободного падения  $g$ , коэффициент  $N_a$  – учитывает влияние активных разломов и очаговых зон на уровень сейсмического воздействия в зависимости от типа активного разлома и расстояния до строительной площадки от 2км до 15км,  $N_a$  принимается равным от 2.0 до 1.0 (см. табл. 2.21).

В нормах Республики Армения по сейсмостойкому строительству влияние грунтовых условий площадки строительства учитывается безразмерным коэффициентом грунтовых условий  $k_0$ , на которое умножается ожидаемое ускорение грунта данной сейсмической зоны. Значения  $k_0$  в зависимости от категории грунта и номера сейсмической зоны принимаются по табл. 2.14 [75].

При проектировании особо ответственных зданий и сооружений (атомные и крупные гидроэлектростанции, большие плотины и водохранилища, большепролетные мосты и эстакады) возникает необходимость дополнительной информации о продолжительности интенсивных колебаний грунтов, величинах горизонтальных и вертикальных перемещений, преобладающих периодах и длине поверхностных поперечных волн для грунтов разной категории. В принципе чем сильнее землетрясение, тем долго оно длится.

Таблица 2.14

| Категория<br>грунтов | Значения $k_0$                       |          |          |
|----------------------|--------------------------------------|----------|----------|
|                      | Сейсмические зоны – ускорение грунта |          |          |
|                      | 1 - 0.2g                             | 2 - 0.3g | 3 - 0.4g |
| I                    | 0.7                                  | 0.8      | 0.9      |
| II                   | 1.0                                  | 1.0      | 1.0      |
| III                  | 1.3                                  | 1.2      | 1.1      |
| IV                   | 1.5                                  | 1.3      | 1.0      |

Но продолжительность интенсивных колебаний грунта обусловлена также эпицентральной расстоянием. Eurocode 8 рекомендует следующие продолжительности интенсивных колебаний грунта для строительных площадок до 30км от эпицентра в зависимости от ожидаемого ускорения грунта [137]:

| Максимальное ускорение грунта $u_{0\max}$<br>в долях g  | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 |
|---------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Продолжительность интенсивных колебаний<br>грунта в сек | 10  | 15  | 20  | 25  |

Для максимальных перемещений грунта  $u_{0\max}$  (в см) согласно тем же нормам Eurocode 8 предлагается формула:

$$u_{0\max} = 0.05 u_{0\max}'' g k_0 T_0 T_d, \quad (2.82)$$

где  $k_0$  – коэффициент грунтовых условий (в частности, их значения можно принимать по табл.2.14),  $T_d$  – принимается равным 3.0сек,  $T_0$  – преобладающий период грунта данной категории, значения которого в среднем можно принимать:

для грунтов I категории  $T_0 = 0.3\text{сек}$

для грунтов II категории  $T_0 = 0.5\text{сек}$

для грунтов III категории  $T_0 = 0.7\text{сек}$

для грунтов IV категории  $T_0 = 0.9\text{сек}$ .

Длина  $\lambda$  поверхностных поперечных сейсмических волн зависит от скорости и периода колебаний частиц грунта. Согласно СНРА II-6.02.2006 [75], для  $\lambda$  рекомендуются следующие значения:

для грунтов I категории  $-\lambda > 350\text{м}$

для грунтов II категории  $-\ 250\text{м} < \lambda < 350\text{м}$

для грунтов III категории  $-\ 150\text{м} < \lambda < 250\text{м}$

для грунтов IV категории  $-\ \lambda < 100\text{м}$ .

С целью уменьшения влияния дополнительных крутильных колебаний рекомендуется длину (ширину) здания (отсека) принимать не более  $0.25\lambda$ . Значения продолжительности интенсивных сотрясений грунта преобладающих периодов и длин сейсмических волн можно



использовать также при генерировании синтетических акселерограмм для данной строительной площадки.

**Очертание спектров реакции.** За последние годы накопился большой объем информации о геометрическом очертании спектра реакции, построенного по акселерограммам сильных землетрясений, зарегистрированных на грунтах с различными геологическими разрезами. О некоторых из таких спектров мы уже говорили выше; они были приведены на рис. 2.9.

В дополнение к приведенному на рис. 2.37 показаны нормализованные спектры реакции 20 сильных землетрясений, приписываемые к грунтам разных категорий для коэффициента затухания  $\eta=5\%$ , заимствованные из работы [217].

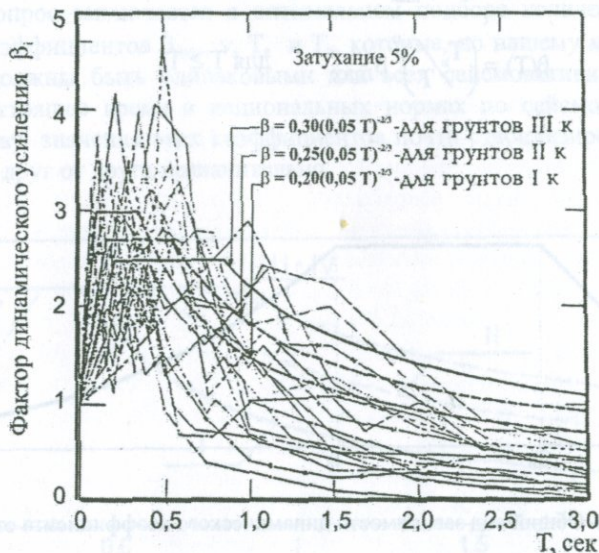


Рис. 2.37. Спектры реакций 20 сильных землетрясений [153].

Аналитическое выражение динамического коэффициента  $\beta(T)$  (безразмерного отношения ускорения инертной массы линейного осциллятора с периодом  $T$  к ускорению грунта) в общем виде, для произвольного значения коэффициента затухания  $\eta$ , представляется:

$$\beta(T) = \frac{\left[ \frac{2\pi}{T} \int_0^t e^{-\frac{\eta}{T}(t-\xi)} u_0''(\xi) \sin \frac{2\pi}{T}(t-\xi) d\xi \right]_{\max}}{u_{0\max}''}$$

В нормативных документах по сейсмостойкому строительству очертания спектра реакции обычно подвергают существенным корректировкам и осреднениям (при  $n=5\%$ ) для облегчения их использования при проектировании обычных зданий и сооружений. В общем случае упрощенное очертание спектра реакции, принятое в нормах большинства стран в мире, представляется в виде трех отрезков: восходящей от 1 прямой, постоянной горизонтальной прямой и нисходящей более пологой кривой (рис.2.38):

$$\beta(T) = 1 + \frac{T}{T_a} (\beta_{\max} - 1) \quad \text{для } 0 \leq T \leq T_a$$

$$\beta(T) = \beta_{\max} \quad \text{для } T_a \leq T \leq T_b$$

$$\beta(T) = \left( \frac{T_b}{T} \right)^v \beta_{\max} \quad \text{для } T \geq T_b$$
(2.83)

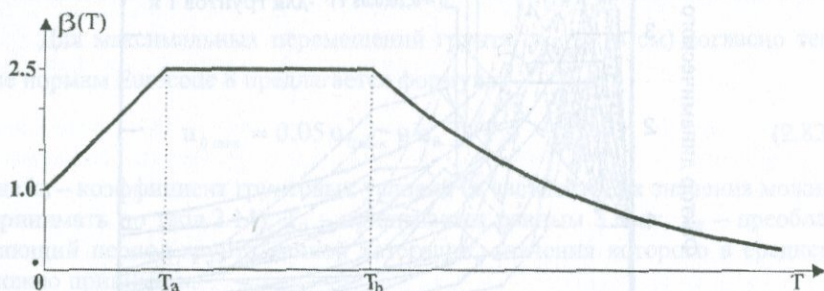


Рис. 2.38. Общий вид зависимости динамического коэффициента от периода.

Степень затухания и их различия, связанные с видом материала или конструктивной схемы сооружения в явном виде, не входит в (2.83). Для сооружений из материалов с *низкой степенью* ( $n < 5\%$ ) *затухания* (стальные конструкции) и *меньшим разбросом прочностных характеристик* и для сооружений из материалов с *высокой степенью* ( $n > 5\%$ ) *затухания* (железобетонные и каменные конструкции) и *высоким разбросом прочностных показателей* можно считать, что влияние этих факторов, с точки зрения обеспечения надежности расчета на сейсмостойкость, взаимно уравновешивается. Кроме того, для сооружений с периодом  $T > 1.5$  сек и грунтов I и II категорий ординаты спектров реакции почти не зависят от уровня затухания. Более детальный учет влияния уровня



затухания на ординаты спектров реакции по отношению к спектрам при  $p=5\%$  можно произвести по следующей формуле:

$$\beta(T, n) = k_3 \beta(T, 5), \text{ где } k_3 = \left(\frac{5}{n}\right)^{0.4} \quad (2.84)$$

рекомендуемой французскими нормами по сейсмостойкому строительству [180] для  $n$  от 2% до 30%.

При  $n=5$   $k_3=1$ . ниже для различных  $n$  приведены значения  $k_3$ :

|                    |      |      |     |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| $n, \text{ в } \%$ | 2    | 3    | 5   | 7    | 10   | 12   | 15   | 20   | 30   |
| $k_3$              | 1.44 | 1.22 | 1.0 | 0.87 | 0.75 | 0.70 | 0.64 | 0.57 | 0.48 |

Весь вопрос заключается в оптимальном подборе количественных значений коэффициентов  $\beta_{\max}$ ,  $\nu$ ,  $T_a$  и  $T_b$ , которые, по нашему мнению, в принципе должны быть одинаковыми для всех сейсмоактивных стран мира. В настоящее время в национальных нормах по сейсмостойкому строительству значения этих коэффициентов почти стабилизировались и отличаются друг от друга незначительно.

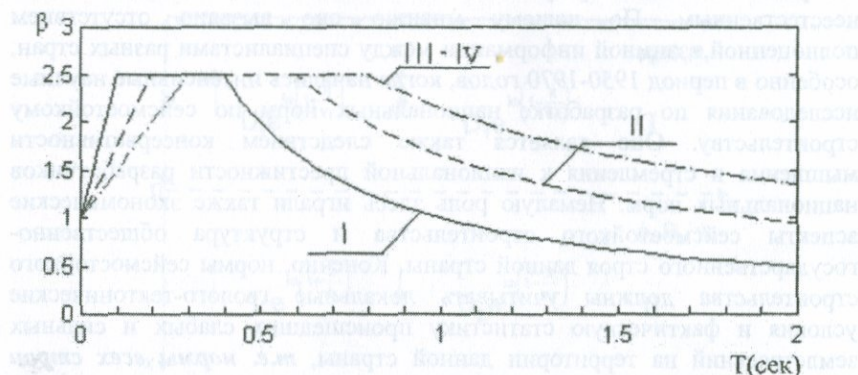


Рис. 2.39. Графики динамического коэффициента  $\beta$  по нормам РА [ 75].

Например, для грунтов II категории их значения находятся в следующих диапазонах:

$$\beta_{\max} \sim 2.5 \div 3.0$$

$$T_a \sim 0.2 \div 0.4, \quad T_b \sim 0.6 \div 0.7 \quad (2.85)$$

$$\nu \sim 2/3 \div 1.0$$

Согласно новой редакции норм Армении [75], эти коэффициенты имеют следующие значения:

$$\beta_{\max} = 2.5 \text{ для всех категорий}$$

$T_a = 0.1, 0.2, 0.3$  сек соответственно для грунтов I, II, III и IV категорий,

$T_b = 0.4, 0.6, 0.8$  сек соответственно для грунтов I, II, III и IV категорий,

$v = 1, 4/5, 2/3$  соответственно для грунтов I, II, III и IV категорий.

Соответствующие графические очертания спектров реакции показаны на рис.2.39.

В заключение несколько слов *о нормах по сейсмостойкому строительству*. В настоящее время в разных сейсмоактивных странах мира действуют разные национальные нормы проектирования, несмотря на то, что в основе всех норм лежат одни и те же явления природы: *колебания грунтов при землетрясениях и реагирование различных сооружений на эти специфические возмущения*. Сопоставление норм разных стран приводит к существенным их расхождениям как в количественном отношении, так и по тем предпосылкам, на основании которых они были разработаны. Такое положение нам кажется неестественным. По нашему мнению оно вызвано отсутствием полноценной взаимной информации между специалистами разных стран, особенно в период 1950-1970 годов, когда начались интенсивные научные исследования по разработке национальных норм по сейсмостойкому строительству. Оно является также следствием консервативности мышления и стремления к национальной престижности разработчиков национальных норм. Немалую роль здесь играли также экономические аспекты сейсмостойкого строительства и структура общественно-государственного строя данной страны. Конечно, нормы сейсмостойкого строительства должны учитывать локальные геолого-тектонические условия и фактическую статистику происшедших слабых и сильных землетрясений на территории данной страны, *т.е. нормы всех стран мира в принципе должны отличаться только картами сейсмического районирования*. Однако отражение в национальных нормах даже этих специфических особенностей не должно привести к столь большим расхождениям, которые имеют место в нормах более 50 сейсмоактивных стран мира [190].

В последние годы появились Нормы сейсмостойкого строительства отдельных регионов: Еврокод, ISO 3010, Нормы Балканских стран, стран СНГ. Все это свидетельствует о необходимости объединения усилий ученых и инженеров мира с целью разработки единых Норм и правил по сейсмостойкому строительству. Мы полагаем, что статистические наборы записей сильных и разрушительных землетрясений, накопленные во всех сейсмоактивных регионах мира за последние 50 лет, инженерный анализ



последствий этих землетрясений, теоретические и экспериментальные исследования по сейсмическим воздействиям на здания и сооружения, а также мировой опыт сейсмостойкого строительства позволяют уже сейчас приступить к разработке таких международных норм по сейсмостойкому строительству [101, 162].

### 2.13. ЗАДАЧА УСИЛЕНИЯ ИЛИ ОСЛАБЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

В прикладной сейсмологии большое практическое значение имеет так называемая задача поверхностного слоя. Как мы видели выше, обычно грунты данной строительной площадки представляют собой систему из многих слоев пород с различными физико-механическими характеристиками и мощностями. С точки зрения оценки сейсмического воздействия, всегда возникает естественный вопрос – как влияют разные расположения слоев на уровень колебаний (усиление или ослабление) частиц на поверхности Земли. Для простоты задачи пока будем считать, что данная стройплощадка состоит из двух слоев, как это показано на рис.2.40.

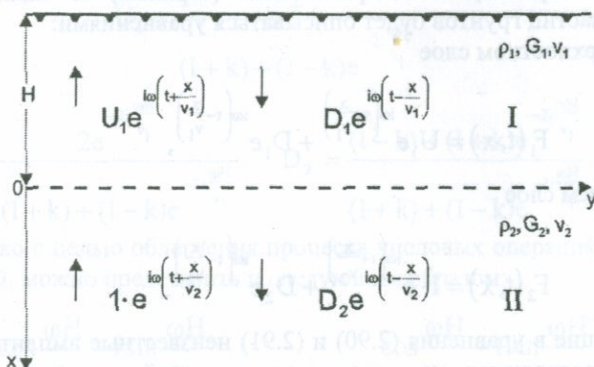


Рис. 2.40. Задача поверхностного слоя.

При этом, в отличие от выше рассмотренных задач, начало координат будем принимать на месте раздела двух слоев. Мощность поверхностного слоя обозначим через  $H$ , его физико-механические характеристики плотность, модуль сдвига, скорость распространения волн сдвига через  $\rho_1, G_1, v_1$ . Будем считать, что из нижнего слоя с неограниченной мощностью и характеристиками  $\rho_2, G_2, v_2$  под прямым углом распространяется поперечная волна с единичной амплитудой и частотой  $\omega$ :

$$1 \cdot e^{i\omega\left(t + \frac{x}{v_2}\right)}, \quad (2.86)$$

Которая, проникая в поверхностный слой, преобразуется в новую волну с той же частотой, но с амплитудой  $U_1$ :

$$U_1 e^{i\omega\left(t + \frac{x}{v_1}\right)}. \quad (2.87)$$

В свою очередь волна (2.87), отражаясь от поверхности Земли приобретает вид:

$$D_1 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{v_1}\right)}, \quad (2.88)$$

которая в свою очередь, вновь проникая в нижний слой, преобразуется в новую волну:

$$D_2 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{v_2}\right)}. \quad (2.89)$$

Таким образом, в поверхностном (верхнем) и нижнем слоях движение частиц грунтов будет описываться уравнениями:

в поверхностном слое

$$F_1(t, x) = U_1 e^{i\omega\left(t + \frac{x}{v_1}\right)} + D_1 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{v_1}\right)}, \quad (2.90)$$

в нижнем слое

$$F_2(t, x) = 1 \cdot e^{i\omega\left(t + \frac{x}{v_2}\right)} + D_2 e^{i\omega\left(t - \frac{x}{v_2}\right)}. \quad (2.91)$$

Входящие в уравнения (2.90) и (2.91) неизвестные амплитуды  $U_1$ ,  $D_1$  и  $D_2$  определяются из граничных условий задачи и условий неразрывности среды.

Так как поверхность Земли свободна от напряжений, будем иметь:

$$\left( G_1 \frac{\partial F_1}{\partial x} \right)_{x=-H} = 0. \quad (2.92)$$

Условия неразрывности среды: равенства перемещений и касательных напряжений на линии раздела слоев будет:



$$F_1(t, 0) = F_2(t, 0) \\ \left( G_1 \frac{\partial F_1}{\partial x} \right)_{x=0} = G_2 \left( \frac{\partial F_2}{\partial x} \right)_{x=0}. \quad (2.93)$$

С учетом (2.90) и (2.91), (2.92) и (2.93) примут вид:

$$U_1 e^{i\omega \left( t - \frac{H}{v_1} \right)} - D_1 e^{i\omega \left( t + \frac{H}{v_1} \right)} = 0 \\ U_1 + D_1 = 1 + D_2 \\ k(U_1 - D_1) = 1 - D_2, \quad (2.94)$$

где приняты обозначения:

$$G_1 = \rho_1 v_1^2, \quad G_2 = \rho_2 v_2^2, \\ k = \frac{G_1 v_2}{G_2 v_1} = \frac{v_1 \rho_1}{v_2 \rho_2}. \quad (2.95)$$

Решая систему (2.94) для неизвестных постоянных  $U_1$ ,  $D_1$  и  $D_2$ , соответственно получим:

$$U_1 = \frac{2}{(1+k) + (1-k)e^{-2i\frac{\omega H}{v_1}}} \\ D_1 = \frac{2e^{-2i\frac{\omega H}{v_1}}}{(1+k) + (1-k)e^{-2i\frac{\omega H}{v_1}}} \quad D_2 = \frac{(1-k) + (1+k)e^{-2i\frac{\omega H}{v_1}}}{(1+k) + (1-k)e^{-2i\frac{\omega H}{v_1}}}. \quad (2.96)$$

Однако с целью облегчения процесса числовых операций выражения для  $U_1$  и  $D_1$  можно представить и следующим образом:

$$U_1 = \frac{\cos \frac{\omega H}{v_1} + i \sin \frac{\omega H}{v_1}}{\cos \frac{\omega H}{v_1} + ik \sin \frac{\omega H}{v_1}} \quad D_1 = \frac{\cos \frac{\omega H}{v_1} - i \sin \frac{\omega H}{v_1}}{\cos \frac{\omega H}{v_1} + ik \sin \frac{\omega H}{v_1}}, \quad (2.97)$$

которые удовлетворяют первому уравнению системы (2.94). Подставляя значения  $U_1$  и  $D_1$  по (2.97) во второе или третье уравнение (2.94) для  $D_2$  получим:

$$D_2 = \frac{\cos \frac{\omega H}{v_1} - ik \sin \frac{\omega H}{v_1}}{\cos \frac{\omega H}{v_1} + ik \sin \frac{\omega H}{v_1}}. \quad (2.98)$$

Окончательно для распространяющихся в поверхностном и нижнем слоях волн  $F_1(t, x)$  и  $F_2(t, x)$  получим:

$$F_1(t, x) = \frac{\left( \cos \frac{\omega H}{v_1} + i \sin \frac{\omega H}{v_1} \right) e^{i\omega \left( t + \frac{x}{v_1} \right)} + \left( \cos \frac{\omega H}{v_1} - i \sin \frac{\omega H}{v_1} \right) e^{i\omega \left( t - \frac{x}{v_1} \right)}}{\left( \cos \frac{\omega H}{v_1} + ik \sin \frac{\omega H}{v_1} \right)}, \quad (2.99)$$

$$F_2(t, x) = \frac{\left( \cos \frac{\omega H}{v_1} + ik \sin \frac{\omega H}{v_1} \right) e^{i\omega \left( t + \frac{x}{v_2} \right)} + \left( \cos \frac{\omega H}{v_1} - ik \sin \frac{\omega H}{v_1} \right) e^{i\omega \left( t - \frac{x}{v_2} \right)}}{\left( \cos \frac{\omega H}{v_1} + ik \sin \frac{\omega H}{v_1} \right)}.$$

На поверхности Земли при  $x = -H$ , для волны  $F_1(t, x)$  будем иметь:

$$F_1(t) = \frac{\cos \frac{\omega H}{v_1} + i \sin \frac{\omega H}{v_1}}{\cos \frac{\omega H}{v_1} + ik \sin \frac{\omega H}{v_1}} e^{i\omega \left( t - \frac{H}{v_1} \right)} + \frac{\cos \frac{\omega H}{v_1} - i \sin \frac{\omega H}{v_1}}{\cos \frac{\omega H}{v_1} + ik \sin \frac{\omega H}{v_1}} e^{i\omega \left( t + \frac{H}{v_1} \right)}. \quad (2.100)$$

Заменяя в (2.100) показательные функции типа  $e^{i\epsilon}$  тригонометрическими функциями, (2.100) примет вид:

$$F_1(t) = \frac{2(\cos \omega t + i \sin \omega t)}{\cos \frac{\omega H}{v_1} + ik \sin \frac{\omega H}{v_1}}. \quad (2.101)$$

В (2.101) разделяя действительную и мнимую части, для действительной части получим:

$$F_1(t) = \frac{2 \cos \frac{\omega H}{v_1}}{\cos^2 \frac{\omega H}{v_1} + k^2 \sin^2 \frac{\omega H}{v_1}} \cos \omega t + \frac{2k \sin \frac{\omega H}{v_1}}{\cos^2 \frac{\omega H}{v_1} + k^2 \sin^2 \frac{\omega H}{v_1}} \sin \omega t \quad (2.102)$$

или в более наглядном виде:



$$F_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1), \quad (2.103)$$

где приняты обозначения

$$A_1 = \frac{2}{\sqrt{\cos^2 \frac{\omega H}{v_1} + k^2 \sin^2 \frac{\omega H}{v_1}}} \quad \text{ctg} \varphi_1 = k \text{tg} \frac{\omega H}{v_1}. \quad (2.104)$$

Аналогичным образом на линии раздела двух слоев, принимая  $x=0$ , для волны  $F_2(t,x)$  получим:

$$F_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2), \quad (2.105)$$

где

$$A_2 = \frac{2 \cos \frac{\omega H}{v_1}}{\sqrt{\cos^2 \frac{\omega H}{v_1} + k^2 \sin^2 \frac{\omega H}{v_1}}} \quad \text{tg} \varphi_2 = k \text{tg} \frac{\omega H}{v_1}. \quad (2.106)$$

Теперь изучим зависимости амплитуд колебаний  $A_1$  и  $A_2$  в зависимости от параметров поверхностного слоя  $k$ ,  $H$  и частоты падающей волны  $\omega$ . Так как имеют место соотношения

$$\lambda = v_1 T, \quad T = 2\pi/\omega, \quad (2.107)$$

то в вышеполученных формулах целесообразно в формулах (2.104) и

(2.106) выражение  $\frac{\omega H}{v_1}$  заменить выражением  $2\pi \frac{H}{\lambda}$ , где  $\lambda$  - длина волны

в поверхностном слое. Если  $\frac{H}{\lambda} = 0$ , то согласно формулам (2.104) и

(2.106) получим  $A_1=2$ ,  $A_2=2$ . Физически это означает, что или мощность поверхностного слоя  $H$  *очень маленькая*, или длина распространяющей волны  $\lambda$  *очень большая* и волна "не замечает" слишком тонкий слой. Поэтому двухслойная среда ведет себя как однослойная, на свободной поверхности которой амплитуда вследствие отраженной волны вдвое больше, чем в падающей волне [70]. Как видно из (2.104), если породы поверхностного слоя менее прочные, чем нижнего слоя, т.е.  $k < 1$ , в поверхностном слое амплитуды колебаний  $A_1$  увеличивается. Наибольшее

усиление происходит когда  $\frac{\omega H}{v_1} = \frac{\pi}{2}$ , т.е. при  $\omega = \frac{\pi v_1}{2H}$  или при

$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{4H}{v_1} = T_{01}$ , где  $T_{01}$  первый период свободных колебаний

поверхностного слоя. Это означает, что наибольшее усиление колебаний происходит при резонансе, когда период падающей волны  $T$  совпадает с периодом свободных колебаний поверхностного слоя  $T_{01}$ . В этом случае для  $A_1$  имеем

$$A_1 = \frac{2}{k}. \quad (2.108)$$

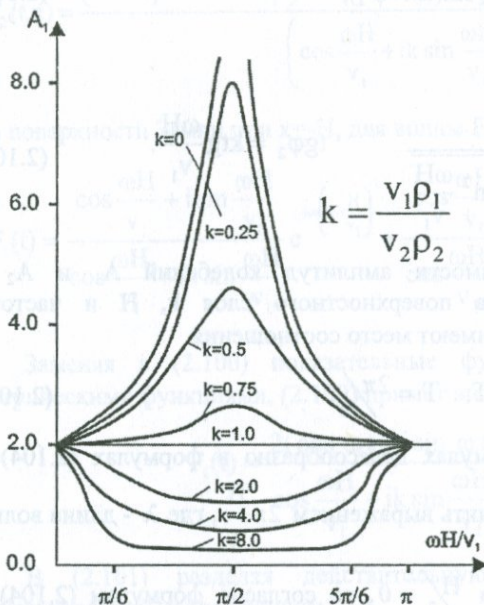


Рис. 2.41.

Усиление или ослабление амплитуд колебаний на поверхности Земли в зависимости от характеристик слоя  $k$  и частоты падающей волны  $\omega$ .

С другой стороны, так как величина  $\frac{H}{v_1}$  - это время прохождения

падающей волны по всей глубине поверхностного слоя, то выходит, что если период падающей волны  $T$  в 4 раза больше этой продолжительности

$\frac{H}{v_1}$  колебания на поверхности Земли, сильно усиливаются. При более

прочных породах поверхностного слоя по сравнению с нижним слоем, т.е. при  $k > 1$  амплитуды колебания на поверхности Земли понижаются. При

этом, наибольшее понижение опять происходит, когда имеет место

$\frac{\omega H}{v_1} = \frac{\pi}{2}$  равенство.



В общем случае графические зависимости  $A_1$  от  $k$  по формуле (2.104) показаны на рис. 2.41 [59].

С прикладной точки зрения большой интерес представляет также отношение амплитуд колебаний на поверхности Земли  $A_1$  и на уровне линии раздела слоев  $A_2$ . Согласно формулам (2.104) и (2.106) будем иметь:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{\cos \frac{\omega H}{v_1}}, \quad (2.109)$$

из которой видно, что отношение  $A_1/A_2$  может изменяться от 1 до  $\infty$ . Полученные формулы (2.103)-(2.109) дают возможность при любых характеристиках поверхностного слоя и частоты падающей волны определить уровень колебаний на поверхности Земли. В качестве примера определим колебания на поверхности Земли, когда нижний слой представляет собой плотные породы со скоростью  $v_2=1000$  м/сек и плотностью  $\rho_2=0.22$  т·сек<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>. Будем принимать, что период падающей волны  $T$  с единичной амплитудой изменяется в большем диапазоне от 0.1 сек до 1.0 сек. Мощность поверхностного слоя примем равной 30 метров. Будем рассматривать три разных варианта характеристик пород поверхностного слоя:

- $v_1=200$  м/сек,  $\rho_1=0.16$  т·сек<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>,  $k=0.14$
- $v_1=400$  м/сек,  $\rho_1=0.18$  т·сек<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>,  $k=0.32$
- $v_1=600$  м/сек,  $\rho_1=0.20$  т·сек<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>,  $k=0.54$ .

На рис. 2.42 показаны зависимости  $A_1(T)$ , вычисленные по формуле (2.104). Как видно из рисунка, амплитуды колебаний на поверхности Земли сильно растут для поверхностных слоев с рыхлыми породами, для которых  $v_1=200-400$  м/сек; при  $v_1=600$  м/сек, т.е. при поверхностном слое из плотных пород незначительное усиление колебаний на поверхности Земли имеет место только для падающей волны с периодом 0,2; при других породах, вплоть до 1,0 сек, эффектом усиления можно пренебречь.

Из рисунка видно, что наибольшее усиление колебаний при рыхлых породах ( $v_1=200$  м/сек) поверхностного слоя имеет место не только при совпадении периода  $T$  падающей волны с первым периодом  $T_0$  свободных колебаний поверхностного слоя, но и при меньших и больших от  $T_0$  значениях  $T$ . В данном случае при  $v_1=200$  м/сек  $T_0=0.6$ , а из рис. 2.41 видно, что не только при  $T=0.6$  сек, но и при  $T=0.2$  сек  $A_1=14$  (усиление в 7 раз), а при  $T=0.9$  сек  $A_1=6.8$  (усиление в 3.4 раза). Это свидетельствует о том, что в рыхлых грунтах реальная вероятность локального усиления сейсмического эффекта значительно высока.

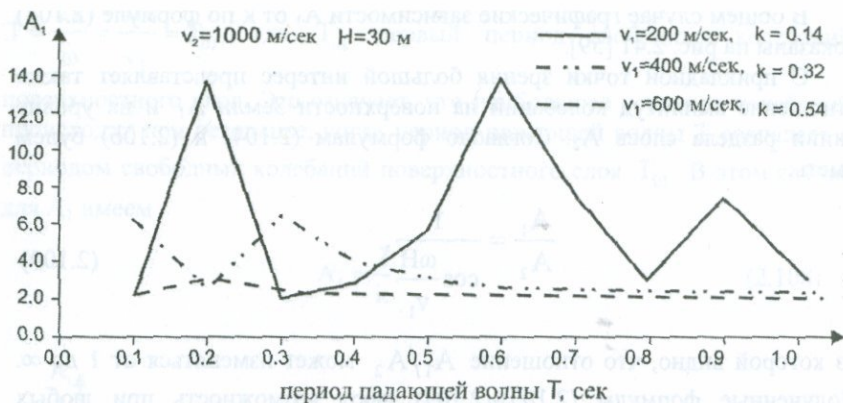


Рис. 2.42. Усиление уровня колебаний на поверхности Земли в зависимости от периода падающей волны.

В табл. 2.15 приведены значения амплитуд  $A_1$  и  $A_2$  для  $H=30$  метрового поверхностного слоя, согласно (2.109), т.е. при

$$A_2 = A_1 \cos \frac{2\pi 30}{T_1 v_1}.$$

Данные таблицы выявляют одно важное обстоятельство: для тех периодов  $T$  падающей волны, при которых на поверхности Земли возникают большие перемещения ( $A_1$ ), на уровне нижнего слоя они ( $A_2$ ) почти отсутствуют. Это означает, что для таких вариантов отраженная от поверхности Земли и вновь проникавшая в нижний слой волна гасит исходную падающую волну.

Таблица 2.15

| T<br>(сек) | $v_1 = 200$ м/сек |       | $v_1 = 400$ м/сек |       | $v_1 = 600$ м/сек |       |
|------------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
|            | $A_1$             | $A_2$ | $A_1$             | $A_2$ | $A_1$             | $A_2$ |
| 0.1        | 2.0               | 2.0   | 6.2               | 0     | 2.0               | 2.0   |
| 0.2        | 13.8              | 0     | 2.7               | 2.4   | 3.0               | 0     |
| 0.3        | 2.0               | 2.0   | 6.3               | 0     | 2.7               | 1.3   |
| 0.4        | 2.81              | 1.98  | 4.1               | 1.6   | 2.4               | 1.7   |
| 0.5        | 5.9               | 1.82  | 3.1               | 1.8   | 2.2               | 1.8   |
| 0.6        | 13.8              | 0     | 2.5               | 1.8   | 2.1               | 1.9   |
| 0.7        | 7.6               | 1.7   | 2.5               | 1.9   | 2.1               | 1.9   |
| 0.8        | 3.2               | 1.2   | 2.3               | 1.9   | 2.0               | 1.9   |
| 0.9        | 7.5               | 3.7   | 2.3               | 1.9   | 2.0               | 1.9   |
| 1.0        | 3.3               | 1.9   | 2.2               | 2.0   | 2.0               | 1.9   |



Если потребуется определить перемещения не только на поверхности Земли, но и на любой глубине, то их можно вычислить по методам линейной интерполяции между значениями  $A_1$  и  $A_2$  по формуле

$$\frac{A_1 - A_2}{A_{H_1} - A_2} = \frac{H}{H - H_1} \quad (2.110)$$

Например, для перемещения  $A_{10}$  на глубине  $H=10$ м, при  $H=30$ м,  $v_1=400$ м/сек  $T_0=0.4$  по формуле (2.110) получим:

$$\frac{4.1 - 1.6}{A_{10} - 1.6} = \frac{30}{30 - 10},$$

откуда получим  $A_{10}=3.26$ , т.е. на этой глубине коэффициент усиления равен 1.63.

## 2.14. О СЕЙСМИЧЕСКОМ МИКРОРАЙОНИРОВАНИИ. ВЛИЯНИЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТОЛЩИ

В сейсмостойком строительстве кроме карт общего сейсмического районирования (зонирования), о которых шла речь в первой части настоящей работы, пользуются также так называемыми картами *сейсмического микрорайонирования*. Они получили большое распространение в основном в бывшем Советском Союзе. Что из себя представляют эти карты. При разработке проектов архитектурно-планировочных решений территорий для новых населенных пунктов или при освоении еще незастроенных территорий городов, а также в стадии подготовки технико-экономических обоснований строительства крупных производственных комплексов (в состав которых входят десятки отдельных объектов) возникает естественная необходимость заранее выделить, в общей, подлежащей застройке территории отдельные зоны, имеющие разные, с точки зрения сейсмической опасности, уровни. Схематическое изображение территории, разделенной на такие зоны — это и есть карта сейсмического микрорайонирования данной территории. Как было отмечено выше, уровень сейсмического воздействия обусловлен структурой геологического разреза основания сооружения, поэтому эти карты в основном должны отражать особенности акустических и физико-механических характеристик пород слоев выделенных микрозон, которые в той или иной степени могут повышать или понижать уровень сейсмического воздействия, предусмотренный картой общего сейсмического районирования для данного населенного пункта. К составлению таких карт сейсмического микрорайонирования в 40-60-х годах прошлого столетия стремились их инициаторы В.О.Цшохер, С.В.Медведев, А.Г.Назаров, Ш.Г.Напетваридзе, И.А.Гзелишвили, А.К.Сафарян,

Н.В.Шебалин и др. Карты сейсмического микрорайонирования ряда крупных городов бывшего СССР – Петропавловск-на-Камчатке, Фрунзе, Алма-Аты, Ашхабада, были составлены под руководством С.В.Медведева. Карты влияния грунтовых условий были составлены также для городов Сан-Франциско, Токио, Тбилиси, Еревана, Ташкента, Душанбе и многих других крупных городов. Первоначальные принципы составления карт сейсмического микрорайонирования были разработаны при отсутствии полноценных инструментальных регистраций параметров колебаний различных грунтов при сильных землетрясениях. Были предложены некоторые упрощенные схемы учета влияния местных геологических условий, применением которых рассчитывались количественные показатели приращения (в сторону увеличения или уменьшения) уровня сейсмической опасности на общей карте сейсмического районирования (исходная сейсмичность). Так как на картах общего сейсмического районирования уровень исходной сейсмической опасности оценивался целыми баллами, то и на картах сейсмического микрорайонирования приращения также указывались целыми единицами балла, округляя их от 0 или до  $\pm 1$ . Таким образом, такой способ учета влияния местных грунтовых условий приводил к увеличению или уменьшению уровня сейсмического воздействия минимально в 2 раза и максимально в 4 раза, так как уровень сейсмического воздействия при переходе от одного балла к следующему изменяется в два раза. В действительности, как мы уже неоднократно отмечали выше, при реальных умеренных и сильных землетрясениях такие различия инструментально не регистрируются. То, что грунтовые условия оказывают существенное влияние на колебания на поверхности Земли и на поведение здания, неоспоримо и неоднократно наблюдалось при сильных землетрясениях. И не случайно, что в нормах по сейсмостойкому строительству всех стран имеются специальные коэффициенты грунтовых условий. Для США и РА они были приведены в табл.2.13 и 2.14. В действительности, сущность сейсмического микрорайонирования – это учет влияния локальных грунтовых условий на усиление или уменьшение сейсмического воздействия на поверхности Земли, о котором подробно остановились в предыдущем параграфе.

С целью выявления более четкой сущности сейсмического микрорайонирования еще раз остановимся на задаче о роли приповерхностной толщи на формирование колебательного процесса на поверхности Земли в более общей постановке.

И так, предположим, что для некоторой небольшой территории данной сейсмической зоны требуется составить карту сейсмического микрорайонирования по вышеописанным принципам. Будем считать, что в результате геотехнических и геофизических исследований получены все инженерно-геологические и физико-механические параметры геологических разрезов исследуемой территории. Естественно, что эти данные



позволят составить литологическую колонку для любого вертикального разреза типа, рассмотренного выше в 2.5. В первом приближении примем, что все плоскости колонки имеют горизонтальную направленность. По аналогии с однослойным вариантом в качестве расчетной примем показанную на рис. 2.43 схему, где для упрощения вычислительных операций в отличие от схемы 2.40 для каждого слоя начало координат принято на его верхней плоскости.

Допустим, что из коренных пород в сторону расположения слоев под прямым углом распространяется произвольная поперечная волна  $f(t)$ .

Волну, проникающую из слоя  $i+1$  в  $i$ -ый слой, обозначим через  $U_i f(t)$ , а волну (отраженную), проникающую из  $i-1$  в  $i$ -ый слой, через  $D_i f(t)$ , где  $U_i$  и  $D_i$  пока неизвестные коэффициенты. Перемещения слоев будут обусловлены падающими и отраженными волнами и выражаться уравнениями:

$$\begin{aligned} u_1(x, t) &= U_1 f\left(t + \frac{x_1 - H_1}{v_1}\right) + D_1 f\left(t - \frac{x_1}{v_1}\right) \\ u_2(x, t) &= U_2 f\left(t + \frac{x_2 - H_2}{v_2}\right) + D_2 f\left(t - \frac{x_2}{v_2}\right) \\ &\quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \\ u_i(x, t) &= U_i f\left(t + \frac{x_i - H_i}{v_i}\right) + D_i f\left(t - \frac{x_i}{v_i}\right) \\ &\quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \\ u_n(x, t) &= f\left(t + \frac{x_n - H_n}{v_n}\right) + D_n f\left(t - \frac{x_n}{v_n}\right). \end{aligned} \quad (2.111)$$

Так как поверхность Земли свободна от напряжений, должно иметь место равенство:

$$G_1 \frac{\partial u_1(x, t)}{\partial x} = 0, \quad \text{при } x_1 = 0$$

или

$$U_1 f\left(t - \frac{H_1}{v_1}\right) - D_1 f(t) = 0. \quad (2.112)$$

На плоскостях раздела соседних слоев при  $x_i=0$  в силу непрерывности среды должны удовлетворяться еще  $2n-2$  условий равенства перемещений и касательных напряжений:

$$U_{i-1}f(t) + D_{i-1}f\left(t - \frac{H_{i-1}}{v_{i-1}}\right) = U_i f\left(t - \frac{H_i}{v_i}\right) + D_i f(t) \quad (2.113)$$

$$k_{i-1} \left[ U_{i-1}f(t) - D_{i-1}f\left(t - \frac{H_{i-1}}{v_{i-1}}\right) \right] = U_i f\left(t - \frac{H_i}{v_i}\right) - D_i f(t)$$

$$i = 2, 3, \dots, n-1$$

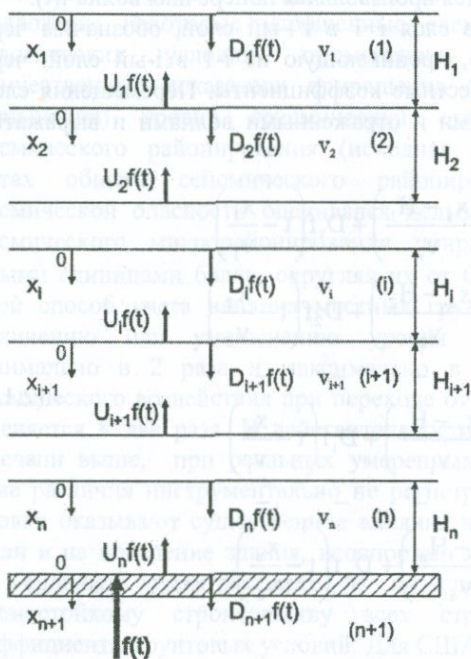


Рис. 2.43.  
Расчетная схема  
многослойного  
литологического  
разреза [59, 96].

И наконец, на уровне коренных пород величина перемещения будет обусловлена только падающей волной  $f(t)$  и отраженной от границы нижнего слоя волной  $D_{n+1}f(t)$ , в результате чего получим еще одно равенство в виде:

$$\text{при } x_n = H_n, \quad u_n(x, t) = f(t) - D_{n+1}f(t)$$

или

$$f(t) + D_n f\left(t - \frac{H_n}{v_n}\right) = f(t) - D_{n+1}f(t). \quad (2.114)$$

Из полученных уравнений (2.111)-(2.114) получаются следующие выражения для коэффициентов  $D_i$  и  $U_i$  волн [59, 96]:



для волн, проходящих в первом слое:

$$D_1 f(t) = U_1 f\left(t - \frac{H_1}{v_1}\right) \quad (2.115)$$

$$U_1 f(t) = \beta_{0,1,2} U_2 f\left(t - \frac{H_2}{v_2}\right) + \alpha_{1,2}^0 D_1 f\left(t - \frac{H_1}{v_1}\right),$$

для волн, проходящих в  $2 \div (n-1)$  слоях:

$$\begin{aligned} D_i f(t) &= \alpha_{0,i-1,i} U_i f\left(t - \frac{H_i}{v_i}\right) + \beta_{i-1,i}^0 D_{i-1} f\left(t - \frac{H_{i-1}}{v_{i-1}}\right) \\ U_i f(t) &= \beta_{0,i,i+1} U_{i+1} f\left(t - \frac{H_{i+1}}{v_{i+1}}\right) + \alpha_{i,i+1}^0 D_i f\left(t - \frac{H_i}{v_i}\right) \end{aligned} \quad (2.116)$$

$$i = 2, 3, \dots, n \quad U_{n+1} = 1,$$

для волн, проходящих в нижнем  $n$ -ом слое:

$$\begin{aligned} D_n(t) &= \alpha_{0,n-1,n} U_n f\left(t - \frac{H_n}{v_n}\right) + \beta_{n-1,n}^0 + \beta_{n-1,n}^0 D_{n-1} f\left(t - \frac{H_{n-1}}{v_{n-1}}\right) \\ U_n(t) &= \beta_{0,n,n+1} U_{n+1} f(t) + \alpha_{n,n+1}^0 D_n f\left(t - \frac{H_n}{v_n}\right), \end{aligned} \quad (2.117)$$

где приняты обозначения

$$\begin{aligned} k_{i-1} &= \frac{\rho_{i-1} v_{i-1}}{\rho_i v_i}, \quad v_i = \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}} \\ \alpha_{0,i-1,i} &= \frac{1 - k_{i-1}}{1 + k_{i-1}} \quad \beta_{0,i,i+1} = 1 + \alpha_{0,i,i+1} \\ \alpha_{i,i+1}^0 &= -\alpha_{0,i,i+1} \quad \beta_{i-1,i}^0 = 1 - \alpha_{0,i-1,i} \end{aligned} \quad (2.118)$$

$$i = 2, 3, \dots, n-1$$

В обозначениях коэффициенты  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$  и  $\alpha^0$  и  $\beta^0$  выражают следующие физические свойства:

$\alpha_{0,i-1,i}$  - коэффициент отражения от нижней границы плоскости раздела,

$\beta_{0,i,i+1}$  - коэффициент передачи от нижнего слоя к верхнему слою по плоскости раздела,

$\alpha_{i,i+1}^0$  - коэффициент отражения от верхней границы плоскости раздела,

$\beta_{i-1,i}^0$  - коэффициент передачи от верхнего слоя к нижнему слою по плоскости раздела.

Полученные решения (2.115)-(2.117) позволяют при произвольной падающей от коренных пород волны  $f(t)$  и известных параметрах слоев  $\rho_i, G_i, v_i, H_i$  вычислить величины перемещений скоростей и ускорений на уровне поверхности Земли  $u_1(x,t)$ ,  $u_1'(x,t)$  и  $u_1''(x,t)$ , а также на уровнях всех слоев  $u_i(x,t)$ ,  $u_i'(x,t)$  и  $u_i''(x,t)$ . А это позволит ответить на главный вопрос задачи сейсмического микрорайонирования – какое влияние оказывают физико-механические и акустические характеристики всех слоев приповерхностной толщи на величину параметров колебаний на поверхности Земли.

Решение задачи с практической точки зрения значительно упростится, если в качестве падающей волны  $f(t)$  принимать гармоническую волну с единичной амплитудой, как это было принято в случае двухслойного основания, т.е. принимать

$$f(t) = 1 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (2.119)$$

где  $T$  – период падающей волны,  $p=1/T$  – ее частота. Давая периоду  $T$  разные значения (0.05÷3.0сек) для данной многослойной приповерхностной толщи, можно получить соответствующие *коэффициенты отклика* на поверхности Земли  $R(T) = u_{1\max} / f_{\max}$ . Для сравнительного анализа  $f_{\max}$  принимается равным 2, так как при однородной среде амплитуда падающей волны на поверхности Земли удваиваются. По всей вероятности, наибольшие значения  $R(T)$  окажутся для тех значений  $T$ , которые совпадают с периодами свободных колебаний  $T_{01}, T_{02}, T_{03}$  приповерхностного слоя, т.е. при наличии резонансных явлений в приповерхностной толще.

Для установления параметров любого геологического разреза (колонки) территории, подлежащей микрорайонированию, потребуется большой объем изыскательных работ и средств, поэтому целесообразно установить такие параметры для таких разрезов, которые имеют на поверхности Земли однотипные обнаженные породы (первый слой) независимо от их мощности.

Обычно обнаженные на поверхности Земли породы подразделяются на четыре основных типа: скальные, полускальные, рыхлые и мягкие. При



этом на подлежащей микрорайонированию территории могут встречаться различные варианты геологического разреза. Например, для участков со скальными обнажениями мощность скального слоя и структура нижних напластований могут быть разными. В общем случае на территории, подлежащей микрорайонированию, могут встречаться с верхним скальным слоем  $n$ -ое количество разных разрезов, а с верхним рыхлым слоем —  $m$  разных разрезов. Располагая параметрами всех разрезов данного типа, по описываемой выше методике, строятся зависимости  $R(T)$  для каждого разреза, производится их осреднение, в результате получаем одну расчетную зависимость  $R(T)$  для данного типа стройплощадки. Таким образом, в итоге для территории, подлежащей микрорайонированию получим четыре графические зависимости  $R(T)$  (спектры) для стройплощадок со скальными, полускальными, рыхлыми и мягкими обнаженными породами на поверхности Земли. Напомним, что  $T$  — здесь период в секундах падающей от нижних коренных пород гармонической волны с единичной амплитудой, поэтому значение  $R(T)$  в действительности будет коэффициентом локального усиления или понижения уровня сейсмического воздействия (ускорение грунта), принятого на общей карте сейсмического районирования. Преимущество этого способа заключается в том, что он позволяет в результате микрорайонирования данной территории не только определить степень изменения уровня сейсмической опасности в локальной стройплощадке, но и определить действительный уровень сейсмического воздействия на здания и сооружения с различными периодами собственных колебаний, которые предусматриваются возвести на этой площадке. Это вытекает из характера спектров  $R(T)$  отклика (реакции) грунтов. Те значения  $T$ , при которых на спектрах прослеживаются наибольшее или наименьшее значения ординат  $R$ , одновременно будут означать, что здания и сооружения с такими же значениями периодов собственных колебаний будут подвергаться наибольшему или наименьшему уровню сейсмического воздействия. Таким образом, осуществленное по вышеизложенной методике микрорайонирование территории (городов, крупных промузлов и электростанций) не только ответит на основной вопрос — для каких локальных стройплощадок имеет место усиление или понижение уровня сейсмической опасности, но на новый не менее важный вопрос — на данной стройплощадке, какие здания и сооружения целесообразно возвести с точки зрения обеспечения наиболее благоприятных условий для их сейсмостойкости. А это, с нашей точки зрения, наиважнейшая задача сейсмостойкого строительства.

В качестве примера ниже приводятся результаты исследований по микрорайонированию территории города Сан Франциско, проведенные группой авторов в составе Жака Боатврича, Линды Сиикинга и Мануэла

Бони́ллы\* в 1995 году после Ломо-Приетского землетрясения. Грунты всей территории города размерами 14x12 километров, показанной на рис.2.44 (масштаб 1:24000), были разделены на четыре основные группы по обнаженным на поверхности Земли породами:

- I. Коренные скальные породы (Franciscan bedrock);
- II. Серпентиниты (Serpentine);
- III. Пески, разнообразные (Miscellaneous sands);
- IV. Водонасыщенные глины и насыпные отложения (Bay mud and fill).

На всей территории были выделены 8 разрезов по I группе, 2 разреза по II, 8 по III и 10 разрезов по IV группам грунтов. Мощности слоев в группах III и IV оказались небольшими – меньше чем 4 метра, мощность коренных пород были до 30 метров. Для всех 28 разрезов были построены спектры реакции (response)  $R(p)$  ( $p=1/T$  – частота колебания), а потом их распределили по группам I-IV. Для каждой группы значения  $R(p)$  были определены исходя из количества разрезов по группам (8, 2, 8, 10). Окончательные результаты показаны на графиках 2.45, причем оси  $R$  и  $p$  приведены по логарифмической шкале. Безразмерные значения  $R$  изменяются от 0.3 до 10 раз, а значения  $p$  – от 0.3 герц до 10 герц (для периода  $T$  соответственно от 3.3сек до 0.1сек). На графиках  $R(p)$  штрихованные площади показывают пределы изменения значений  $R$  для фиксированного значения  $p$ . На оси  $p$  на графиках указаны пределы собственных частот двухэтажных, четырехэтажных и десятиэтажных зданий:

для 2-этажных зданий  $2.9 \div 5.4$  герц ( $0.34 \div 0.18$ сек),

для 4-этажных зданий  $1.4 \div 2.9$  герц ( $0.7 \div 0.34$ сек),

для 10-этажных зданий  $0.78 \div 1.4$  герц ( $1.28 \div 0.7$ сек),

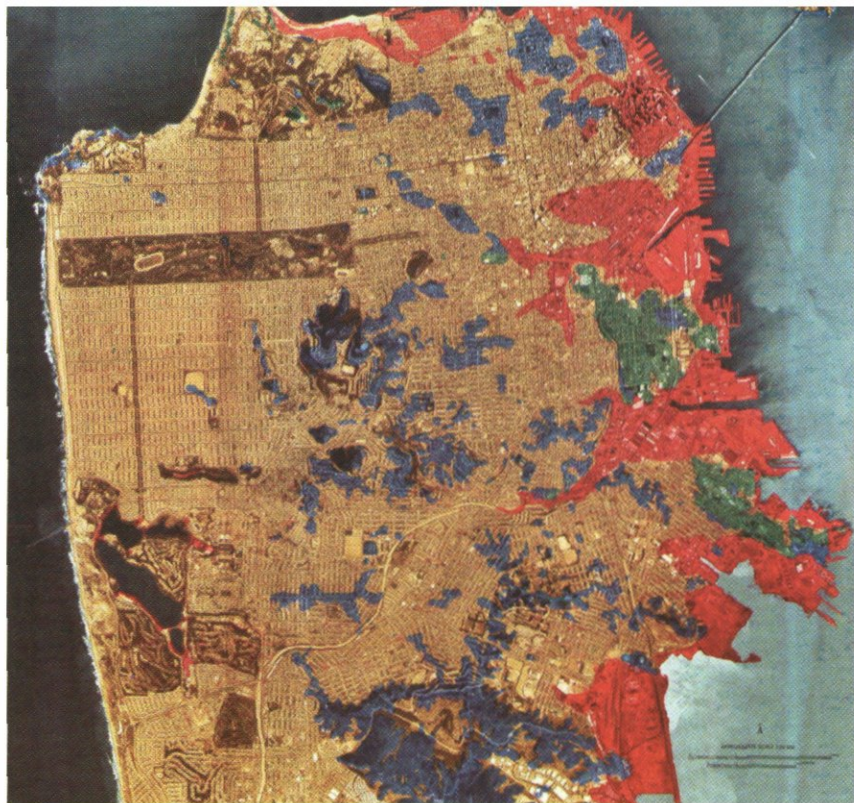
которые позволяют оценить степень усиления или понижения уровня сейсмического воздействия на здания, возведенные на грунтах этой группы. Как видно из графиков, для всех трех видов зданий (3-, 4-, 10-этажных), возведенных на грунтах I категории, значения коэффициентов  $R$  почти равны 1 и изменяются в узком диапазоне от 0.8 до 1.1.

А для этих же зданий, возведенных на грунтах IV типа, значения  $R$  сильно отличаются друг от друга, достигая для 10-этажного здания от 3.2 раза до 8.5 раза. Это значит, что на грунтах IV типа 10-этажные здания будут подвергаться от 3.2 до 8.5 раза большему сейсмическому воздействию, чем если бы они были бы возведены на грунтах I типа.

Анализ всех спектров  $R(p)$  показывает, что для данной территории (территории города Сан Франциско) на грунтах I типа все здания (по

\* Ground Shaking in San Francisco by Juke Boatwright, Linda Seeking and Manuel G.Bonilla. US Department of the Interior. US Geological Survey. Virginia, 1995 (Издана в виде плаката размером 90-60см).

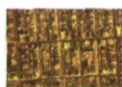




I. Коренные породы  
(Franciscan bedrock)



II. Серпентиниты  
(Serpentinite)



III. Разнокарактерные пески  
(Miscellaneous sands)

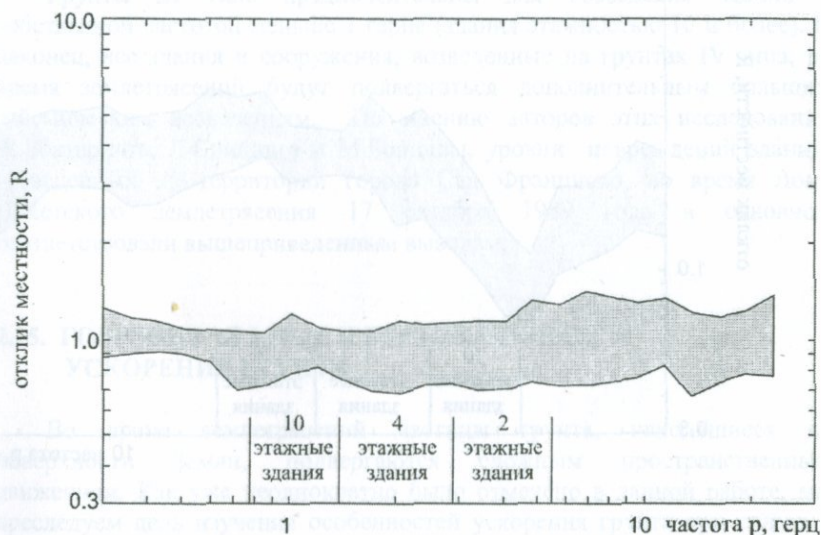


IV. Искусственные водонасыщенные  
глины и илы (Bay mud and fill)

Рис.2.44.Геологическая карта территорииСан-Франциско.

этажности и жесткости), с точки зрения их сейсмостойкости, находятся в благоприятных условиях.

# I. Коренные породы (Franciscan bedrock)



# II. Серпентиниты (Serpentinite)

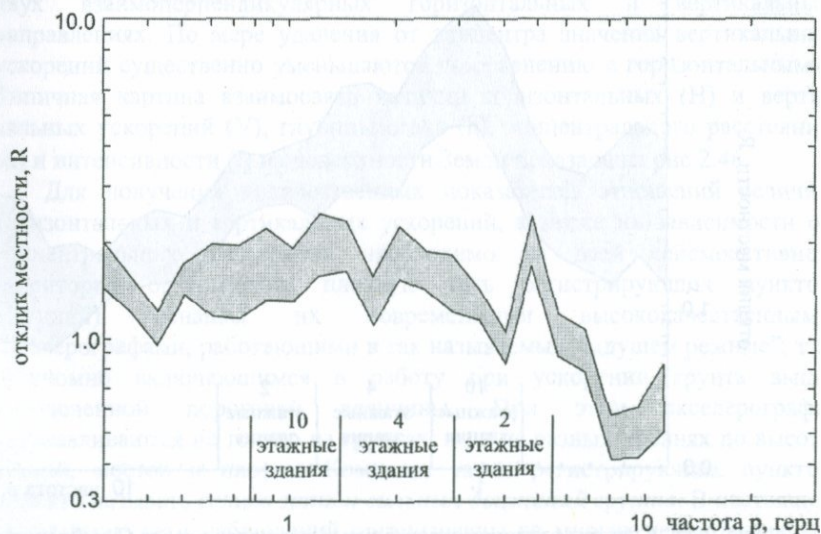
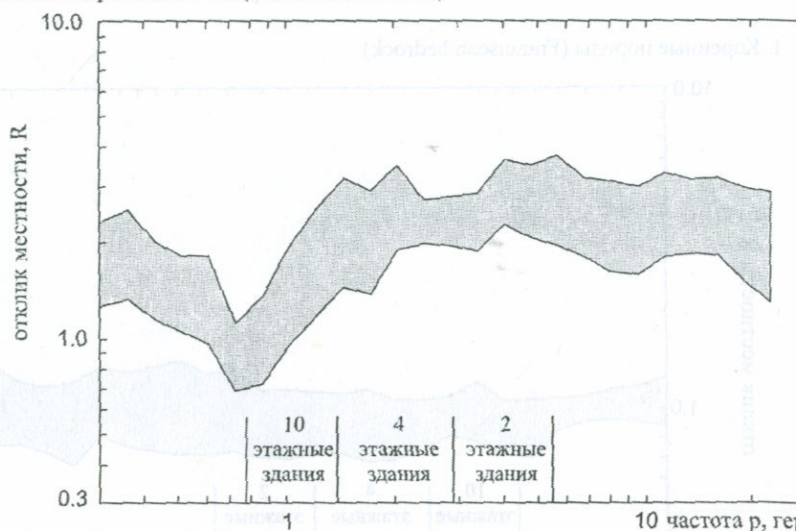


Рис. 2.45. Спектры откликов строительных площадок города Сан Франциско с различными грунтовыми условиями.



### III. Разнообразные пески (Miscellaneous sands)



### IV. Водонасыщенные глины и насыпные отложения (Bay mud and fill)

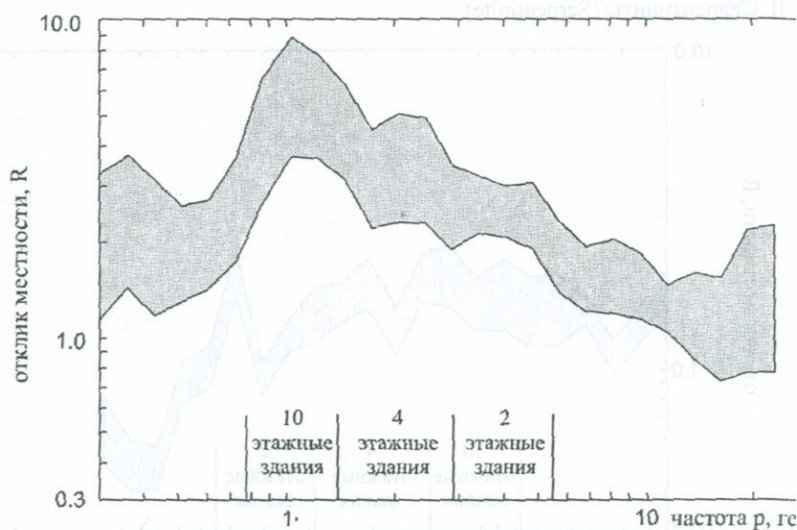


Рис. 2.45. Спектры откликов строительных площадок города Сан Франциско с различными грунтовыми условиями.

На грунтах II типа в наиболее благоприятных условиях находятся здания, имеющие собственную частоту больше чем 4 герца; здания с собственной частотой меньше чем 1 герц на этих грунтах также не будут подвергаться большим сейсмическим воздействиям.

Грунты III типа предпочтительны для возведения зданий с собственной частотой меньше 1 герца (здания этажностью 10 и более). И наконец, все здания и сооружения, возведенные на грунтах IV типа, во время землетрясений будут подвергаться дополнительным большим сейсмическим воздействиям. По мнению авторов этих исследований Ж.Боатвричта, Л.Сиикинга и М.Бониллы, уровни повреждений зданий, возведенных на территории города Сан Франциско, во время Лома Приетского землетрясения 17 октября 1989 года в основном соответствовали вышеприведенным выводам.

## 2.15. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ И ВЕРТИКАЛЬНЫЕ УСКОРЕНИЯ ГРУНТА

Во время землетрясений частицы грунта, находящиеся на поверхности Земли, подвергаются сложным пространственным движениям. Как уже неоднократно было отмечено в данной работе, мы преследуем цель изучения особенностей ускорения грунта при сильных землетрясениях. Современные акселерографы снабжены тремя отдельными маятниками для раздельной регистрации ускорений частиц грунта в двух взаимоперпендикулярных горизонтальных и вертикальных направлениях. По мере удаления от эпицентра значения вертикальных ускорений существенно уменьшаются по сравнению с горизонтальными. Типичная картина взаимосвязи величин горизонтальных ( $H$ ) и вертикальных ускорений ( $V$ ), глубины очага ( $h$ ), эпицентрального расстояния ( $\Delta$ ) и интенсивности ( $I$ ) на поверхности Земли показана на рис.2.46.

Для получения количественных показателей отношений величин горизонтальных и вертикальных ускорений, а также их зависимости от эпицентрального расстояния необходимо на всей сейсмоактивной территории организовать плотную сеть регистрирующих пунктов (станций), оснащая их современными высококачественными акселерографами, работающими в так называемых “ждущем режиме”, т.е. автономно включающимся в работу при ускорении грунта выше определенной пороговой величины. При этом акселерографы устанавливаются не только на грунтах, но и на разных уровнях по высоте зданий, мостов и плотин. Комплекс таких регистрирующих пунктов принято называть *сетью записи сильных движений грунта*. В настоящее время такие сети наблюдений организованы во многих сейсмоактивных странах мира.



Наибольших достижений в организации таких сетей добились США и Япония. Вся территория Калифорнийского штата насыщена плотной сетью трехкомпонентных надежных акселерографов, установленных на сотнях свободных участков различных грунтов, на разных этажах и покрытиях зданий из кирпича, железобетона и металла, на конструкциях мостов, плотинах водохранилищ. После любого сильного землетрясения результаты регистраций акселерографов оперативно публикуются, что дает возможность их широкого использования со стороны сейсмологов и специалистов по сейсмостойкому строительству.

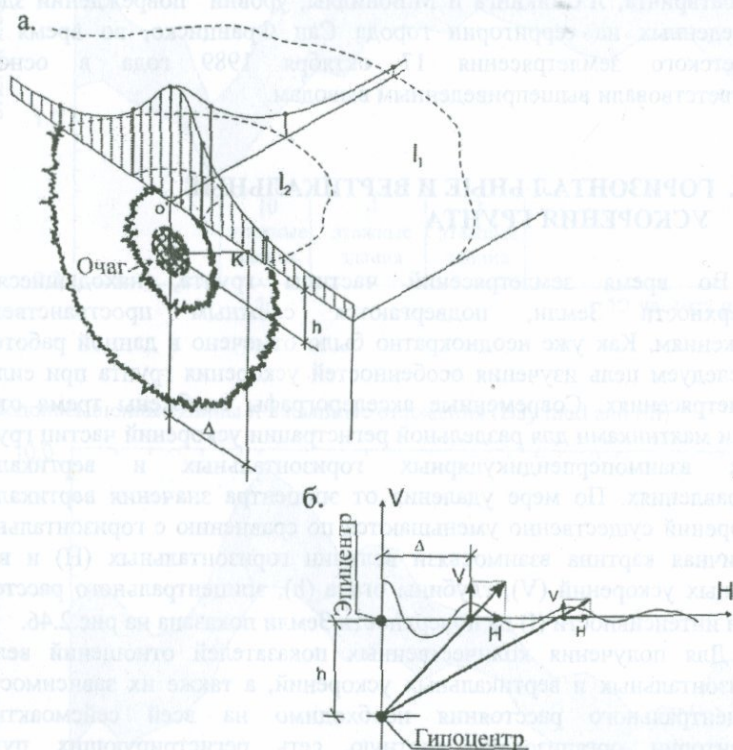


Рис. 2.46. Схематическое изображение очаговой зоны (а) и соотношения между горизонтальным и вертикальным компонентами ускорения грунта (б).

В настоящее время в разных странах мира уже накоплен большой объем трехкомпонентных акселерограмм грунта. Для общего представления об их характере на рис. 2.47.1-2.47.13 приведен ряд таких акселерограмм по хронологии происшествий соответствующих землетрясений в разных странах мира. Основные параметры этих землетрясений приведены в табл.2.16.

| N<br>N | Землетрясения          | Дата<br>землетрясения | Магнитуда, М | Эпицентральное<br>расстояние $\Delta$ , в км | Максимальное ускоре-<br>ние в долях g |       |                                        |
|--------|------------------------|-----------------------|--------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|-------|----------------------------------------|
|        |                        |                       |              |                                              | Горизонталь-<br>ная составл.          |       | Верти-<br>кальная<br>составля-<br>ющая |
|        |                        |                       |              |                                              | 1                                     | 2     |                                        |
| 1      | Эль-Центро (США)       | 18.05.1940            | 6.7          | 50                                           | 0.32                                  | 0.21  | 0.28                                   |
| 2      | Тафт (США)             | 21.07.1952            | 7.7          | 60                                           | 0.19                                  | 0.17  | 0.12                                   |
| 3      | Юрика (США)            | 21.12.1954            | 6.6          | 7                                            | 0.28                                  | 0.17  | 0.11                                   |
| 4      | Сан-Фернандо (США)     | 09.02.1971            | 6.6          | 5                                            | 1.25                                  | 1.17  | 0.72                                   |
| 5      | Газли (Узбекистан)     | 17.05.1976            | 7.2          | 22                                           | 0.60                                  | 0.57  | 1.03                                   |
| 6      | Табас (Иран)           | 16.03.1978            | 7.4          | 3+5                                          | 0.87                                  | 0.911 | 0.732                                  |
| 7      | Монтенегро (Югославия) | 15.04.1979            | 7.0          | 29                                           | 0.43                                  | 0.3   | 0.25                                   |
| 8      | Мексика                | 19.09.1985            | 8.2          | 45                                           | 0.16                                  | 0.15  | 0.13                                   |
| 9      | Спитак (Армения)       | 07.12.1988            | 6.8          | 30                                           | 0.21                                  | 0.17  | 0.15                                   |
| 10     | Лома-Приета (США)      | 17.10.1989            | 7.1          | 7                                            | 0.64                                  | 0.50  | 0.47                                   |
| 11     | Куширо-Оки (Япония)    | 15.01.1993            | 7.8          | 14                                           | 0.92                                  | 0.82  | 0.46                                   |
| 12     | Манджил (Иран)         | 20.06.1990            | 7.7          | 5                                            | 0.65                                  | 0.62  | 0.52                                   |
| 13     | Эрзинджан (Турция)     | 13.03.1992            | 6.9          | 10                                           | 0.50                                  | 0.39  | 0.25                                   |
| 14     | Нортридж (США)         | 17.01.1994            | 6.7          | 19                                           | 0.61                                  | 0.60  | 0.61                                   |
| 15     | Кобе (Япония)          | 17.01.1995            | 7.2          | 10                                           | 0.82                                  | 0.62  | 0.33                                   |

Как видно из таблицы, максимальные значения ускорения грунта в двух перпендикулярных направлениях для большинства землетрясений мало отличаются друг от друга. Что касается значения ускорения грунта по вертикальному направлению, то их отношения к горизонтальным могут изменяться в большом диапазоне в зависимости от эпицентрального направления

Для более детального изучения этого вопроса нами были использованы данные двух калифорнийских землетрясений – 9 февраля 1971 года в Сан Фернандо [171] и 17 октября 1989 года в Лома Приета [128]. При первом землетрясении трехкомпонентные акселерограммы были записаны на 125 участках, а при втором – на 112 участках грунта. С целью идентификации результатов при анализе данных были использованы только данные тех станций, грунтовые условия которых в отчетах указаны как “alluvium”. Поэтому для землетрясения в Сан Фернандо использовались данные 43 станций, а для Лома Приета – 39 станций.



EL CENTRO 1940 MAY 18

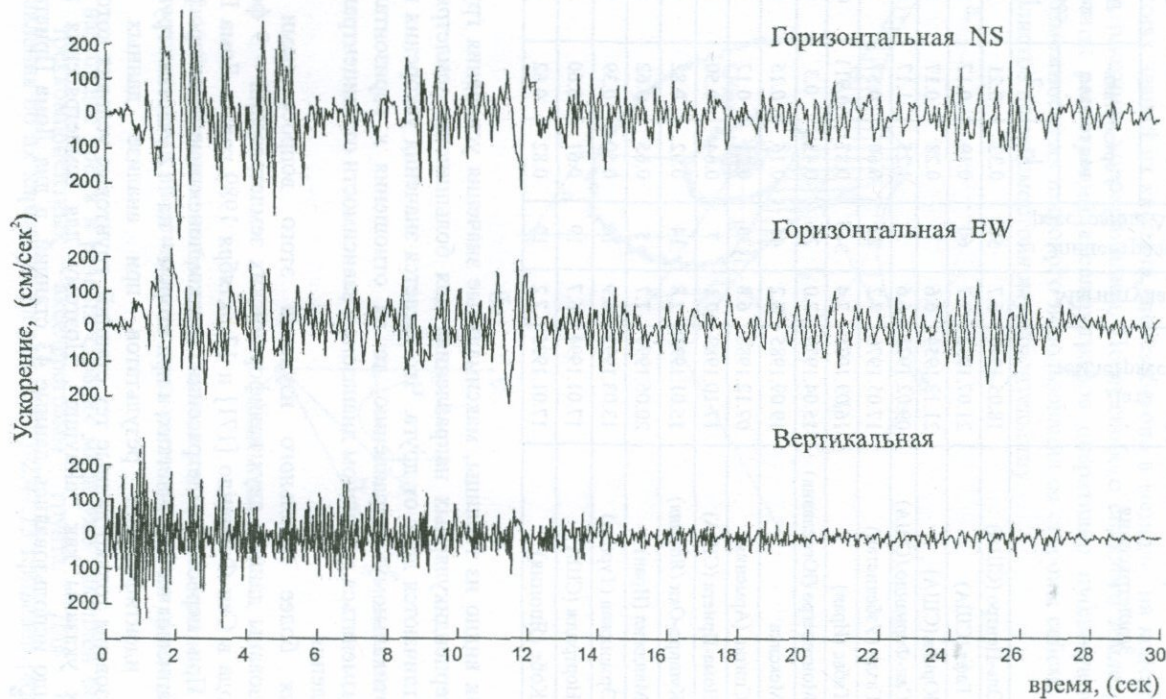


Рис. 2.47.1. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения в Эль-Центро 18 мая 1940 года [199].

TAFT 1952 JUL 21

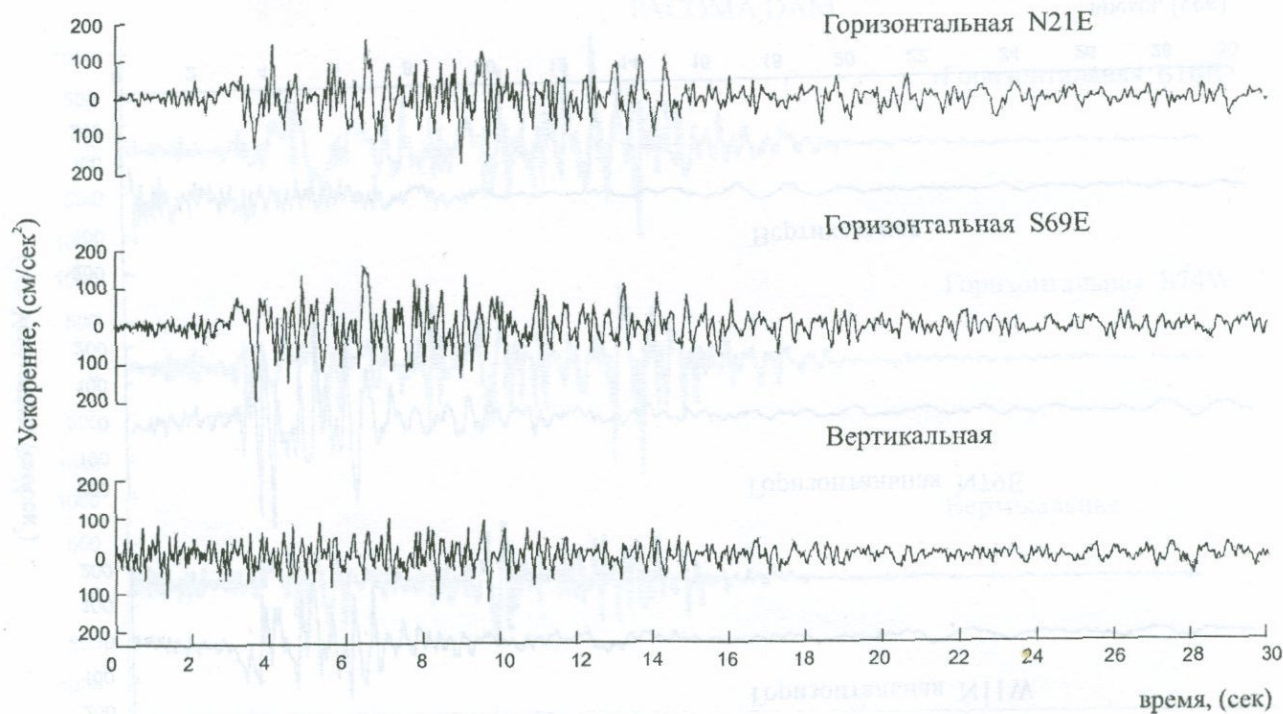


Рис. 2.47.2. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения в Тафте 21 июля 1952 года [199].



EUREKA 1954 DEC 21

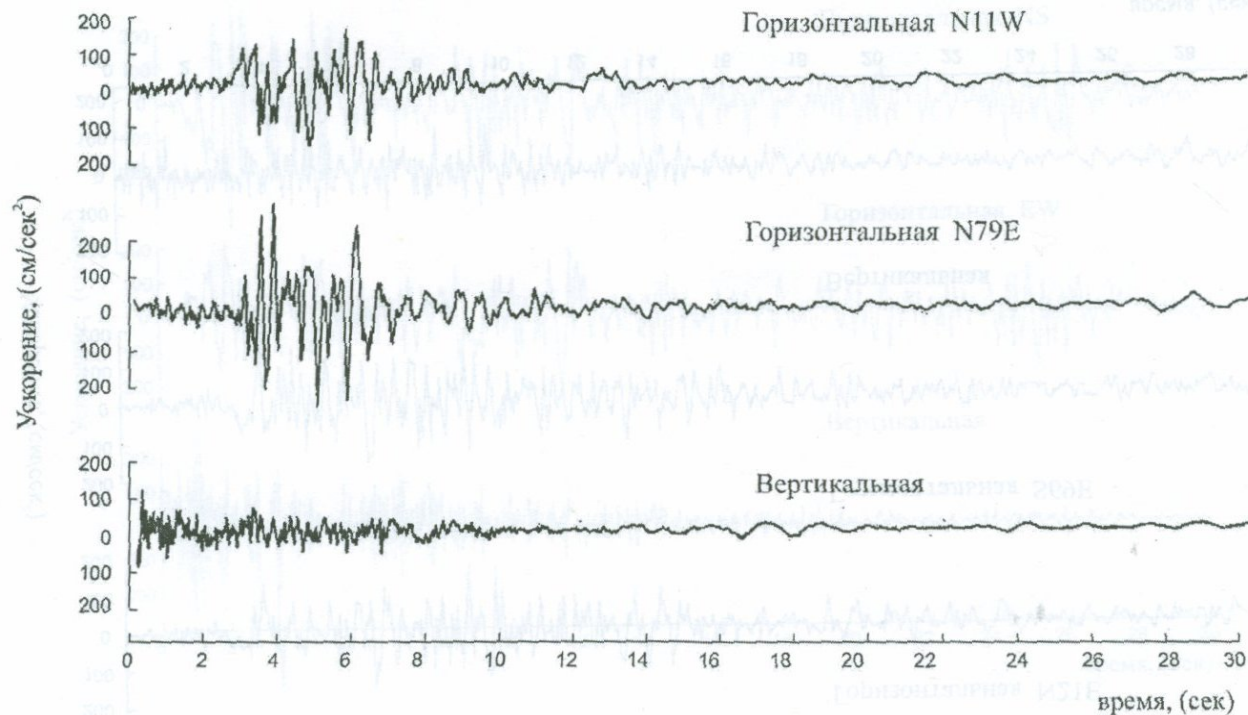


Рис. 2.47.3. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения в Юрике 21 декабря 1954 года [199].

SAN - FERNANDO 1971 FEB 9  
PACOMA DAM

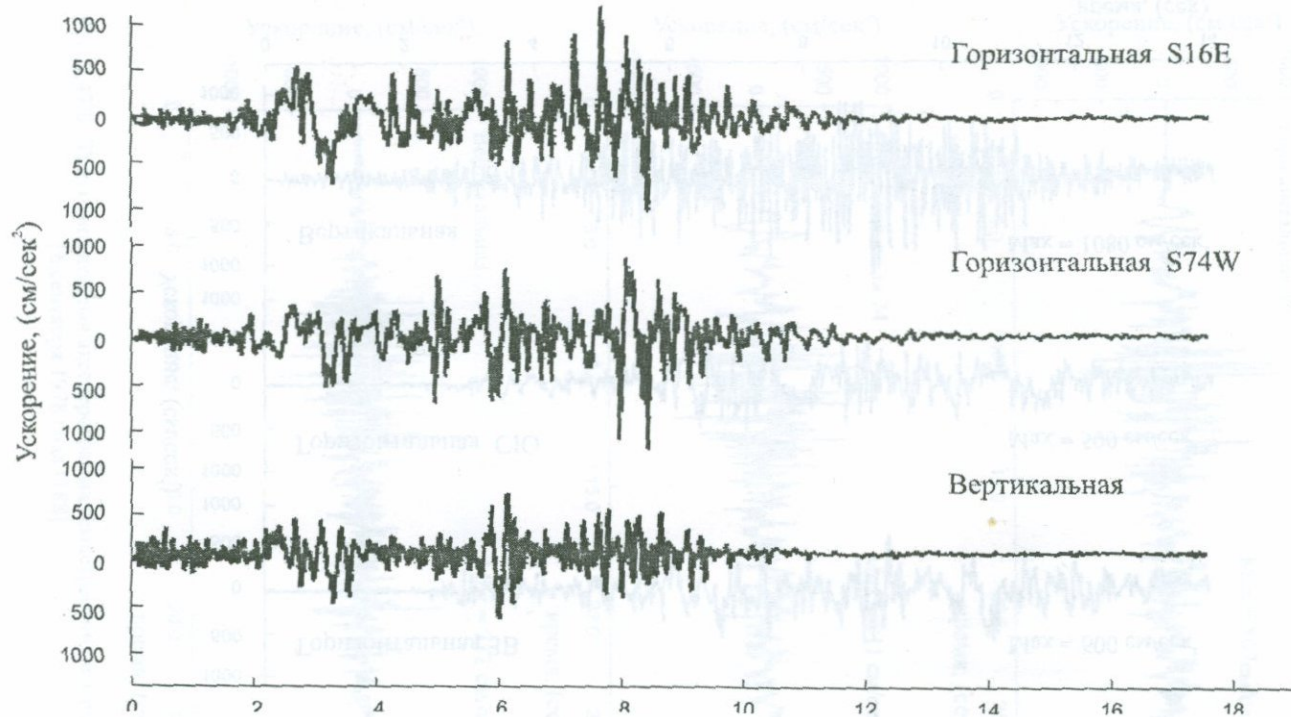


Рис. 2.47.4. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения в Сан-Фернандо 9 февраля 1971 года [171, 200].



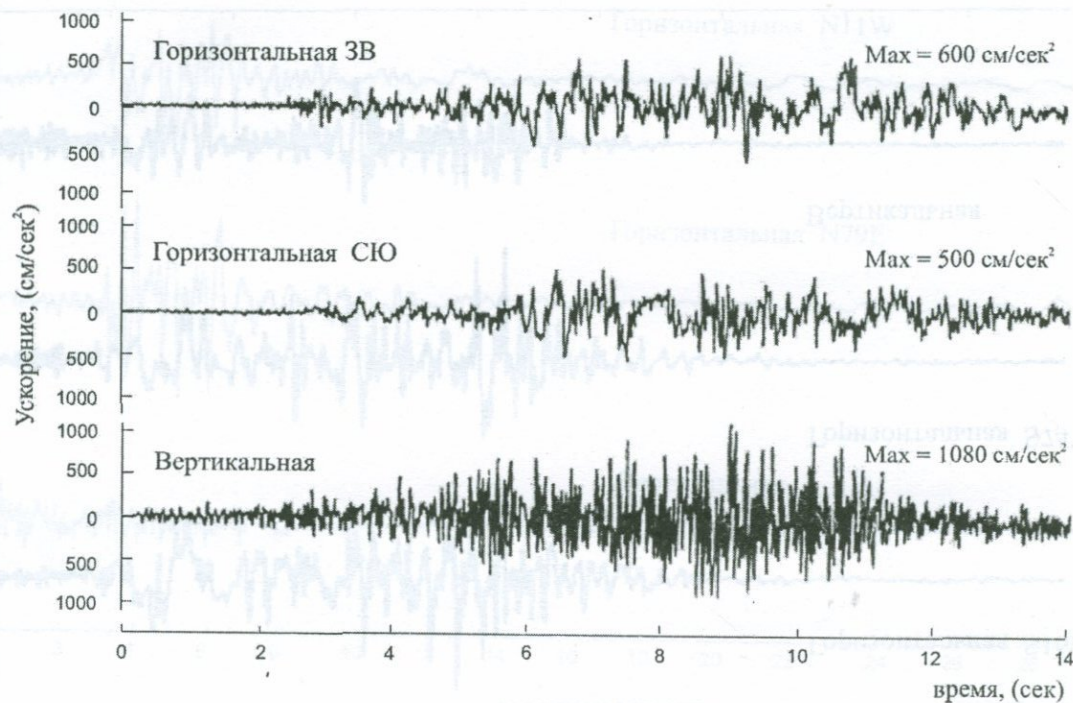


Рис. 2.47.5. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения в Газли 17 мая 1976 года [60, 188].

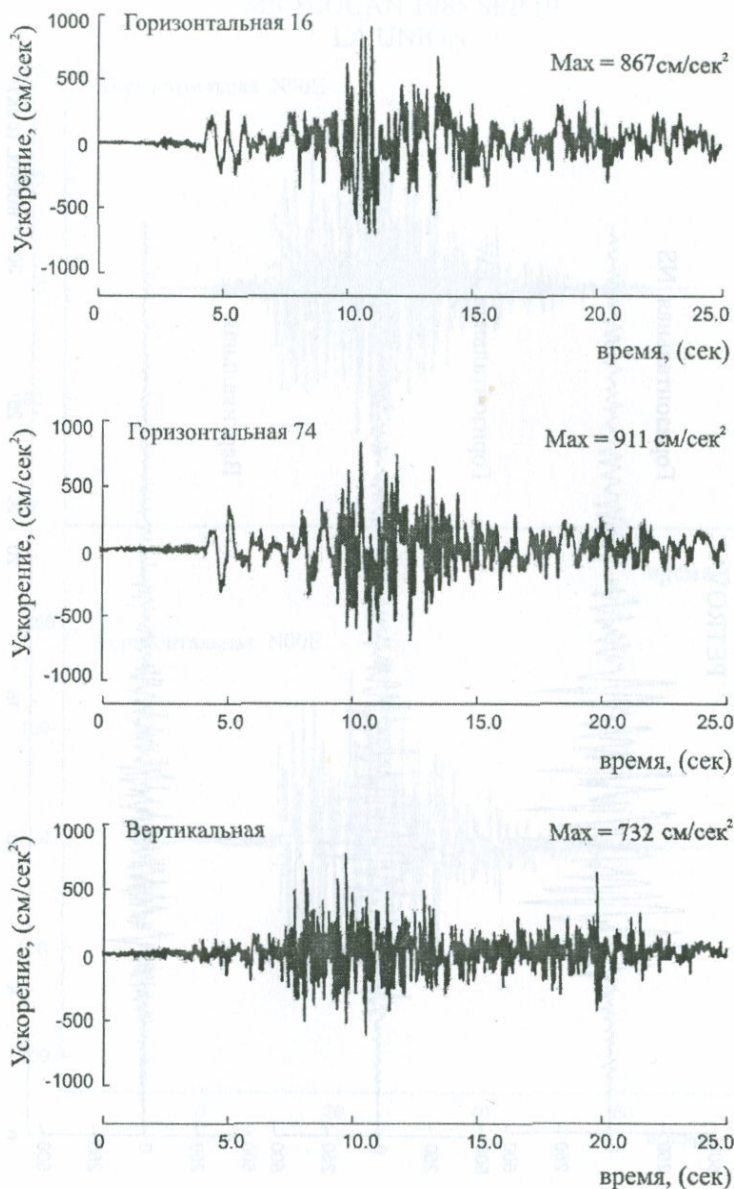
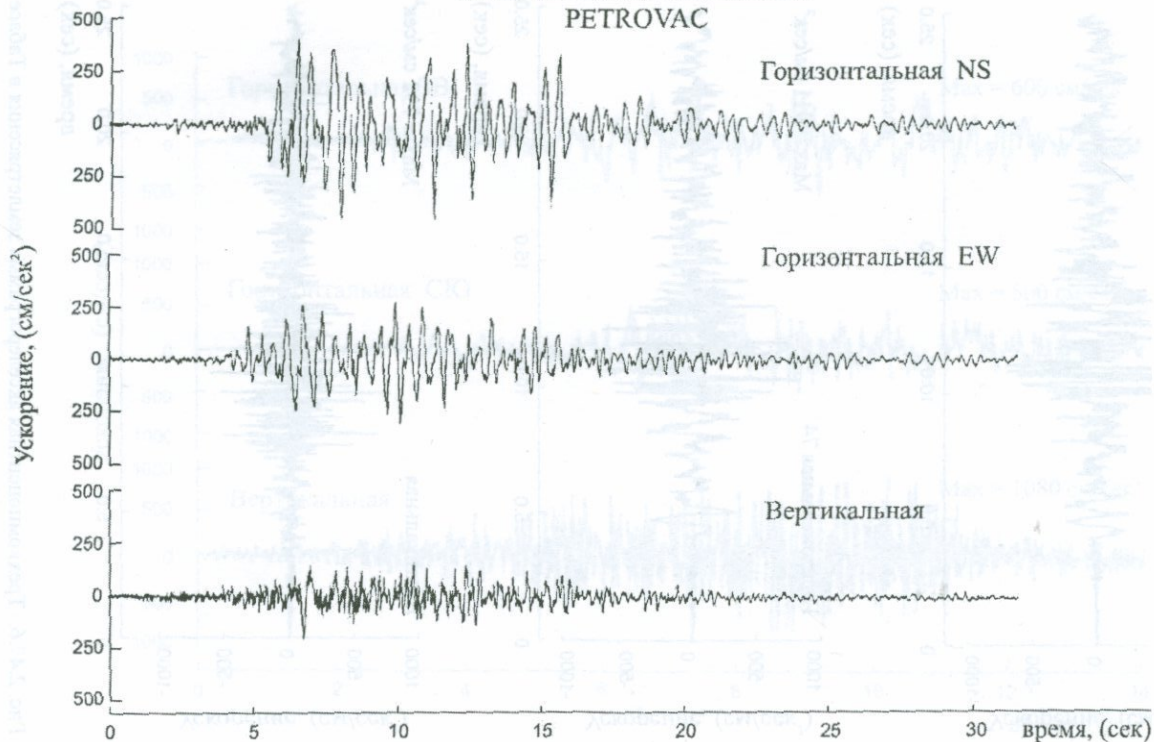


Рис. 2.47.6. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения в Табасе 16 сентября 1978 года [188].



MONTENEGRO 1979 APR 15  
PETROVAC



MICHIOCAN 1985 SEP 19  
LA UNION

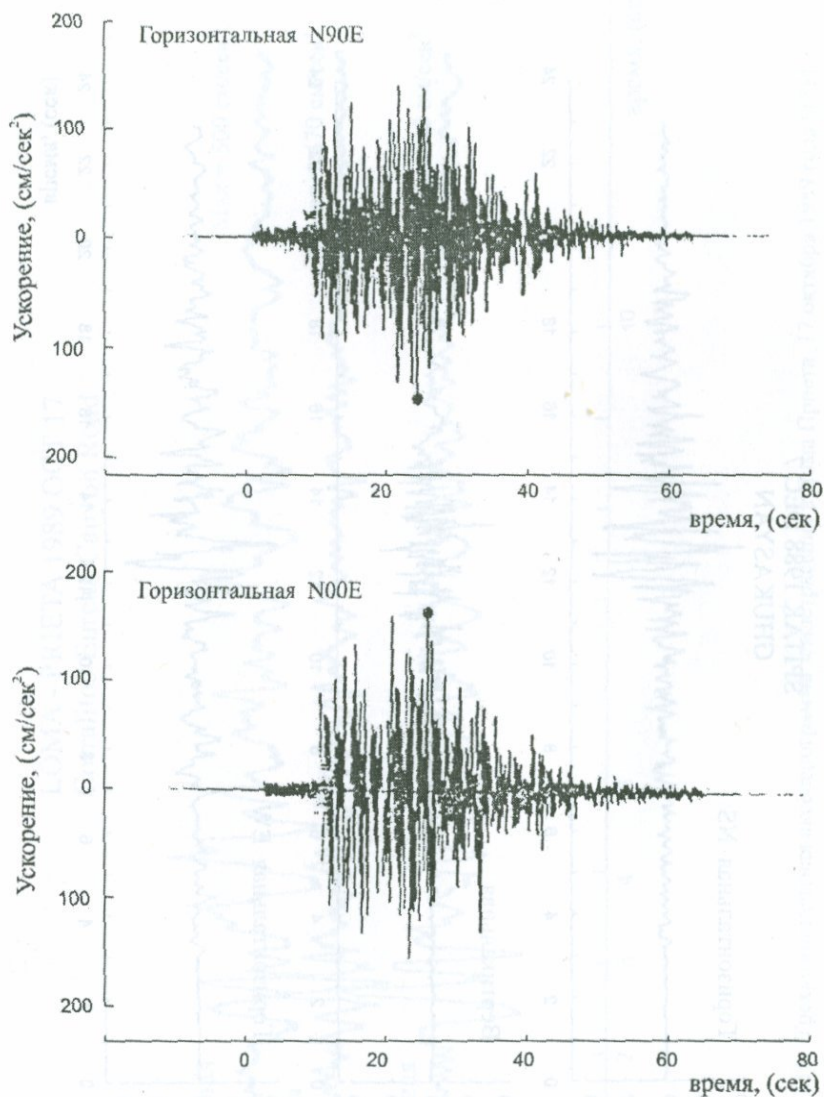
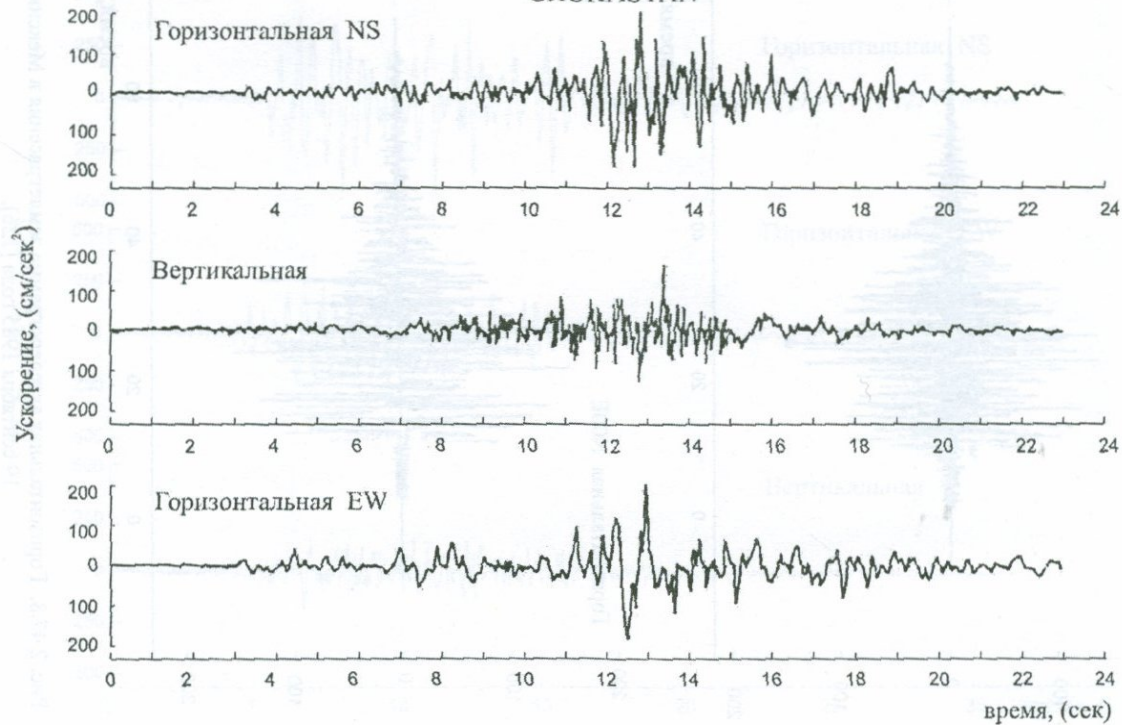


Рис. 2.47.8. Горизонтальная акселерограмма землетрясения в Мексике 19 сентября 1985 года [126].



SPITAK 1988 DEC 7  
GHUKASYAN

LOMA - PRIETA 1989 OCT 17  
Corralitos-Eureka Canyon Road

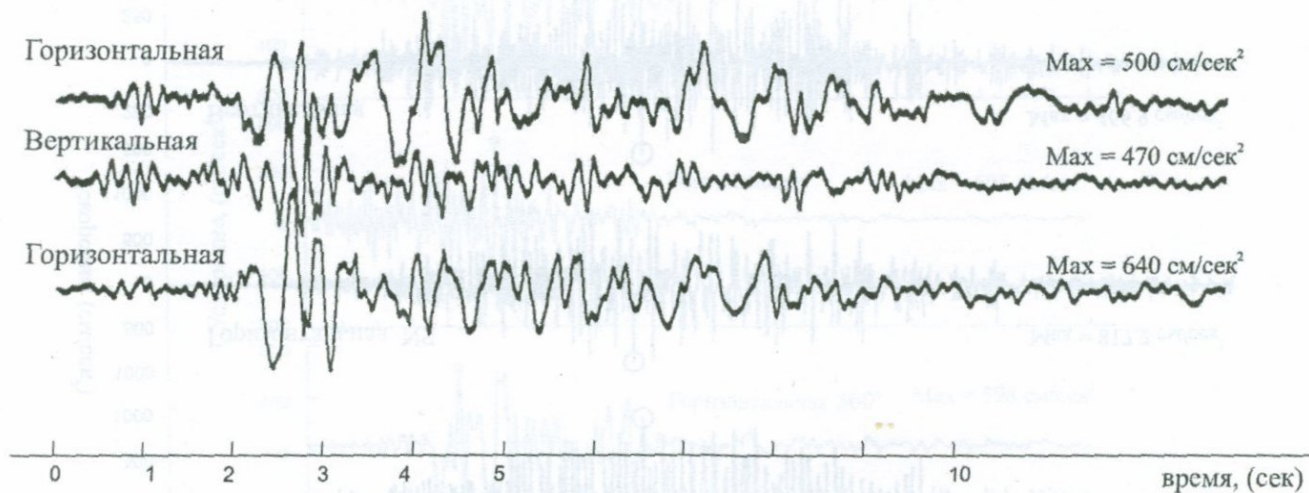


Рис. 2.47.10. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения в Лома Приета 17 октября 1989 года [128].



## KUSHIRO - OKI 1993 JAN 15

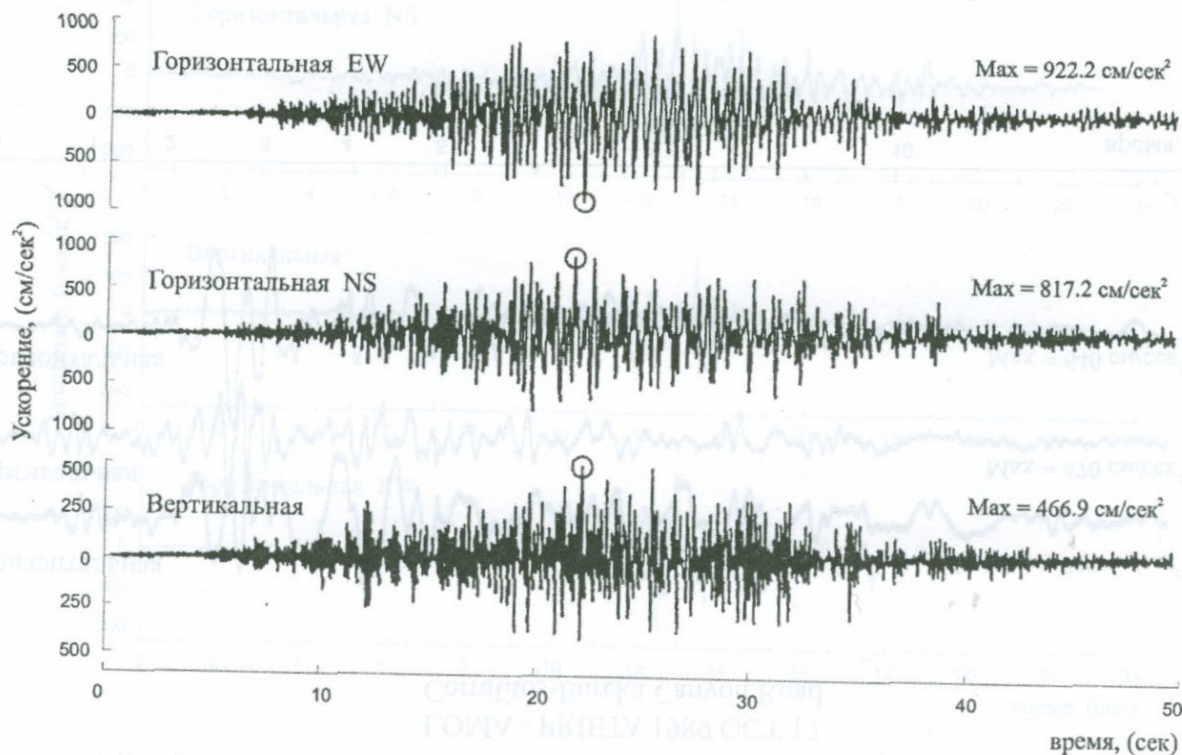


Рис. 2.47.11. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения в Куширо-Оки 15 января 1993 года [175].

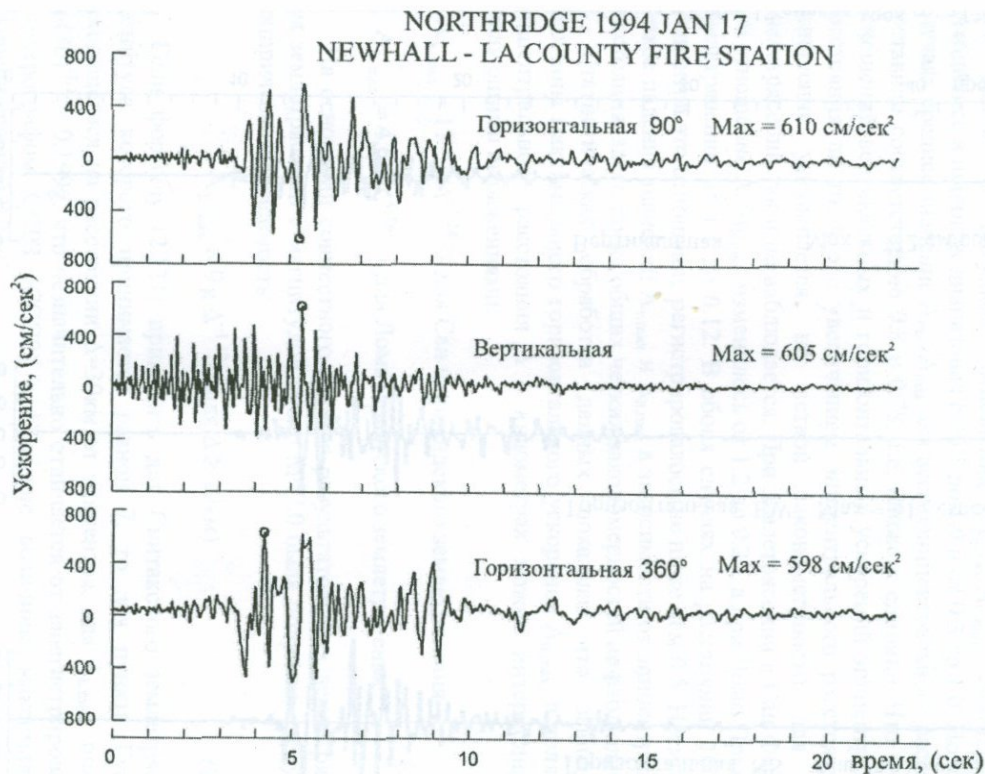


Рис. 2.47.12. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения в Нортридже 17 января 1994 года [194].



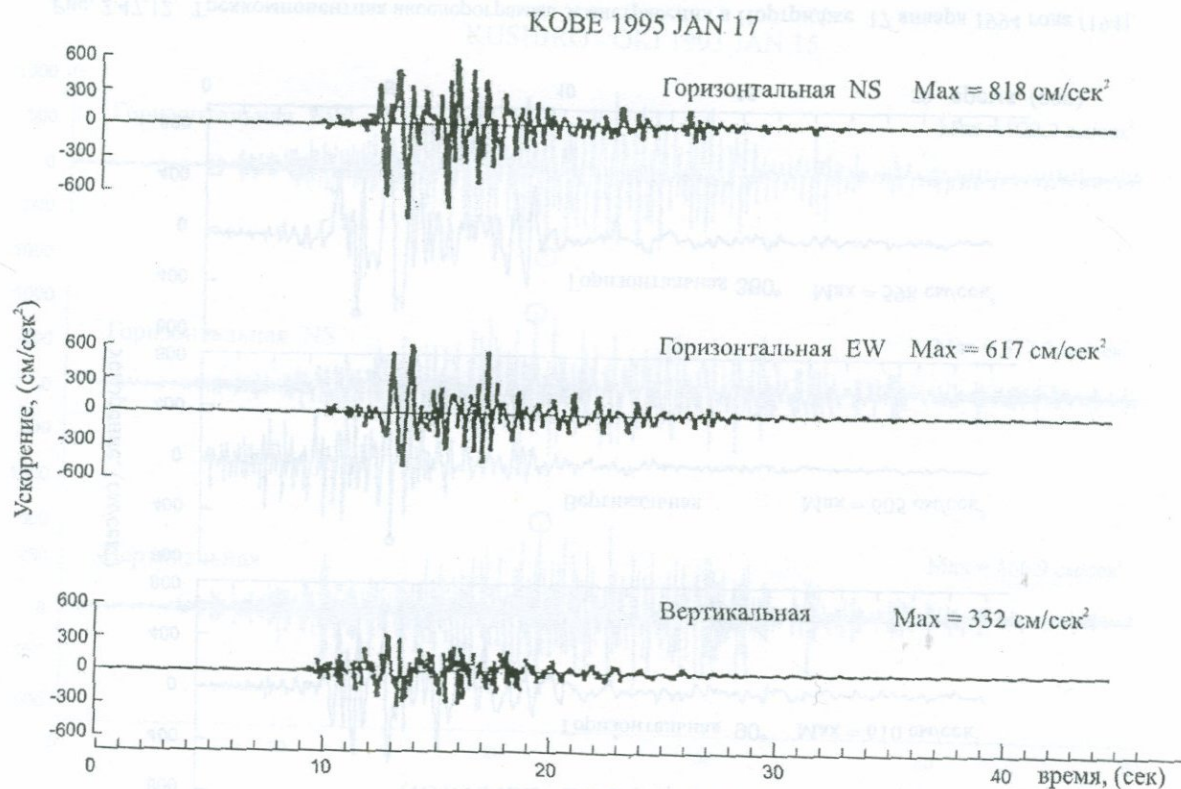


Рис. 2.47.13. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения в Кобе 17 января 1995 года [209].

На рисунках 2.48 и 2.49 построены зависимости максимального значения горизонтального ускорения  $A_{h,max}$  (независимо от компонента), отношения ускорения по двум горизонтальным направлениям  $A_{h,max}/A_{h,min}$  и отношения максимального вертикального ускорения  $A_{v,max}$  к максимальному горизонтальному  $A_{h,max}$  от эпицентрального расстояния  $\Delta$ . Как видно из рисунков, отношения  $A_{h,max}/A_{h,min}$  соответственно находились в широких диапазонах от 0.5 до 1.0 и от 0.3 до 1.0. Но в обоих случаях среднее значение  $A_{min}/A_{max}$  для всего эпицентрального расстояния составили соответственно 0.8 и 0.78, т.е. ближе к единице. Что касается отношений вертикальных и горизонтальных ускорений эпицентрального расстояния на то, что с увеличением эпицентрального расстояния это отношение уменьшается, но четкой закономерности для обоих землетрясений так и не наблюдается. При землетрясении в Сан Фернандо это отношение  $A_v/A_{h,max}$  изменилось от 1.2 до 0.25, а при Ломо Приетском землетрясении от 1.1 до 0.12. В обоих случаях на расстоянии 100км от эпицентра это отношение регистрировалось не ниже чем 0.5. Несмотря на резкое падение значений  $A_{v,max}$  и  $A_{h,max}$  в зависимости от эпицентрального расстояния, здесь также общих четких закономерностей не наблюдается.

Статистическая обработка данных показала, что зависимость величины максимального горизонтального ускорения  $A_{h,max}$  в долях  $g$  от эпицентрального расстояния  $\Delta$  в километрах можно интерполировать следующими выражениями:

$$\begin{aligned} A_{h,max} &= 11.5g \Delta^{-1.24} \quad \text{для Сан Фернандского землетрясения} \\ A_{h,max} &= 4.6g \Delta^{-0.86} \quad \text{для Ломо Приетского землетрясения} \end{aligned} \quad (2.120)$$

На основании совместного анализа результатов двух землетрясений для землетрясений с магнитудой около  $M=7.0$  была получена следующая эмпирическая зависимость:

$$A_{h,max} = 9g \Delta^{-1.12} \quad (\text{для } \Delta \geq 10\text{км}) \quad (2.121)$$

Если формулу (2.121) применить для Спитакского землетрясения, магнитуда которого принимается равной 7, то для пункта Гукасян, находящегося на расстоянии  $\Delta=30\text{км}$  от эпицентра, для  $A_{h,max}$  получим  $9g(30)^{-1.12} = 0.199g$ , что незначительно отличается от зарегистрированной акселерографом ССРЗ (СССР) в Гукасяне величины максимального ускорения равной 0.21g.



San-Fernando 9.02.1971, M=6,6  
(43 регистраций)

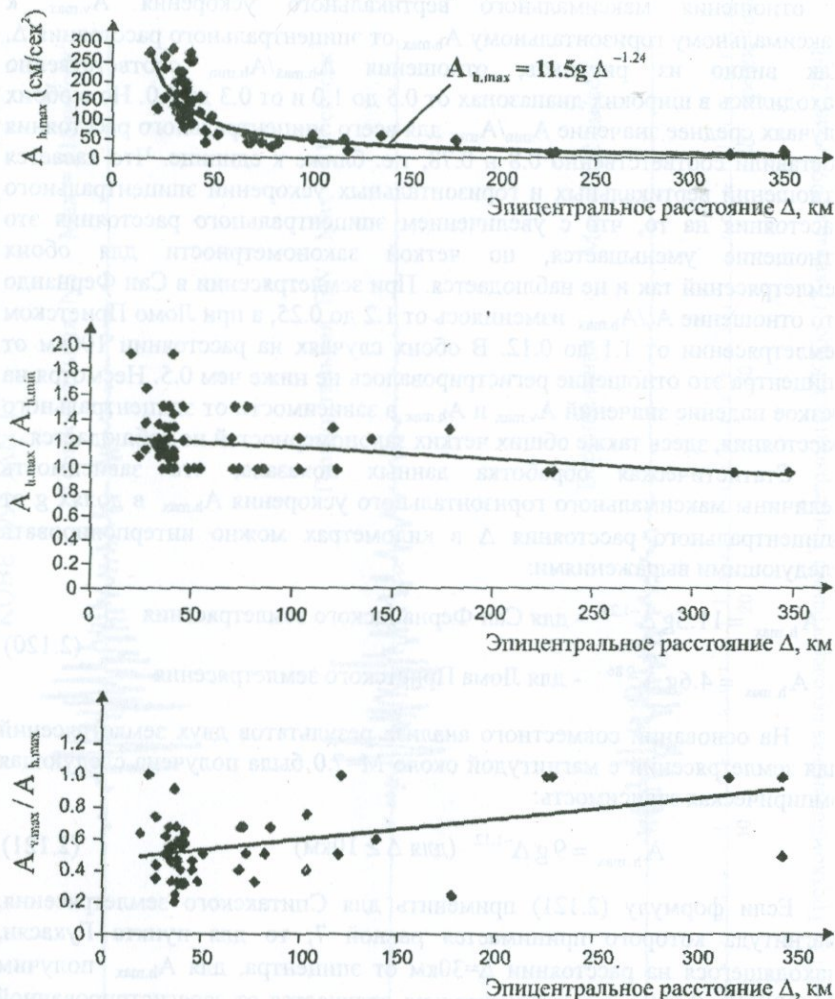


Рис. 2.48. Зависимости максимального ускорения, отношения максимальных ускорений двух горизонтальных компонентов и отношения максимальных вертикальных и горизонтальных ускорений грунта от эпицентрального расстояния по записям землетрясения в Сан-Фернандо.

Loma Prieta 10.10.1989, M=7,1  
(39 регистраций)

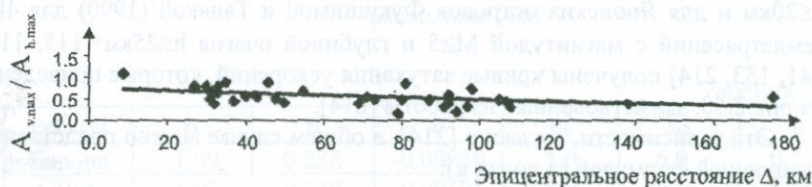
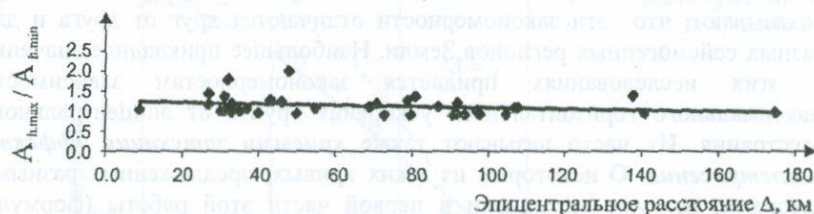
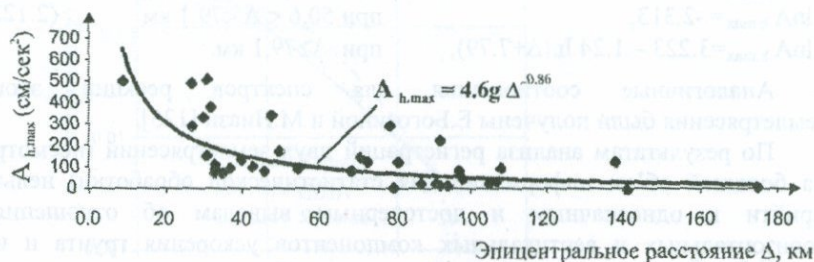


Рис. 2.49. Зависимости максимального ускорения, отношения максимальных ускорений двух горизонтальных компонентов и отношения максимальных вертикальных и горизонтальных ускорений грунта от эпицентрального расстояния по записям землетрясения в Лома Приета.

Для города Еревана ( $\Delta=90$ км) по формуле (2.121) получим  $A_{h,max}=0.058g$ ; зарегистрированная  $A_{h,max}=0.06g$ . Л.У.Кампбелл [127] для Лома Приетского землетрясения получил следующие логарифмические



зависимости (в долях  $g$ ) для максимального значения горизонтального ускорения  $A_{h,max}$

$$\begin{aligned} \ln A_{h,max} &= 1.876 - 1.03 \ln(\Delta + 7.79), & \text{при } \Delta \leq 50.6 \text{ км} \\ \ln A_{h,max} &= -2.313, & \text{при } 50.6 < \Delta < 79.1 \text{ км} \\ \ln A_{h,max} &= 3.223 - 1.24 \ln(\Delta + 7.79), & \text{при } \Delta \geq 79.1 \text{ км.} \end{aligned} \quad (2.122)$$

Аналогичные соотношения для спектров реакции этого землетрясения были получены Е.Богозиной и М.Ниази [125].

По результатам анализа регистраций двух землетрясений (несмотря на большой объем информации для статистической обработки) нельзя прийти к однозначным и достоверным выводам об отношениях горизонтальных и вертикальных компонентов ускорения грунта и их зависимости от эпицентрального расстояния. Здесь немаловажную роль играют такие факторы, как геологические условия и рельеф места регистрации, расположение регистрирующего инструмента относительно эпицентра и плоскости вспарывания, глубина очага и магнитуда землетрясения и др. Исследования ведущих сейсмологов мира показывают, что эти закономерности отличаются друг от друга и для разных сейсмогенных регионов Земли. Наибольшее прикладное значение в этих исследованиях придается закономерностям зависимости максимального горизонтального ускорения грунта от эпицентрального расстояния. Их часто называют также *кривыми затухания эффекта землетрясения*. О некоторых из таких кривых, предложенных разными авторами, мы уже упоминали в первой части этой работы (формулы (1.134)-(1.136)). Для Европейского континента Амбрасейсом и Боммером (1991) для 529 землетрясений с магнитудой  $M \geq 4$  и глубиной очагов  $h \leq 25$  км, для западных районов Американского континента Джойнером и Буром (1981) для 182 землетрясений с магнитудой  $M \geq 5$  и глубиной очагов  $h \leq 20$  км и для Японских островов Фукишимой и Танакой (1990) для 486 землетрясений с магнитудой  $M \geq 5$  и глубиной очагов  $h \leq 25$  км [115, 116, 141, 153, 214] получены кривые затухания ускорений, которые приведены на рис.2.50, заимствованные из работы [214].

Эти зависимости, согласно [214], в общем случае можно представить следующей формулой (в долях  $g$ ):

$$\lg A_{h,max} = \alpha + \beta M - n_0 \lg \Delta' + b \Delta' + \sigma P, \quad (2.123)$$

где  $\Delta' = \sqrt{\Delta^2 + h_0^2}$ , а значения  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $n_0$ ,  $b$ ,  $h_0$  и  $\sigma$  соответственно для территорий Европы, Америки и Японии приведены в табл. 2.17.

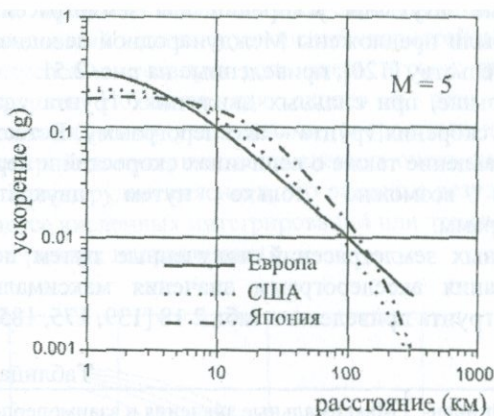


Рис. 2.50.

Кривые затухания ускорений по зарегистрированным землетрясениям с магнитудой  $M=5$  и  $M=7$  [214].

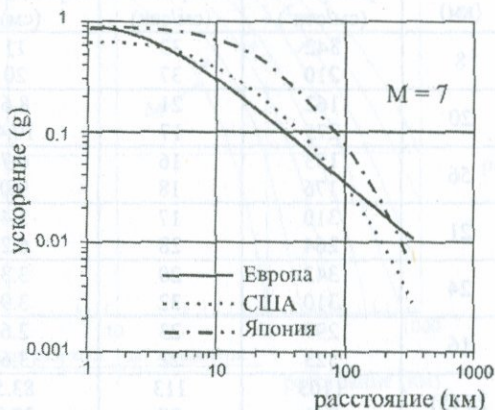


Таблица 2.17

| Регион | $\alpha$ | $\beta$ | $b$      | $n_0$ | $h_0$ | $\sigma$ |
|--------|----------|---------|----------|-------|-------|----------|
| Европа | -1.09    | 0.238   | -0.00050 | 1.0   | 6.0   | 0.278    |
| США    | -1.03    | 0.248   | -0.00196 | 1.0   | 6.6   | 0.249    |
| Япония | 1.91     | 0.283   | -0.00183 | 1.0   | 0.0   | 0.313    |

В табл. 2.17 через  $\sigma$  обозначен стандарт функции  $\lg A_{\max}$ ,  $P$  – постоянная, которая принимается равной 0 при 50%-ной обеспеченности и равной 1 при 84%-ной обеспеченности. Если формулу (2.123) для Европы применить для вычисления величины ускорения для станции Гукасян при Спитакском землетрясении 1988 года, принимая:  $M=6.8$ ,  $\Delta=30\text{ км}$ ,  $P=1$ , получим  $A_{h,\max}=0.209\text{ g}$ , которая очень близка к зарегистрированной величине (0.21g) ускорения во время землетрясения.



Более упрощенные кривые затухания ускорений для землетрясений с магнитудами 5, 6, 7 и 8 были предложены Международной ассоциацией по сейсмостойкому строительству [120], приведенные на рис. 2.51.

Как было отмечено выше, при сильных движениях грунта удается зарегистрировать только ускорения грунта – акселерограмму. Естественное желание иметь представление также о величинах скоростей и перемещений частиц грунта возможно только путем двукратного интегрирования акселерограмм.

Для некоторых сильных землетрясений полученные путем последовательного интегрирования акселерограмм значения максимальных скоростей и перемещений грунта приведены в табл.2.18 [139, 175, 185].

Таблица 2.18

| Землетрясения          | Магнитуда, М | Эпицентр-<br>альное<br>расстояние<br>(км) | Максимальные значения в взаимоперпендикулярных горизонтальных направлениях |                       |                     |
|------------------------|--------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|
|                        |              |                                           | ускорений<br>(см/сек <sup>2</sup> )                                        | скоростей<br>(см/сек) | перемещений<br>(см) |
| Эль-Центро,<br>1940    | 6.6          | 8                                         | 342                                                                        | 33                    | 11                  |
|                        |              |                                           | 210                                                                        | 37                    | 20                  |
| Олимпия,<br>1949       | 7.1          | 20                                        | 162                                                                        | 21                    | 8.6                 |
|                        |              |                                           | 275                                                                        | 17                    | 10.4                |
| Тафт,<br>1952          | 7.6          | 56                                        | 153                                                                        | 16                    | 6.7                 |
|                        |              |                                           | 176                                                                        | 18                    | 9.0                 |
| Сан-Фернандо,<br>1971  | 6.6          | 21                                        | 310                                                                        | 17                    | 3.4                 |
|                        |              |                                           | 264                                                                        | 28                    | 6.2                 |
| Толмеззо,<br>1976      | 6.3          | 24                                        | 342                                                                        | 20                    | 3.3                 |
|                        |              |                                           | 310                                                                        | 32                    | 3.9                 |
| Форгария,<br>1976      | 5.9          | 16                                        | 299                                                                        | 23                    | 2.6                 |
|                        |              |                                           | 323                                                                        | 22                    | 3.6                 |
| Табас,<br>1978         | 7.3          | 25 (5)                                    | 1103                                                                       | 113                   | 83.5                |
|                        |              |                                           | 841                                                                        | 97                    | 37.3                |
| Петровак,<br>1979      | 7.0          | 29                                        | 429                                                                        | 41                    | 8.2                 |
|                        |              |                                           | 299                                                                        | 24                    | 3.2                 |
| Герцегнови,<br>1979    | 7.0          | 65                                        | 209                                                                        | 15                    | 2.6                 |
|                        |              |                                           | 226                                                                        | 11                    | 2.6                 |
| Баня Лука,<br>1981     | 5.4          | 2                                         | 506                                                                        | 24                    | 4.4                 |
|                        |              |                                           | 387                                                                        | 8                     | 1.2                 |
| Мехико, SCT<br>1985    | 8.1          | 400                                       | 98                                                                         | 39                    | 19                  |
|                        |              |                                           | 168                                                                        | 61                    | 22                  |
| Мехико, Univ<br>1985   | 8.1          | 400                                       | 32                                                                         | 10                    | 6.2                 |
|                        |              |                                           | 35                                                                         | 9                     | 7.7                 |
| Куширо-Оки,<br>1993    | 7.8          | 14                                        | 922                                                                        | 60                    | 5.9                 |
|                        |              |                                           | 817                                                                        | 67                    | 9.3                 |
| Ереван<br>(Спитак1988) | 6.8          | 100                                       | 61                                                                         | 3.01                  | 0.9                 |

Как видно из таблицы, нет определенной закономерности между максимальными величина ускорений скоростей и перемещений грунта.

Безусловно, главную роль здесь играют грунтовые условия места регистрации. Но даже для одного и того же места регистрации соотношения между ускорениями, скоростями и перемещениями в двух взаимоперпендикулярных направлениях очень сильно отличаются друг от друга. Здесь трудно выяснить, это различие результат накопления ошибок в процессе численных интегрирований или это связано с анизотропностью среды в разных направлениях.

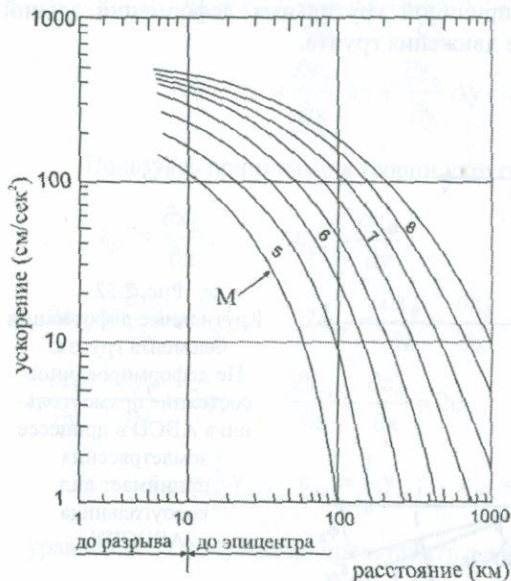


Рис. 2.51.  
Обобщенные кривые  
затухания ускорений  
для землетрясений  
различной магнитуды [120].

На все эти вопросы достоверные ответы можно получить только при организации одновременной инструментальной регистрации всех трех кинематических параметров — перемещений, скоростей и ускорений частиц грунта одной и той же местности во время одного и того же сильного землетрясения.

## 2.16. ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТА

Теперь остановимся на вращательных движениях грунтов. Любой кубик из пород грунта во время землетрясения подвергается как горизонтальным, так и крутильным деформациям. В общем случае движение грунта во время землетрясения должно состоять из 6 компонентов: из коих три компонента вместе будут составлять главный



вектор движения, а другие три компонента – главный момент движения. Как отметили выше, за последние десятилетия накоплен большой объем данных о поступательных движениях грунтов во время сильных землетрясений. С одной стороны, последствия сильных землетрясений свидетельствуют о том, что как в самом грунте, так и в наземных зданиях и сооружениях возникают вращательные движения и крутильные деформации. Причем крутильные деформации возникают не только в протяженных зданиях и сооружениях с несимметричными распределениями масс и жесткостей, но и в зданиях с небольшими размерами в плане и полным симметричным распределением масс и жесткостей. Следовательно, причиной крутильных деформаций зданий являются также вращательные движения грунта.

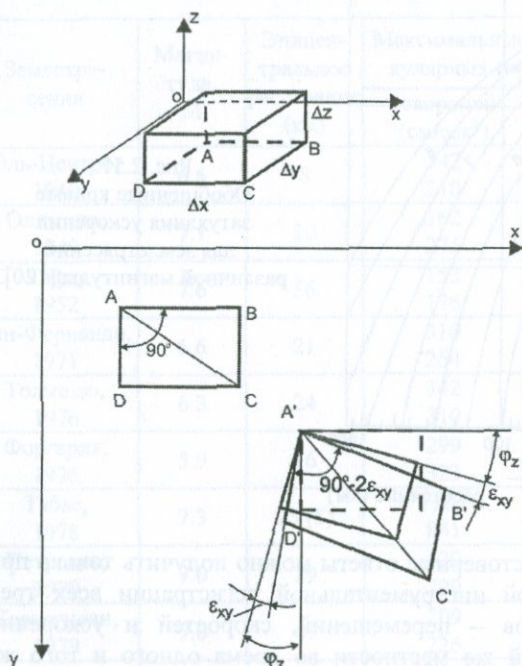


Рис. 2.52.  
Крутильные деформации  
элемента грунта.  
Не деформированное  
состояние прямоуголь-  
ника ABCD в процессе  
землетрясения  
принимает вид  
косоугольника  
A'B'C'D'.

Для регистрации вращательных движений грунта еще не созданы надежные инструменты, поэтому реальные регистрации таких движений во время реальных землетрясений пока отсутствуют. Их можно получить косвенным путем, исходя из основных уравнений теории упругости, используя реальные записи движения грунта по двум взаимоперпендикулярным направлениям. Для этого рассмотрим пространственное напряженно-деформированное состояние элементарного тела (грунта) упругой среды, как это показано на рис.2.52 [95].

Принимаем, что плоскость  $oxy$  совпадает с плоскостью поверхности Земли. Если перемещения точки  $A$  элементарного тела в процессе деформации обозначить через  $x_0, y_0, z_0$ , то соответствующие перемещения  $x'_0, y'_0$  и  $z'_0$  в новом ее положении  $A'$  можно будет представить следующим образом [81]:

$$\begin{aligned}x'_0 - x_0 &= \frac{\partial x_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial x_0}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial x_0}{\partial z} \Delta z \\y'_0 - y_0 &= \frac{\partial y_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial y_0}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial y_0}{\partial z} \Delta z \\z'_0 - z_0 &= \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial z_0}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial z_0}{\partial z} \Delta z.\end{aligned}\quad (2.124)$$

Пользуясь принятыми в теории упругости обозначениями:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial x_0}{\partial x}, & \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial y_0}{\partial y}, & \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial z_0}{\partial z}, \\2\varepsilon_{xy} &= \frac{\partial x_0}{\partial y} + \frac{\partial y_0}{\partial x}, & 2\varepsilon_{xz} &= \frac{\partial x_0}{\partial z} + \frac{\partial z_0}{\partial x}, & 2\varepsilon_{yz} &= \frac{\partial y_0}{\partial z} + \frac{\partial z_0}{\partial y}, \\ \frac{\partial z_0}{\partial y} - \frac{\partial y_0}{\partial z} &= 2\varphi_x, & \frac{\partial x_0}{\partial z} - \frac{\partial z_0}{\partial x} &= 2\varphi_y, & \frac{\partial y_0}{\partial x} - \frac{\partial x_0}{\partial y} &= 2\varphi_z, \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \gamma_{xy}, & \varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \gamma_{xz}, & \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \gamma_{yz},\end{aligned}\quad (2.125)$$

уравнения (2.124) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}x'_0 - x_0 &= \varepsilon_{xx} \Delta x + \varepsilon_{xy} \Delta y + \varepsilon_{xz} \Delta z - \varphi_z \Delta y + \varphi_y \Delta z \\y'_0 - y_0 &= \varepsilon_{xy} \Delta x + \varepsilon_{yy} \Delta y + \varepsilon_{yz} \Delta z - \varphi_x \Delta z + \varphi_z \Delta x \\z'_0 - z_0 &= \varepsilon_{xz} \Delta x + \varepsilon_{yz} \Delta y + \varepsilon_{zz} \Delta z - \varphi_y \Delta x + \varphi_x \Delta y.\end{aligned}\quad (2.126)$$

Главная особенность уравнения (2.126) заключается в том, что любые относительные перемещения по осям  $x, y, z$  представляют как сумму (разность) из двух частей: первая составляющая представляет из себя сумму из всех трех поступательных деформаций, а вторая часть – сумму только двух из трех поворотов  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  элементарного тела по осям  $x, y, z$ .

Теперь, принимая, что перемещения  $x_0(t)$  и  $y_0(t)$  обусловлены распространяющимися по осям  $x$  и  $y$  поперечными сейсмическими волнами со скоростью  $v_s$ , их можно представить следующим образом:



$$\begin{aligned}x_0(y, t) &= F_1(y \pm v_s t) \\ y_0(x, t) &= F_2(x \pm v_s t),\end{aligned}\quad (2.127)$$

которые удовлетворяют волновым уравнениям

$$v_s^2 \frac{\partial^2 x_0}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 x_0}{\partial t^2} = 0, \quad v_s^2 \frac{\partial^2 y_0}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 y_0}{\partial t^2} = 0, \quad (2.128)$$

Из (2.127) будем иметь:

$$\begin{aligned}\frac{\partial x_0}{\partial y} &= F_1'(y \pm v_s t), & \frac{\partial y_0}{\partial x} &= F_2'(x \pm v_s t), \\ \frac{\partial x_0}{\partial t} &= \pm v_s F_1'(y \pm v_s t), & \frac{\partial y_0}{\partial t} &= \pm v_s F_2'(x \pm v_s t).\end{aligned}\quad (2.129)$$

Из уравнения (2.129) для поворота  $\varphi_z$  элементарного куба относительно вертикальной оси  $z$  (относительно поверхности Земли), согласно последнему выражению (2.125), получим:

$$\begin{aligned}\varphi_z(t) &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial y_0}{\partial x} - \frac{\partial x_0}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} [F_2'(x \pm v_s t) - F_1'(y \pm v_s t)] = \\ &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{v_s} \frac{\partial y_0}{\partial t} - \frac{1}{v_s} \frac{\partial x_0}{\partial t} \right] = \frac{1}{2v_s} \left[ \frac{\partial y_0}{\partial t} - \frac{\partial x_0}{\partial t} \right].\end{aligned}\quad (2.130)$$

Аналогичным образом для поворотов по другим двум направлениям (перпендикулярно горизонтальным осям  $X$  и  $Y$ ) получим:

$$\varphi_x(t) = \frac{1}{2v_s} \left[ \frac{\partial z_0}{\partial t} - \frac{\partial y_0}{\partial t} \right], \quad \varphi_y(t) = \frac{1}{2v_s} \left[ \frac{\partial x_0}{\partial t} - \frac{\partial z_0}{\partial t} \right]. \quad (2.130a)$$

Как видно из (2.130) и (2.130a), при землетрясении поворотные движения грунта  $\varphi_x(t)$ ,  $\varphi_y(t)$  и  $\varphi_z(t)$  выражаются через выражение скоростей колебания грунта  $x'_0(t)$ ,  $y'_0$  и  $z'_0(t)$  по трем взаимоперпендикулярным направлениям. Следовательно, скорости и ускорения поворотных движений грунта соответственно будут выражаться через поступательные ускорения грунта (акселерограмм) и их первых производных. Таким образом, горизонтальные повороты грунта относительно вертикальной оси на поверхности Земли, их угловые скорости и ускорения через горизонтальные перемещения грунта  $x_0(t)$  и  $y_0(t)$  будут выражаться формулами:

$$\begin{aligned}\varphi_z(t) &= \frac{1}{2v_s} \left[ \frac{\partial y_0}{\partial t} - \frac{\partial x_0}{\partial t} \right], & \varphi'_z(t) &= \frac{1}{2v_s} \left[ \frac{\partial^2 y_0}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 x_0}{\partial t^2} \right], \\ \varphi''_z(t) &= \frac{1}{2v_s} \left[ \frac{\partial^3 y_0}{\partial t^3} - \frac{\partial^3 x_0}{\partial t^3} \right].\end{aligned}\quad (2.131)$$

Учитывая, что обычно две горизонтальные составляющие движения грунта отличаются друг от друга незначительно, Н.Ньюмарк [178] для симметричных зданий еще упростил задачу, представив (2.131) через одну из горизонтальных составляющих:

$$\varphi_z(t) = \frac{1}{v_s} \frac{\partial y_0}{\partial t}, \quad \varphi'_z(t) = \frac{1}{v_s} \frac{\partial^2 y_0}{\partial t^2}, \quad \varphi''_z(t) = \frac{1}{v_s} \frac{\partial^3 y_0}{\partial t^3}. \quad (2.131a)$$

Внимание читателей обращаем на то обстоятельство, что если во всех вышеизложенных формулах принимать, что скорость поперечных волн стремится к бесконечности  $v_s \rightarrow \infty$ , все поворотные эффекты будут стремиться к нулю. Отсюда вытекает важный практический вывод: *вращательные эффекты грунта при землетрясениях существенны только для рыхлых и мягких грунтов, для скальных грунтов их влиянием можно пренебречь.*

В дальнейшем, к решению этой задачи обратились также Кобори, Шипо-Заки, Вонг и Трифунак, Лии и другие [167, 211]. По акселерограммам Монтегройского землетрясения 1979 года, зарегистрированные в Герцогнови и Улцинже [201] (рис.2.53), нами [95] по формулам (2.131) для  $v_s = 300$  м/сек были вычислены изменения во времени поворотов  $\varphi_z(t)$  (в рад.) и их скоростей  $\varphi'_z(t)$  (в рад/сек) и ускорений  $\varphi''_z(t)$  (в рад/сек<sup>2</sup>), которые показаны на рис. 2.54 и 2.55. В.Лии и М.Трифунак [167] получили синтетическую вращательную акселерограмму для местности Вестморелад в долине Империял Валлей. Для этого сначала генерировали синтетическую горизонтальную акселерограмму для многослойной поверхностной толщи большой глубины со скоростью  $v_s = 980$  м/сек верхнего слоя. Эта акселерограмма вместе с полученной на ее основе вращательной сейсмограммой, велисограммой и акселерограммой приведена на рис.2.56 [167].



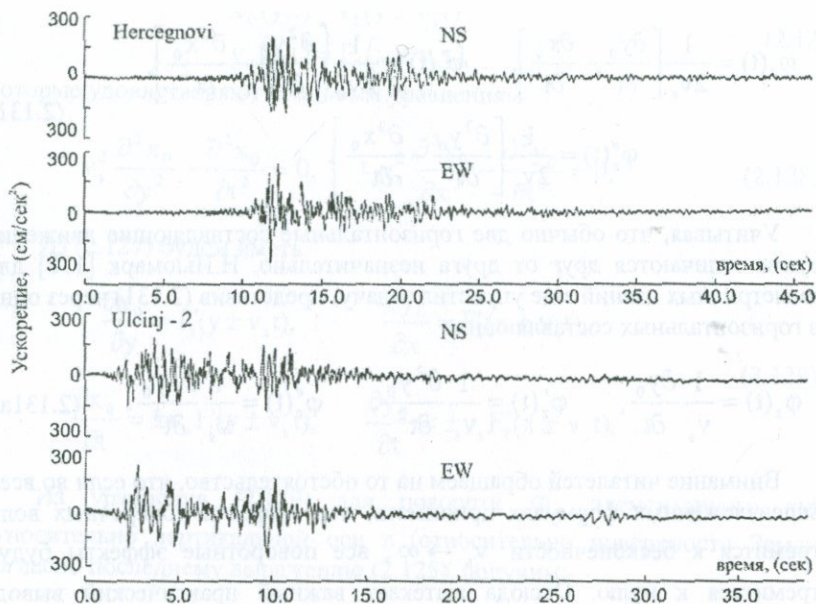


Рис. 2.53. Горизонтальные компоненты ускорения грунта, записанные в станциях Герцегонови и Улцинже во время землетрясения в Монтенегро 15 апреля 1979г. [201].

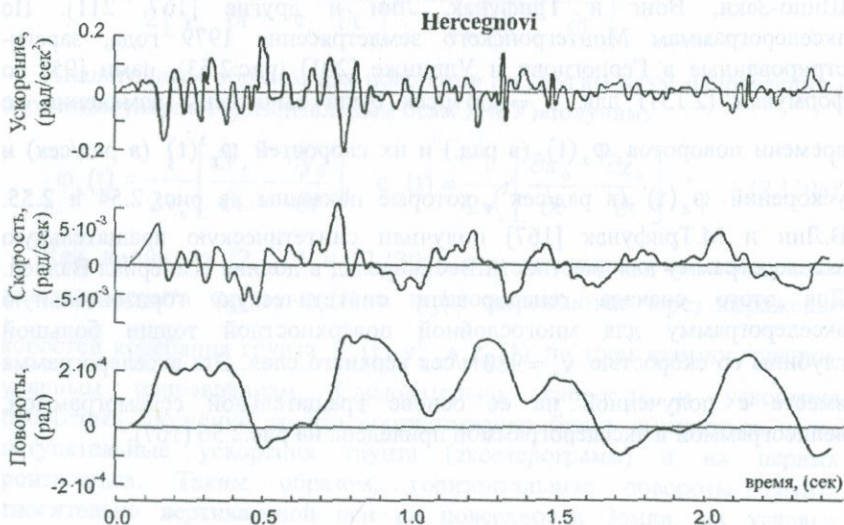


Рис. 2.54. Кинематические параметры вращательных движений грунта, полученные по двум горизонтальным компонентам акселерограмм грунта, записанные на станции Герцегонови (для стадии начальных интенсивных сотрясений грунта) [95].

# Ulcinj-2

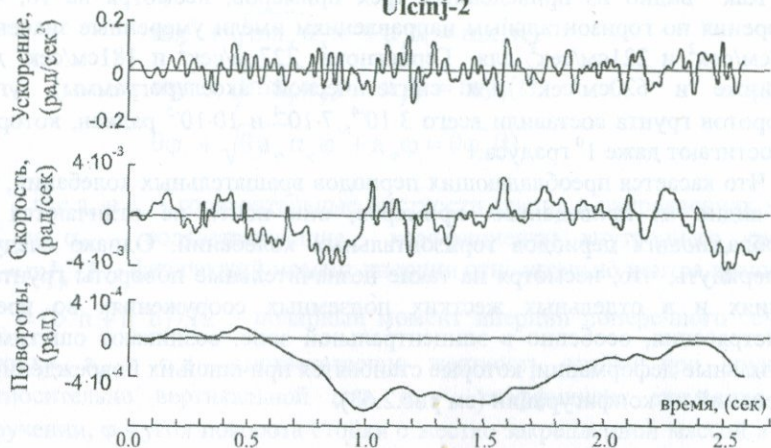


Рис. 2.55. Кинематические параметры вращательных движений грунта, полученные по двум горизонтальным компонентам акселерограмм грунта, записанные на станции Улчинье (для стадии начальных сильных сотрясений грунта) [95].

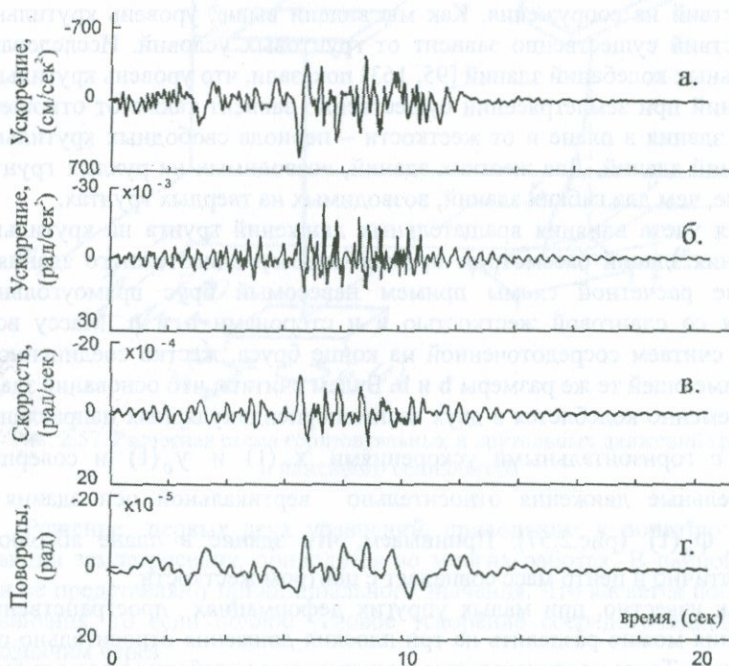


Рис. 2.56. Синтетическая горизонтальная акселерограмма грунта (а) и полученные на ее основе параметры крутильных движений грунта (б, в, г) [167].



Как видно из приведенных трех примеров, несмотря на то, что ускорения по горизонтальным направлениям имели умеренные значения ( $254\text{см/сек}^2$  и  $221\text{см/сек}^2$  для Герцогнови,  $227\text{см/сек}^2$  и  $181\text{см/сек}^2$  для Улцинже и  $620\text{см/сек}^2$  для синтетической акселерограммы), углы поворотов грунта составили всего  $3 \cdot 10^{-4}$ ,  $7 \cdot 10^{-4}$  и  $10 \cdot 10^{-5}$  радиан, которые не достигают даже  $1^\circ$  градуса.

Что касается преобладающих периодов вращательных колебаний, то, как видно из приведенных примеров, они почти не отличаются от преобладающих периодов горизонтальных колебаний. Однако следует подчеркнуть, что, несмотря на такие незначительные повороты грунта в зданиях и в отдельных жестких подземных сооружениях во время землетрясения, особенно в эпицентральной зоне, возникают ощутимые крутильные деформации, которые становятся причиной их повреждений и изменений их конфигурации (см рис.2.63).

**Крутильные колебания простых сооружений.** Анализ крутильных колебаний грунтов и зданий и особенно последствия Спитакского землетрясения, когда некоторые надгробные памятники поворачивались на  $30-40^\circ$  [216], указывают на необходимость корректировки положений норм сейсмостойкого строительства, касающегося крутильных воздействий на сооружения. Как мы видели выше, уровень крутильных воздействий существенно зависит от грунтовых условий. Исследования крутильных колебаний зданий [95, 163] показали, что уровень крутильных колебаний при землетрясении существенно зависит также от отношения сторон здания в плане и от жесткости – периода свободных крутильных колебаний зданий. Для жестких зданий, возводимых на рухлых грунтах, он выше, чем для гибких зданий, возводимых на твердых грунтах.

Для учета влияния вращательных движений грунта на крутильные колебания зданий рассмотрим простой пример одноэтажного здания. В качестве расчетной схемы примем невесомый брус прямоугольного сечения со сдвиговой жесткостью  $a$  и сторонами  $b$  и  $h$ . Массу всего здания считаем сосредоточенной на конце бруса, жестко соединенной с ним и имеющей те же размеры  $b$  и  $h$ . Будем считать, что основание здания одновременно колеблется в двух взаимоперпендикулярных направлениях  $x$  и  $y$  с горизонтальными ускорениями  $x_0''(t)$  и  $y_0''(t)$  и совершает вращательные движения относительно вертикальной оси здания по закону  $\varphi_z''(t)$  (рис.2.57). Принимаем, что здание в плане абсолютно систематично и центр масс совпадает с центром жесткости.

Как известно, при малых упругих деформациях пространственные колебания можно разделить на три плоских движения относительно осей координат. Тогда поступательные и крутильные колебания массы  $m$  будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} + \sqrt{ma_x}\alpha_x\dot{x} + a_x x &= m\ddot{x}_0(t) \\
 m\ddot{y} + \sqrt{ma_y}\alpha_y\dot{y} + a_y y &= m\ddot{y}_0(t) \\
 \theta\ddot{\varphi} + \sqrt{\theta a_\varphi}\alpha_\varphi\dot{\varphi} + a_\varphi\varphi &= \theta\ddot{\varphi}_z(t),
 \end{aligned}
 \tag{2.132}$$

где  $a_x$  и  $a_y$  – горизонтальные жесткости здания в направлениях  $x$  и  $y$ ,  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  – соответствующие коэффициенты внутреннего трения,  $\theta = mJ_p / F$  – физический момент инерции относительно центра вращения,  $J_p = (b^3h + h^3b)/12$  – полярный момент инерции поперечного сечения стойки,  $a_\varphi$  и  $\alpha_\varphi$  – соответственно жесткость стойки при кручении относительно вертикальной оси,  $\alpha_\varphi$  – коэффициент затухания при кручении,  $\varphi$  – угол поворота стойки с жестко закрепленной массой в виде прямоугольника.

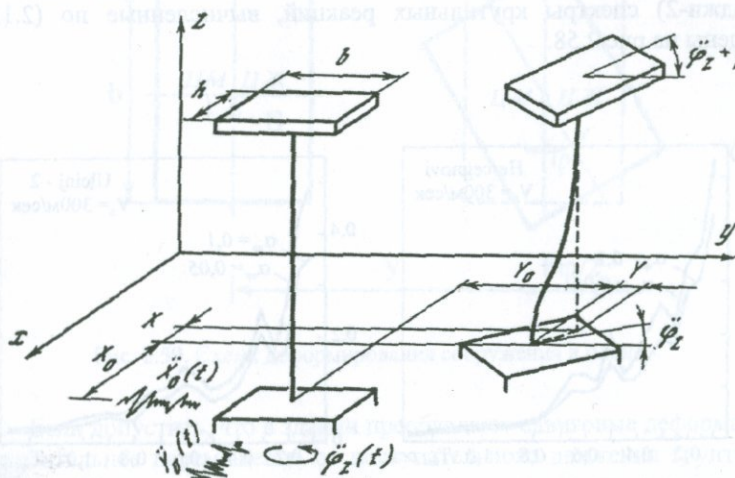


Рис. 2.57. Расчетная схема горизонтальных и крутильных движений грунта и линейного осциллятора.

Решение первых двух уравнений, приводящих к понятию спектра реакции землетрясения, приводится во многих работах. В данной задаче они не представляют принципиального значения. Что касается последнего уравнения, то если полное угловое ускорение сосредоточенной массы обозначим через



$$\varphi''(t) + \varphi_z''(t),$$

то оно будет выражаться формулой

$$\varphi''(t) + \varphi_z''(t) = \frac{2\pi}{T_{кр}} \int_0^t \varphi_z''(\xi) e^{\frac{\alpha_{\varphi} \pi}{T_{кр}}(t-\xi)} \sin \frac{2\pi}{T_{кр}}(t-\tau) d\tau, \quad (2.133)$$

где  $T_{кр} = 2\pi \sqrt{\frac{\theta}{\alpha_{\varphi}}}$  - период свободных крутильных колебаний здания.

По формуле (2.133), по аналогии спектра реакции (горизонтальной) землетрясения можно построить спектры крутильных реакций землетрясения. Для полученных выше крутильных акселерограмм  $\varphi_z''(t)$  (по горизонтальным акселерограммам на станциях Герцегови и Улцинджи-2) спектры крутильных реакций, вычисленные по (2.133), приведены на рис.2.58.

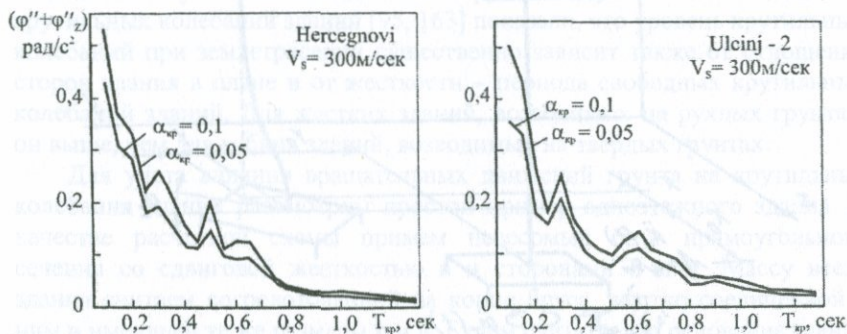


Рис. 2.58. Спектры крутильных реакций линейного осциллятора.

Для упрощения приняты, что  $b/h=1$ , тогда  $T_{кр} = T_{хсд} = T_{усд}$ . Спектры угловых ускорений идентичны таким же спектрам ускорений от поступательных движений грунта, однако пики угловых ускорений смещены вправо и с увеличением периода свободных (крутильных) колебаний они очень быстро уменьшаются. От вращательного движения грунта в зданиях возникают также дополнительные горизонтальные перемещения (рис.2.59).

Например, в горизонтальном направлении  $y$ , от вращательного движения грунта дополнительное перемещение, вызванное кручением, будет:

$$y_{\varphi} = \frac{\varphi b}{2}, \quad (2.134)$$

где  $\varphi$  - угол поворота здания,  $b$  - длина здания.

Дополнительное тангенциальное ускорение точек здания, находящегося на расстоянии  $b/2$  от центра вращения, будет:

$$y_{\varphi}'' = \frac{(\varphi'' + \varphi_z'') b}{2} \quad (2.135)$$

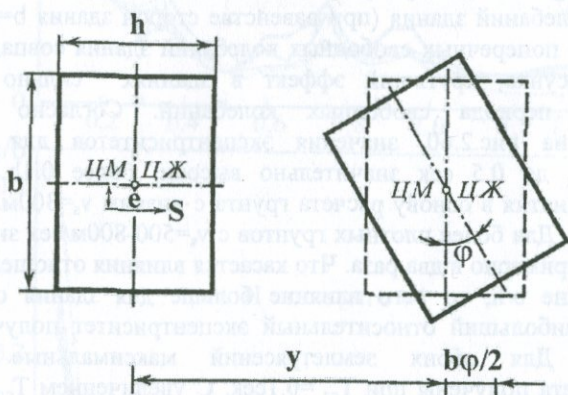


Рис. 2.59. Схема деформирования сооружения в плане.

Если допустить, что в здании преобладают сдвиговые деформации, то относительное перемещение от поступательного движения грунта равно  $y = S/a_{сд}$ ,  $S$  - максимальная сейсмическая нагрузка от поступательного движения,  $a_{сд}$  - поступательная сдвиговая жесткость. При вращательном движении здания крутящий момент будет  $M_{кр} = \varphi a_{\varphi}$ . Крутящий момент  $M_{кр}$  в здании от вращательного движения грунта можно заменить эквивалентным сосредоточенным крутящим моментом от внецентренного приложения горизонтальной сейсмической нагрузки  $S$  на расстоянии  $e$  от центра жесткостей (в плане) следующим образом:

$$M_{кр} = eS = y a_{сд} e = \varphi a_{\varphi}. \quad (2.136)$$



На основании (2.134) получим:

$$y a_{\text{сд}} e = \frac{2y_{\phi} a_{\phi}}{b}. \quad (2.137)$$

Отсюда можно определить значение дополнительного эксцентриситета  $e$ :

$$\frac{e}{b} = \frac{2y_{\phi} a_{\phi}}{b^2 y a_{\text{сд}}}. \quad (2.138)$$

На рис.2.60 показаны спектры относительных крутильных эксцентриситетов  $e/b$  ( $b$  – сторона здания, в перпендикулярном направлении, по которой рассчитывается здание на сейсмостойкость), полученные по крутильным акселерограммам (с  $v_s=300-500\text{м/сек}$ ) для станций Негсегнові и Ulcinj-2 [95] в зависимости от периода поперечных свободных колебаний здания (при равенстве сторон здания  $b=h$  периоды крутильных и поперечных свободных колебаний здания совпадают). Как видно из рисунка, крутящий эффект в зданиях сильно падает с увеличением периода свободных колебаний. Согласно спектрам, показанным на рис.2.60, значения эксцентриситетов для зданий с периодом  $T_{\text{сд}}$  до 0.5 сек значительно высоки: более  $0.1b$ . Это есть результат принятия в основу расчета грунта с низким  $v_s=300\text{м/сек}$  (грунт III категории). Для более плотных грунтов с  $v_s=500-800\text{м/сек}$  значение  $e/b$  уменьшится примерно в два раза. Что касается влияния отношения сторон здания в плане  $b/h$ , то его влияние больше для здания с большим периодом. Наибольший относительный эксцентриситет получается при  $T<0.5\text{сек}$ . Для обоих землетрясений максимальные значения эксцентриситета получены при  $T_{\text{сд}}=0.1\text{сек}$ . С увеличением  $T_{\text{сд}}$  ординаты спектров уменьшаются. После  $T_{\text{сд}}\geq 1$  они остаются почти постоянными. При  $b/h=1$  они больше, чем при других отношениях  $b/h$ .

На основании результатов указанных исследований в нормах Республики Армения учет крутильных колебаний производится следующим образом [75]: значение расчетного крутящего момента  $M_k^{\text{кр}}$  на уровне  $k$ -ого этажа здания определяются по формуле:

$$M_k^{\text{кр}} = P_k(e_k + e), \quad (2.139)$$

где  $P_k$  – значение поперечной силы (сумма всех инерционных сил вышележащих этажей) на уровне  $k$ -ого этажа,  $e_k$  – фактический эксцентриситет между центром масс и центром жесткости  $k$ -ого этажа,  $e$  – дополнительный расчетный эксцентриситет от вращательного движения грунта, принимаемый в зависимости от периода поперечных свободных колебаний основной формы колебания здания  $T_1$  и категории грунта равным:

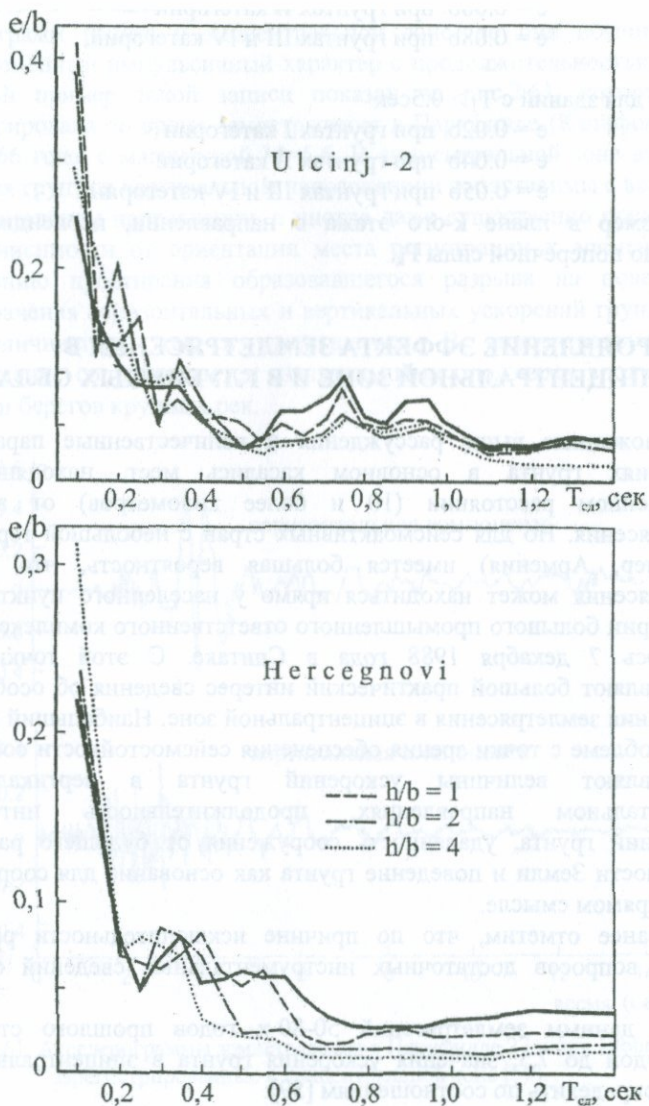


Рис. 2.60. Спектры крутильных эксцентриситетов  $e/b$  линейного осциллятора, построенные по вращательным акселерограммам для станций Герцеговни и Улциндж-2, показанные на рис.2.54 и 2.55.



- для зданий с  $T_1 \leq 0.5 \text{ сек}$ 
  - $e = 0.03b$  при грунтах I категории
  - $e = 0.06b$  при грунтах II категории
  - $e = 0.08b$  при грунтах III и IV категорий,
- для зданий с  $T_1 > 0.5 \text{ сек}$ 
  - $e = 0.02b$  при грунтах I категории
  - $e = 0.04b$  при грунтах II категории
  - $e = 0.05b$  при грунтах III и IV категорий

$b$  – размер в плане  $k$ -ого этажа в направлении, перпендикулярном действию поперечной силы  $P_k$ .

## 2.17. ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЕ И В ГЛУБИННЫХ ОБЛАСТЯХ

Изложенные выше рассуждения и количественные параметры о колебаниях грунта в основном касались мест, находящихся на определенном расстоянии (10 и более километров) от эпицентра землетрясения. Но для сейсмоактивных стран с небольшой территорией (например, Армения) имеется большая вероятность, что эпицентр землетрясения может находиться прямо у населенного пункта или на территории большого промышленного ответственного комплекса, как это случилось 7 декабря 1988 года в Спитаке. С этой точки зрения, представляют большой практический интерес сведения об особенностях проявления землетрясения в эпицентральной зоне. Наибольший интерес в этой проблеме с точки зрения обеспечения сейсмостойкости сооружений представляют величины ускорений грунта в вертикальном и горизонтальном направлениях, продолжительность интенсивных сотрясений грунта, удаленность сооружения от будущего разрыва на поверхности Земли и поведение грунта как основание для сооружения в самом прямом смысле.

Заранее отметим, что по причине исключительности рассматриваемых вопросов достаточных инструментальных сведений о них не имеется.

По данным землетрясений 50-80-х годов прошлого столетия с магнитудой до 7.5, значения ускорения грунта в эпицентральной зоне можно определить по соотношениям [59]:

$$a_{\max} = 12M^2, \quad a_{\min} = 6M^2, \quad (2.140)$$

где  $a_{\max}$  и  $a_{\min}$  – верхняя и нижняя границы ускорения для землетрясений с магнитудой  $M$ . Как было отмечено в первой главе, современные теоретические выкладки о землетрясениях, как следствие мгновенного

разрыва сплошной среды, приводят к выводам, что в эпицентральной зоне максимальное ускорение грунта может достигать величины, равной до  $2g$ , а скорость колебания грунта до  $100\text{см/сек}$ . Что касается характера акселерограмм грунта в эпицентральной зоне, то они обычно носят кратковременный импульсивный характер с продолжительностью 2-3сек. Типичный пример такой записи показан на рис.2.61, которая была зарегистрирована во время землетрясения в Паркфилде (Калифорния) 27 июня 1966 года, с магнитудой  $M=5.6$ . В эпицентральной зоне величины ускорения грунта в вертикальном направлении сопоставимы с величиной в горизонтальном направлении, а иногда даже существенно превосходит ее. В зависимости от ориентации места регистрации к эпицентру и к направлению простираения образовавшегося разрыва на поверхности Земли значения горизонтальных и вертикальных ускорений грунта могут как увеличиваться, так и уменьшаться. В эпицентральной зоне землетрясение сопровождается значительными оползнями вдоль крутых склонов и берегов крупных рек.

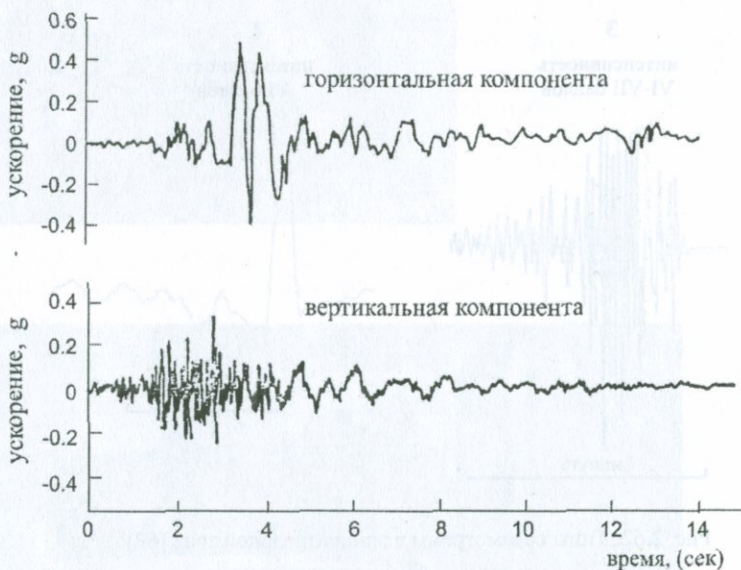


Рис. 2.61. Акселерограммы землетрясения в Паркфилде 27 июня 1966г., зарегистрированные в эпицентральной зоне [59].

На рис. 2.62 показаны различные типы сейсмограмм при землетрясениях разной интенсивности, заимствованные из работы Д.Рустановича [69], которые также подтверждают кратковременность интервала интенсивных сотрясений грунта в эпицентральной зоне.



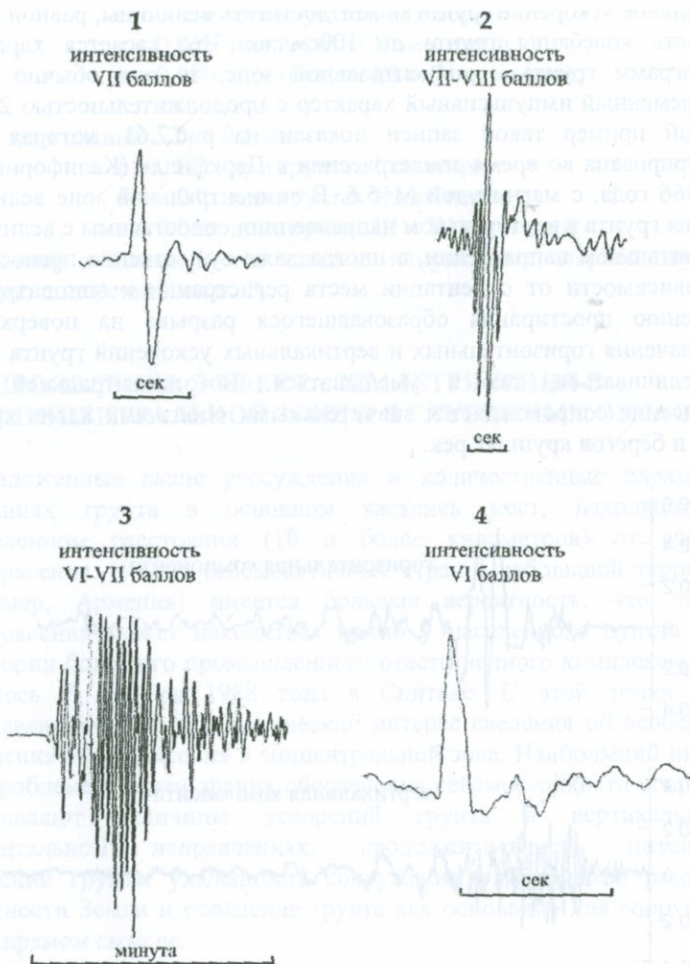


Рис. 2.62. Типы сейсмограмм в эпицентральной зоне [69].

Еще одно важное обстоятельство. В эпицентральной зоне колебания (ускорения) грунта носят более высокочастотный характер от 3 до 15 герц, которые, несмотря на большие амплитуды, не вызывают повреждений в обычных зданиях и сооружениях. Такие колебания (ускорения) грунта могут стать причиной повреждений очень жестких сооружений.

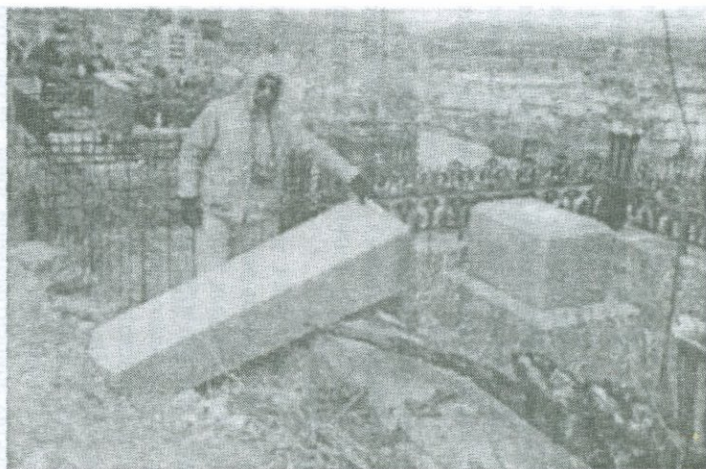


Рис. 2.63. Поведение надгробных камней во время Спитакского землетрясения [216].



На рис.2.63 показаны типичные повреждения надгробных памятников в эпицентральной зоне Спитакского землетрясения 1988 года. При землетрясении 26 мая 2003 года в Северной Японии с магнитудой  $M=7.0$  и эпицентром в Тихом океане на суше острова Хондо в трех местах были зарегистрированы акселерограммы грунта с максимальными ускорениями грунта более одного  $g$  соответственно: 1214, 1270 и 1003 см/сек<sup>2</sup> [176]. Преобладающая частота колебания акселерограмм была около 10 герц. Поэтому во время землетрясения в стенах начальной школы образовались только небольшие косые трещины, несмотря на то, что землетрясение вызывало крупномасштабные подвижки, оползни и разжижение грунта на обширной поверхности Земли.

Большое количество инструментальной информации в эпицентральной зоне было получено во время Сан-Сальвадорского землетрясения 10 октября 1986 года [129]. Гипоцентр землетрясения находился в пределах города на глубине 7 км.

Магнитуда землетрясения достигала  $M_s=5.4$ , интенсивность по шкале ММ VIII-IX баллов, глубина очага небольшая – 8 км. В результате землетрясения большое количество кирпичных зданий старой застройки и многоэтажных железобетонных зданий обрушилось или получило серьезные повреждения, в том числе из-за осадков грунтов. Максимальное значение ускорения грунта в горизонтальном направлении достигло до 0.72g, в вертикальном – до 0.46g. Продолжительность интенсивных колебаний грунта в пределах 2-5 сек, преобладающие периоды колебаний грунтов от 0.2 сек до 0.4 сек. Это, наверное, первое землетрясение, во время которого в нескольких местах эпицентральной зоны, на расстоянии от 0.9 км до 6.2 км от эпицентра, удалось зарегистрировать ускорение грунта. Расположение эпицентра и 7 станций, регистрирующих ускорение грунта, показано на рис. 2.64. Значение максимальных ускорений скоростей и перемещений (полученные от акселерограммы путем двойного интегрирования) для всех 7 пунктов регистрации приведены в табл.2.19. На рис.2.65 приведена трехкомпонентная акселерограмма, зарегистрированная на станции CIG.

Из табл.2.19 видно одно важное обстоятельство: преобладающие периоды колебания грунта в вертикальном значительно меньше, чем в горизонтальном. Из таблицы видно также, что наибольшее ускорение грунта зарегистрировано не на ближайшем расстоянии 0.9 км от эпицентра станции, а на станциях CIG и IVU, находящихся на расстоянии 4.3 и 5.3 км. Причиной такого явления, по-видимому, является ориентация регистрирующего акселерографа относительно плоскости спаривания. Это вытекает также из того факта, что для этих станций значения ускорений по двум горизонтальным направлениям почти в 2 раза отличаются друг от друга. Величина скорости колебания грунта достигла 80 см/сек, что согласуется со значениями по прогнозу скорости колебания грунта в ближайшей зоне, рассмотренного в I части книги (1.16).



Рис. 2.64. Распределение регистрирующих станций землетрясения 10 октября 1986г. В Сан Сальвадоре [129].

Таблица 2.19

| Условное название станций регистрации | Эпицентральное расстояние (км) | Горизонтальные компоненты |            |        |       |            |        | Вертикальная компонента |            |        | Периоды на спектре реакции при пиковых ускорениях, $T_0$ (сек) |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------|--------|-------|------------|--------|-------------------------|------------|--------|----------------------------------------------------------------|
|                                       |                                | 1                         |            |        | 2     |            |        |                         |            |        |                                                                |
|                                       |                                | A (g)                     | v (см/сек) | D (см) | A (g) | v (см/сек) | D (см) | A (g)                   | v (см/сек) | D (см) |                                                                |
| OBS                                   | 0.9                            | 0.66                      | -          | -      | 0.54  | -          | -      | 0.37                    | -          | -      |                                                                |
| UCA                                   | 3.8                            | 0.39                      | 33         | 6.2    | 0.43  | 49         | 11.6   | 0.24                    | 9.3        | 1.7    | 0.48; 0.54                                                     |
| CIG                                   | 4.3                            | 0.42                      | 62         | 15     | 0.71  | 80         | 12     | 0.40                    | 11         | 2.3    | 0.65; 0.25                                                     |
| HCR                                   | 4.5                            | 0.34                      | 32         | 4.2    | 0.47  | 45         | 13     | 0.26                    | 13         | 2.5    | 0.46; 0.50                                                     |
| IVU                                   | 5.3                            | 0.37                      | 39         | 9.8    | 0.72  | 55         | 7.1    | -                       | -          | -      | 0.2; 0.50                                                      |
| IGH                                   | 5.7                            | 0.54                      | 72         | 10     | 0.4   | 56         | 18     | 0.46                    | 18         | 2.1    | 0.4÷0.7; 0.85                                                  |
| HSH                                   | 6.2                            | 0.22                      | 18         | 4.6    | 0.32  | 26         | 4.4    | 0.15                    | 7.3        | 1.4    | 0.23; 0.55                                                     |



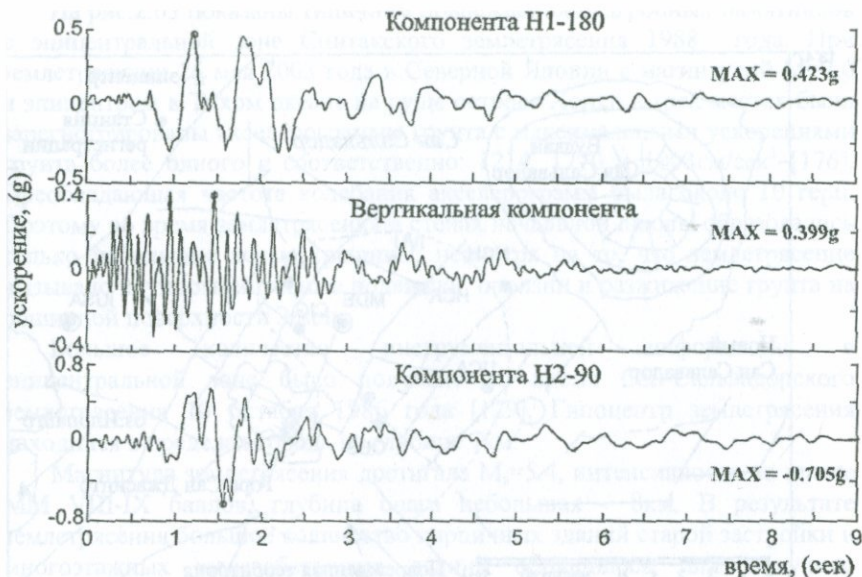


Рис. 2.65. Акселерограмма, записанная на станции CIG  
(Сан Сальвадор, 10 октября 1986г.) [129].

Фактически акселерограммы Табасского землетрясения 16 сентября 1978 года с  $M=7.3$ , показанные на рис.2.47.6, при котором значение ускорения грунта достигло  $1103 \text{ см/сек}^2$  (по уточненным данным [185]), были записаны в эпицентральной зоне — акселерографы были установлены на расстоянии 5 км от макросейсмического эпицентра. В то же время при землетрясении в Тайване (Чи-чи) 1999 года с  $M=7.7$ , на расстоянии всего 200 метров от разрыва горизонтальное значение ускорения грунта, показанное на рис.2.66, не превосходило  $470 \text{ см/сек}^2$  [148]. Путем интегрирования акселерограмм этого землетрясения были получены скорости и перемещения грунта, показанные на том же рис.2.66. Их величины оказались неожиданно большими по сравнению с ускорением:  $383 \text{ см/сек}$  для скорости и  $1200 \text{ см}$  для перемещения. Рекогносцировочные расчеты показали, что при таких значениях перемещений, скоростей и ускорений величина преобладающего периода колебания грунта могла быть около 10 сек. Нам кажется, что это не период колебания частиц грунта на поверхности Земли, а период свободных колебаний одного из блоков (на котором был установлен акселерограф) как целого твердого тела после вспарывания (землетрясения). Что касается величины перемещения  $1200 \text{ см}$ , то это, по-видимому, относительное смещение (подвижка) блоков, а ускорение  $470 \text{ см/сек}^2$  — ускорение всего блока как твердого тела. Сам импульсивный характер зарегистрированной акселерограммы (таких акселерограмм было

зарегистрировано на нескольких участках [148]) свидетельствует о правдоподобии высказанных предположений.

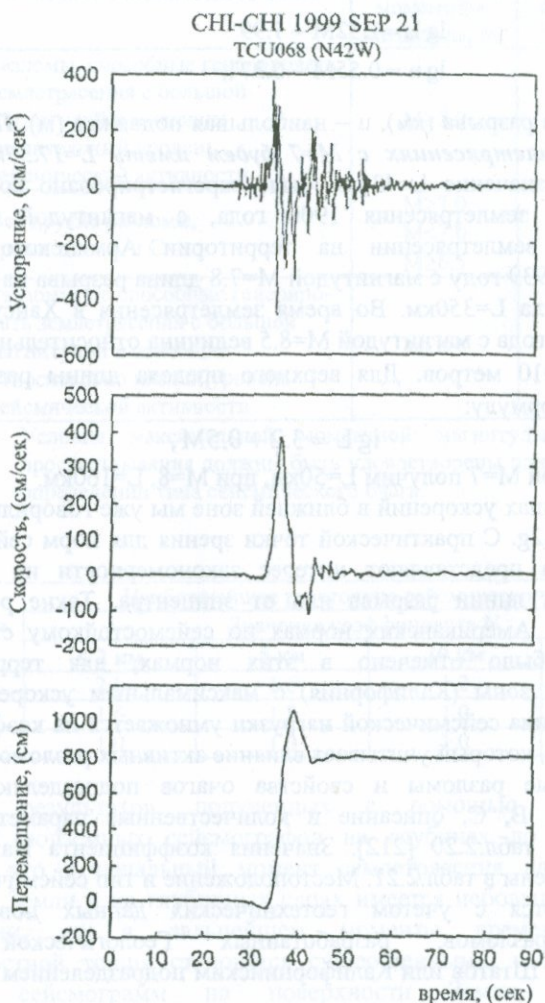


Рис. 2.66. Акселерограмма землетрясения в Чи-Чи (Тайвань) 21 сентября 1999 года (на расстоянии 200м от разрыва) и полученные от нее интегрированием значения скоростей и перемещений грунта [148].

При сильных землетрясениях в эпицентральной области на поверхности Земли в горизонтальных и вертикальных направлениях образуются разрывы и дислокации. Длина разрыва и величина



относительной подвижки сильно зависит от магнитуды землетрясения. Их величины, как уже было сказано, можно определить по следующим эмпирическим формулам:

$$\begin{aligned} \lg L &= 1.32M - 7.99 \\ \lg u &= 0.55M - 0.371, \end{aligned} \quad (2.141)$$

где  $L$  – длина разрыва (км),  $u$  – наибольшая подвижка (м). *При наиболее частых землетрясениях с  $M=7$  будем иметь  $L=17.37$  км,  $u=1.41$  м.* Наибольшее значение  $L=430$  км было зарегистрировано во время Сан-Францисского землетрясения 1906 года, с магнитудой  $M=7.8$ . При сильнейшем землетрясении на территории Армянского нагорья в Ерзиндже в 1939 году с магнитудой  $M=7.8$  длина разрыва на поверхности Земли достигла  $L=350$  км. Во время землетрясения в Хансу (Китай) 16 декабря 1920 года с магнитудой  $M=8.5$  величина относительной подвижки достигла  $\bar{u}=10$  метров. Для верхнего предела длины разлома Оцуки предлагает формулу:

$$\lg L = 3.2 + 0.5M,$$

по которой при  $M=7$  получим  $L=50$  км, при  $M=8$ ,  $L=160$  км.

О величинах ускорений в ближней зоне мы уже говорили. Они могут достигнуть 1-2g. С практической точки зрения для норм сейсмостойкого строительства представляют интерес закономерности их затухания с удалением от линии разрыва или от эпицентра. Такие рекомендации содержатся в Американских нормах по сейсмостойкому строительству [212]. Как было отмечено в этих нормах, для территории 4-й сейсмической зоны (Калифорния) с максимальным ускорением грунта  $z=0.4g$ , величина сейсмической нагрузки умножается на коэффициент  $N_a$  (см. табл. 2.13), который учитывает влияние активных разломов и очаговых зон. Активные разломы и свойства очагов подразделяются на три категории А, В, С, описание и количественные параметры которых приведены в табл. 2.20 [212]. Значения коэффициента  $N_a$  (near-source factor) приведены в табл. 2.21. Местоположение и тип сейсмического очага устанавливаются с учетом геотехнических данных новейших карт активных разломов, разработанных Геологической Службой Соединенных Штатов или Калифорнийским подразделением Угледобычи и Геологии.

С точки зрения сейсмостойкости подземных сооружений, большой практический интерес представляют *эффекты проявления землетрясения в глубинных от поверхности Земли пространствах.*

Первые такие данные были получены Д.Милнем и Ф.Омори, Т.Сахта и С.Сузаки, записав землетрясение на скважинах глубиной 3-20 метров.

Таблица 2.20

| Тип сейсмического очага | Описание сейсмического очага                                                                                                        | Параметры сейсмического очага             |                                      |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|
|                         |                                                                                                                                     | Максимальная моментная магнитуда, М       | Скорость проскальзывания, SR, мм/год |
| А                       | Разломы, способные генерировать землетрясения с большой магнитудой и имеющие значительный уровень сейсмической активности           | $M \geq 7.0$                              | $SR \geq 5$                          |
| В                       | Все другие разломы, кроме типа А и С                                                                                                | $M \geq 7.0$<br>$M < 7.0$<br>$M \geq 6.5$ | $SR < 5$<br>$SR > 2$<br>$SR < 2$     |
| С                       | Разломы, не способные генерировать землетрясения с большой магнитудой и имеющие относительно низкий уровень сейсмической активности | $M < 6.5$                                 | $SR \leq 2$                          |

**Примечание:** Условия максимальной моментной магнитуды и скорости проскальзывания должны быть удовлетворены одновременно при определении типа сейсмического очага.

Таблица 2.21

| Тип сейсмического очага | Наиближайшее расстояние сейсмического очага |      |       |              |
|-------------------------|---------------------------------------------|------|-------|--------------|
|                         | Значение коэффициента $N_a$                 |      |       |              |
|                         | $\leq 2$ км                                 | 5 км | 10 км | $\geq 15$ км |
| А                       | 2.0                                         | 1.6  | 1.2   | 1.0          |
| В                       | 1.6                                         | 1.2  | 1.0   | 1.0          |
| С                       | 1.0                                         | 1.0  | 1.0   | 1.0          |

Анализ результатов, полученных с помощью современных специальных подземных сейсмографов на глубинах до 150 метров, показывает, что в начальный момент землетрясения на записях на поверхности Земли и на глубинных слоях имеется небольшое смещение оси времени, но в дальнейшем моменты времени, наличие приповерхностной толщи становятся существенными, вследствие чего амплитуды сейсмограмм на поверхности Земли существенно увеличиваются, а периоды колебания частиц грунта растут. С этой точки зрения представляют значительный интерес изменения во времени ускорений на границах всех слоев (рис.2.67), находящихся на различных глубинах от поверхности Земли, полученные Х.Кобоями по уравнениям типа (2.115)-(2.118) для воздействия типа Эль-Центро [182]. Как видно из рисунка, падающая на глубине 62 метра волна с амплитудой 100 галов на поверхности Земли (2-м слое) вызывает почти трехкратное увеличение ускорения.



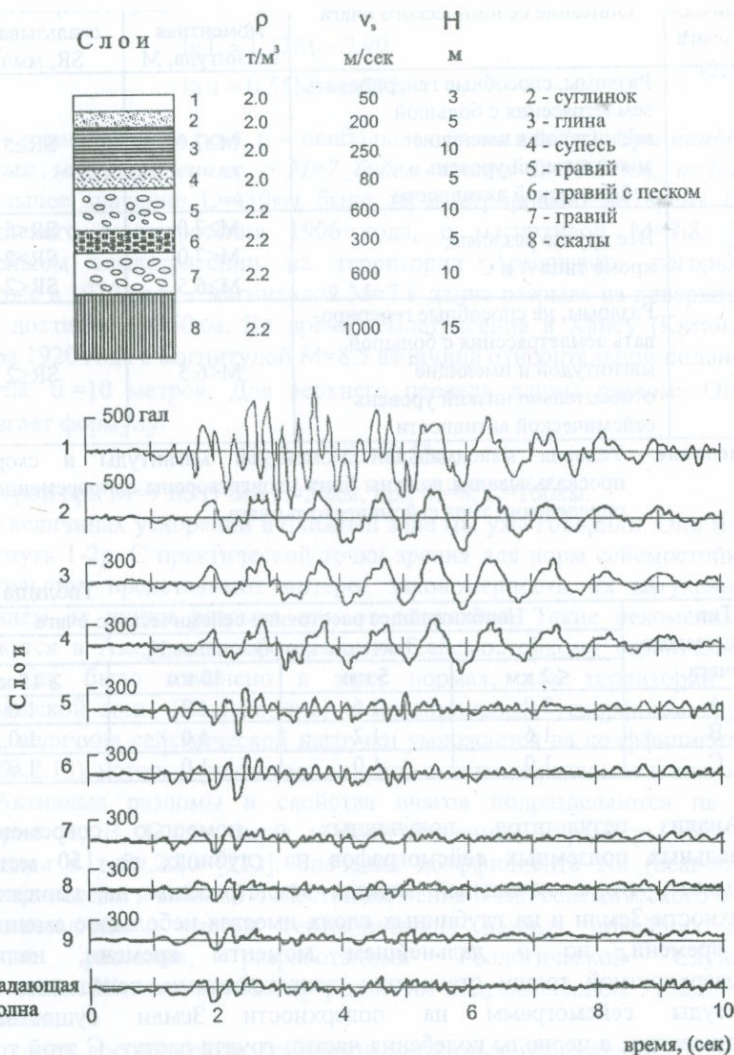


Рис. 2.67. Изменение во времени ускорений различных глубинных слоев при падающей волне по воздействию Эль-Центро с условным ускорением 100 галов [182].

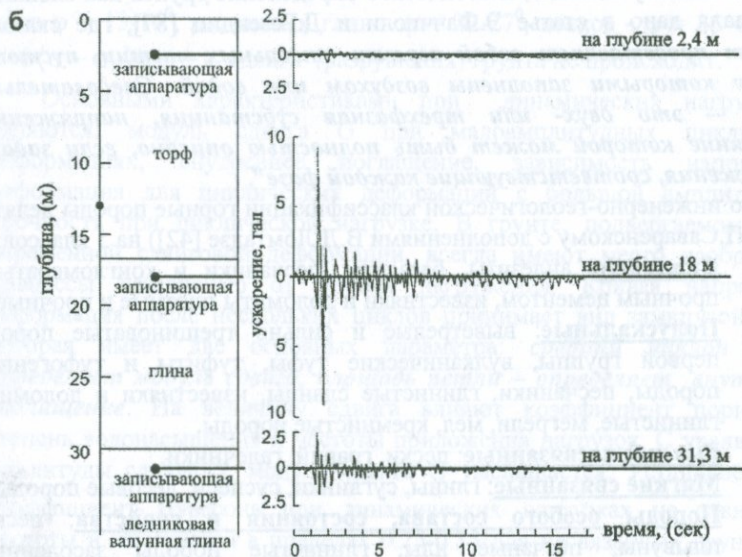
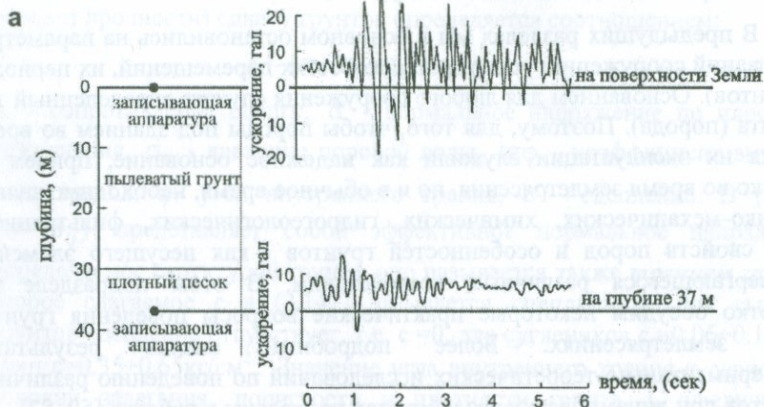


Рис. 2.68. Запись ускорения грунта на поверхности Земли и на глубинных слоях при местных слабых землетрясениях.

а. полученные Ураясу, Япония [59, 73].

б. полученные в Юнион-Бей, США [73].

На рис.2.68 показано 2 примера регистрации землетрясения на различных уровнях по глубине Земли. Многие специалисты, изучавшие эти вопросы, склонны считать, что как для скальных, так и для аллювиальных грунтов *ускорения на глубинных слоях можно принимать в 1.5-2.5 раза меньше, чем на поверхности Земли.*



## 2.18. О ПОВЕДЕНИИ ГРУНТОВ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

В предыдущих разделах мы в основном остановились на параметрах оснований сооружений: ускорениях, скоростях перемещений, их периодах (грунтов). Основанием для любого сооружения служит определенный тип грунта (порода). Поэтому, для того, чтобы породы под зданием во время срока их эксплуатации служили как надежное основание, причем не только во время землетрясения, но и в обычное время, необходимо знание физико-механических, химических, гидрогеологических, фильтрационных свойств пород и особенностей грунтов - как несущего элемента, подвергающегося различным воздействиям. В этом подразделе мы коротко обсудим некоторые практические вопросы поведения грунтов при землетрясениях. Более подробный анализ результатов экспериментально-теоретических исследований по поведению различных грунтов при динамических воздействиях приведены в работах [59, 87].

По нашему мнению, классическое определение грунта как сложного материала дано в статье Э.Фаччиоли и Д.Резендиц [87], где сказано: *“Грунт представляет собой агрегат отдельных частиц, пустоты между которыми заполнены воздухом или водой. Следовательно, грунт – это двух- или трехфазная субстанция, напряженное состояние которой может быть полностью описано, если заданы напряжения, соответствующие каждой фазе”*.

По инженерно-геологической классификации горные породы делятся (по Ф.П.Саваренскому с дополнениями В.Д.Ломтадзе [42]) на 5 классов:

1. **Скальные**: андезиты, базальты, песчаники и конгломераты с прочным цементом, известняки и доломиты плотные и прочные.
2. **Полускальные**: выветрелые и сильно трещиноватые породы первой группы, вулканические туфы, туфиты и туфогенные породы, песчаники, глинистые сланцы, известняки и доломиты глинистые, мегрели, мел, кремнистые породы.
3. **Рыхлые несвязанные**: пески, гравий, галечники.
4. **Мягкие связанные**: глины, суглинки, супеси, лесовые породы.
5. **Породы особого состава, состояния и свойства**: пески-пльвуны, песчаные илы, глинистые породы засоленные, глинистые илы, торфы, почва, гипс.

Большинство повреждений зданий и сооружений во время землетрясений связано с низкой прочностью и обрушениями грунтов, которые проявляются в виде *оползней, срыва пород, разжижением грунта, расслоения насыпей, потери устойчивости склонов, осадков фундаментов*. Грунты оказывают то или иное сопротивление при растяжении, сжатии и сдвиге. Прочность грунта определяется в основном его сопротивлением сдвигу, так как сопротивление сжатию в редких случаях оказывается исчерпанным, а растяжению грунт в реальных условиях почти не подвергается.

**Сопротивления сдвигу грунтов.** Статическое сопротивление (предел прочности) сдвигу грунтов определяется соотношением:

$$\tau = (\sigma - \sigma_0) \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (2.142)$$

$\tau$  - сопротивление сдвигу,  $\sigma$  - нормальное напряжение по плоскости разрушения,  $\sigma_0$  - давление поровой воды,  $\operatorname{tg} \varphi$  - коэффициент внутреннего трения,  $\varphi$  - угол внутреннего трения,  $c$  - сцепление. В (2.142)  $(\sigma - \sigma_0)$  представляет собой эффективное нормальное напряжение, определяемое структурой грунта, оно называется также *трением грунта*; второе слагаемое  $c$  в (2.142) называется *сцеплением*. Для сыпучих грунтов сцепление отсутствует, т.е.  $c = 0$ , для суглинков  $c = 0.06 \div 0.14$ , для глин  $c = 0.35 \div 0.65 \text{ кг/см}^2$ . Значение угла внутреннего трения  $\varphi$  зависит от условий залегания, пористости и плотности грунта. С увеличением плотности и уменьшением пористости значение  $\varphi$  растет: для различных илов  $\varphi = 13-16^\circ$ , песчаных глин -  $\varphi = 22-27^\circ$ , песков -  $\varphi = 35-40^\circ$ . При  $\tau < (\sigma - \sigma_0) \operatorname{tg} \varphi + c$  сдвига (разрушения) грунта не происходит.

Основными характеристиками при динамических нагружениях являются: модуль сдвига  $G$  при малоамплитудных циклических деформациях, внутреннее поглащение, зависимость напряжение-деформация для циклических деформаций с большой амплитудой и прочность при циклической нагрузке. В грунте, подвергаемом знакопеременной сдвиговой деформации, всегда имеют место необратимые процессы независимо от уровня нагружения. Кривая напряжение-деформация после нескольких циклов принимает вид замкнутой петли, которая имеет две основных параметра: *средний наклон петли определяет модуль сдвига, площадь петли - определяет внутреннее поглащение*. На величину сдвига влияют коэффициент пористости, степень водонасыщения и частоты приложения нагрузок. С увеличением амплитуды сдвига  $\gamma$  модуль сдвига  $G$  уменьшается. Установлено, что коэффициент Пуассона при динамических нагрузках не зависит от частоты и изменяется в пределах 0.25-0.35 для несвязанных грунтов и в пределах 0.4-0.5 для связанных грунтов [87]. Для измерения сил внутреннего трения используются следующие параметры: коэффициент поглащения энергии  $\Omega$ , логарифмический декремент  $\delta$  и фазовый угол между силой и деформацией  $\alpha$ . Эти параметры связаны между собой соотношениями:

$$\Omega = 2\delta = 2\pi\alpha. \quad (2.143)$$

Водонасыщенность приводит к почти двукратному увеличению декремента колебаний  $\delta$  по сравнению грунтов с их сухим состоянием. Для сухих песков среднее значение  $\delta$  при средних деформациях



( $\gamma = 10^{-3}$ ) доходит до 0.2. Ввиду большой зависимости значений модуля сдвига и декремента колебания от многих факторов их целесообразно для каждого конкретного грунта определять экспериментально при помощи специально предназначенных для таких испытаний аппаратур.

**Разжижение грунта.** Насыщенный водой песок при интенсивных колебаниях испытывает разжижение. Во время землетрясения верхние части таких грунтов теряют несущую способность. В результате сооружения, построенные на этих грунтах, получают осадки, а заглубленные в грунт системы инженерных сооружений разрушаются и всплывают. Прочность песка при переменных касательных напряжениях пропорциональна силе обжатия. На приповерхностной толще, где сила обжатия мала, сопротивление сдвига меньше, чем на более глубинных слоях, поэтому вероятность разжижения больше в верхних слоях. По результатам специальных опытов установлено, что мелкозернистый песок разжижается быстрее, чем крупнозернистый. Быстрее разжижается также увлажненный песок, чем сухой. По данным Окомото [59], экспериментально установленные предельные ускорения грунта (в галах), при которых происходит его разжижение, приведены в табл.2.22.

Экспериментальными исследованиями многих ученых показано, что чем выше обжатие песка и меньше число циклических напряжений, тем выше амплитуда повторно-переменных напряжений, которые вызывают разжижение грунта. Период колебания грунта почти не влияет на разжижение грунта.

Таблица 2.22

| Степень влажности    | Мелкозернистый песок<br>(эфф.диаметр $\leq 0.17$ мм) | Крупнозернистый песок<br>(эфф.диаметр $\geq 1.33$ мм) |
|----------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Полностью насыщенный | Разжижение при ускорении грунта 50-200гал            | Разжижение при ускорении грунта 200-300гал            |
| Частично насыщенный  | Не разжижается при ускорении грунта до 400 гал       | Не разжижается при ускорении грунта 500 гал и ниже    |
| Сухой                | Не разжижается при ускорении грунта 500 гал и ниже   |                                                       |

Реакция *твердых грунтов* при землетрясениях аналогична реакции упругой системы при *ударных воздействиях*, во время которых динамический коэффициент может доходить до 40-50, а реакция *мягких грунтов* — *продолжительным вынужденным воздействиям*, при которых динамический коэффициент доходит до 5-10 раз. Поэтому при землетрясениях с малой продолжительностью ускорения на скальных участках грунтов в принципе должны быть больше чем на рыхлых участках, а при землетрясениях с большой продолжительностью, наоборот, ускорения на рыхлых участках должны быть больше.

### Устойчивость откосов при землетрясении. Основной причиной

разрушения откосов при землетрясениях является увеличение интенсивности сейсмического воздействия вблизи откоса вследствие резкого изменения рельефа местности. Известны случаи возрастания ускорения верха утеса на 20-30% по сравнению с ускорениями основания. Этот эффект учитывается многими нормами по сейсмостойкому строительству, в частности, французскими и армянскими [75, 80]. Кроме того, на разрушение откосов влияют также снижение прочности и устойчивость грунта вследствие их колебания во время землетрясения. Расчеты по обеспечению устойчивости откоса во время землетрясения производится как при обычных условиях (без землетрясения) с дополнительным учетом горизонтальных и вертикальных инерционных нагрузок инертной массы грунта от горизонтальных и вертикальных ускорений прогнозируемого землетрясения. В отличие от других сооружений, при расчете земляных сооружений влияние вертикальной составляющей землетрясения достаточно велико.

В общем случае, при неоднородных грунтах, для проверки устойчивости откоса массив грунта расчленяется на большое число отдельных частей. Произвольно назначая расположение центра  $O$  и радиус круга  $r$ , после проведения поверхности скольжения массив грунта вертикальными сечениями разделяется на ряд столбцов, как это показано на рис.2.69. На рисунке выделен один из таких столбцов  $abcd$  и для него рассматривается условие равновесия сил.

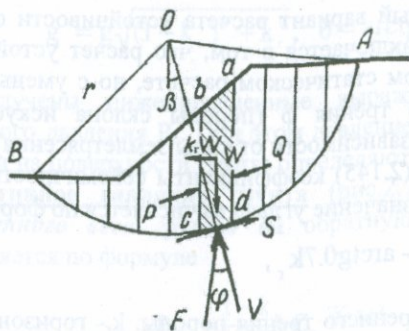


Рис. 2.69.  
Расчет  
устойчивости  
откоса с учетом  
сейсмического  
воздействия [59].

К этим силам относятся:

$W$  — вес столбца (включая вес воды),

$S$  — сила сцепления по дуге скольжения,

$F_s = [W(1-k_v)\cos\beta - k_r W \sin\beta - V] \tan\phi$  — сила внутреннего трения,  $\phi$  — угол внутреннего трения,  $V$  — давление воды,  $k_r$  и  $k_v$  — горизонтальный и вертикальный коэффициенты сейсмичности — отношение ускорения грунта к ускорению силы тяжести в соответствующем направлении,

$F_n = W(1-k_v)\cos\beta - k_r W \sin\beta - V$  — нормальная сила на дугу  $cd$ ,



$P$  – давление грунта на вертикальную плоскость  $bc$ ,

$Q$  – давление грунта на вертикальную плоскость  $ad$ .

Силы  $P$  и  $Q$  являются неизвестными величинами, которые уравновешивают друг друга.

Сумма моментов внешних сил (собственный вес плюс горизонтальная и вертикальная силы инерции от землетрясения) относительно точки  $O$  будет:

$$M_w^0 = \sum r(1 - k_v)W \sin \beta + \sum k_r y W, \quad (2.144)$$

где  $y$  – плечо силы  $k_r W$  ( $k_r$  – коэффициент сейсмичности в горизонтальном направлении) относительно точки  $O$ .

Сумма моментов внутренних сил (сила внутреннего трения плюс сила сцепления) относительно точки  $O$  будет:

$$M_\phi^0 = r \left\{ \sum S + \sum [W(1 - k_v) \cos \beta - k_r W \sin \beta - V] \operatorname{tg} \varphi \right\}. \quad (2.145)$$

Для обеспечения устойчивости откоса, т.е. для того, чтобы массив грунта не подвергался скольжению (сдвигу), необходимо, чтобы

$$M_\phi^0 > M_w^0. \quad (2.146)$$

За величину коэффициента запаса при расчете откоса принимается минимальное значение отношения  $M_\phi^0 / M_w^0$ . Для обычных условий (при отсутствии землетрясений) в уравнениях  $k_r$  и  $k_v$  принимаются равными нулю.

Другой, более упрощенный вариант расчета устойчивости с учетом сейсмического воздействия заключается в том, что расчет устойчивости производится как при обычном статическом расчете, но с уменьшенным значением угла внутреннего трения  $\varphi$  (породы склона искусственно считаются менее прочными в зависимости от силы землетрясения). В этом случае в формулах (2.144) и (2.145) коэффициенты сейсмичности  $k_r$  и  $k_v$  принимаются равным нулю, а значение угла  $\varphi$  вычисляется по формуле

$$\varphi = \varphi_{ст} - \operatorname{arctg} 0.7 k_r, \quad (2.147)$$

где  $\varphi_{ст}$  – реальный угол внутреннего трения породы,  $k_r$  – горизонтальный коэффициент сейсмичности. Так, например, при  $k_r=0.2$  или  $k_r=0.4$  угол внутреннего трения, при упрощенном расчете устойчивости откоса с учетом сейсмического воздействия, согласно (2.147), необходимо принимать соответственно на  $8^\circ$  и  $15.6^\circ$  меньше, чем реальный  $\varphi_{ст}$ .

**Давление грунта на подпорные стены при землетрясениях.**  
Активное давление грунта на подпорные стены при обычных условиях (без землетрясений) определяется методом Кулона, как это показано на рис.2.70, где приняты следующие обозначения:  $w$  – вес массива грунта

единичной толщины,  $q$  – нагрузка на поверхности грунта,  $Q=cBC$  – сила сцепления,  $R$  – сила трения,  $P$  – давление на стену,  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта,  $\delta_r$  – угол трения стены, обычно принимаемый равным  $\varphi/2$ ,  $BC$  – плоскость скольжения.

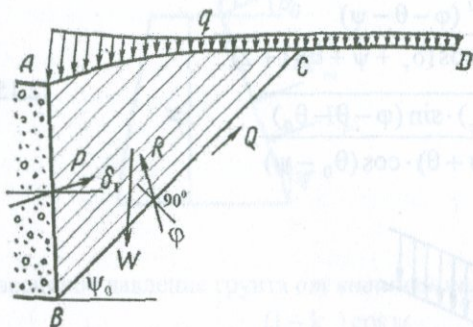


Рис. 2.70. Расчет давления грунта на подпорную стену.

Неизвестные силы  $P$  и  $R$  и угол  $\psi_0$  определяются из уравнений статического равновесия массива грунта ABC. Мононобе, развивая идеи Кулона, разработал метод определения давления  $P$  на стену *с учетом сейсмических воздействий* [59]. Эффект землетрясения учитывается путем изменения величины ускорения свободного падения  $g$  и его поворота на угол  $\theta$  по формулам:

$$g' = g\sqrt{(1-k_b)^2 + k_r^2}, \quad \theta = \arctg \frac{k_r}{1-k_b}. \quad (2.148)$$

Им получены нижеприведенные выражения для активного  $P_a$  и пассивного давления  $P_p$ . При этом давление от веса грунта и от внешней нагрузки на поверхности грунта определяются отдельно.

**Активное давление грунта** (рис.2.71). Активное давление *от собственного веса грунта* на обратную сторону подпорной стены определяется по формуле

$$P_{aw} = \frac{1-k_b}{2} C_a \bar{W} H^2. \quad (2.149)$$

Активное давление грунта *от внешней нагрузки* на поверхность равно:

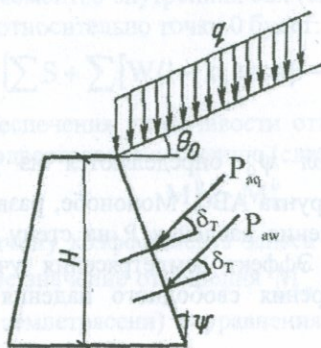
$$P_{aq} = \frac{(1-k_b) \cos \psi}{\cos(\psi - \theta_0)} C_a q H, \quad (2.150)$$

где  $\bar{W}$  – объемный вес грунта единичной толщины ( $\text{кг/см}^2$ ),  $H$  – высота подпорной стены,  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта,  $\psi$  – угол наклона



$$f(x) = \frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x+1)^2}$$

$$Z = \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta_T) \cdot \sin(\varphi - \theta - \theta_0)}{\cos(\delta_T + \psi + \theta) \cdot \cos(\theta_0 - \psi)}}$$



Расчет величин  
активного давления  
грунта на подпорную  
стену.

Сила  $P_{aw}$  приложена на расстоянии  $2/3$  высоты подпорной стены от ее верха, а сила  $P_{aq}$  приложена по середине высоты стены и составляют угол  $\delta_r$  к ее поверхности.

Пассивное давление грунта (рис.2.72). Пассивное давление грунта на обратную сторону стены *от собственного веса* определяется формулой:

$$P_{pw} = \frac{1-k_B}{2} C_p \bar{W} H^2, \quad (2.152)$$

где

$$C_p = \frac{\cos^2(\varphi - \theta + \psi)}{\cos \theta \cdot \cos^2 \psi \cdot \cos(\psi - \theta)(1 - z^*)^2} \quad (2.153)$$

$$z^* = \sqrt{\frac{\sin \varphi \cdot \sin (\varphi + \theta_0 - \theta)}{\cos (\psi - \theta) \cdot \cos (\theta_0 - \psi)}}.$$

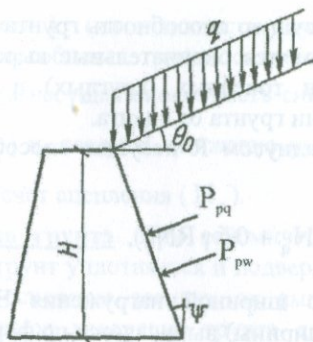


Рис. 2.72.

Расчет величин  
пассивного давления  
грунта на подпорную  
стену.

Пассивное давление грунта *от внешней нагрузки* определяется формулой:

$$P_{pq} = \frac{(1 - k_s) \cos \psi}{\cos(\psi - \theta_0)} C_p q H. \quad (2.154)$$

Сила  $P_{pw}$  приложена на расстоянии  $2/3$  высоты подпорной стены от ее верха, а направление перпендикулярно поверхности стены, сила  $P_{pq}$  приложена по середине высоты стены и перпендикулярно к ее поверхности. Формулы (2.150) и (2.151) показывают, что в случае вертикальной подпорной стены ( $\delta_r = 0, \psi = 0$ ) и горизонтальной поверхности грунта с повышением коэффициента сейсмичности  $k_r$ , активное давление грунта возрастает, а пассивное давление — убывает. При этом, по сравнению с обычными условиями ( $k_r = 0$ ) для  $k_r = 0.4$  активное давление при  $\varphi = 30^\circ$  увеличивается в 2.12 раза, а пассивное — уменьшается 1.41 раза.

Давление грунта на подпорную стену определяется в обычных условиях **разностью активного и пассивного давления** (критическое давление). В момент начала опрокидывания стены давление грунта определяется только активным давлением на стену. И наоборот, когда сила приложена к подпорной стене с фронтальной поверхности, давление грунта может доходить до пассивного давления. Это способствует устойчивости подпорной стены в критическом состоянии.

**Несущая способность грунта при землетрясениях.** Несущая способность грунта при сильных землетрясениях значительно снижается. Количественная характеристика этого снижения зависит от многих факторов и главным из них является величина ускорения грунта в горизонтальном и вертикальном направлениях. Если принимать, что землетрясение приводит к уменьшению угла внутреннего трения грунта по сравнению с обычными условиями, то можно на основании расчета несущей способности фундаментов при обычных условиях определить их



несущую способность при сейсмических воздействиях. Такой способ учета влияния землетрясения на несущую способность грунта разработан в работе Ш.Окомото. Ниже приводятся окончательные выражения для определения несущей способности точечных (круглых) и ленточных фундаментов, при общем разрушении грунта от сдвига.

Для круглого фундамента с радиусом  $R$  несущая способность –  $Q$  определяется формулой:

$$Q = \pi R^2 (1.3 c N_c + \gamma D_f N_q + 0.6 \gamma R N_\gamma). \quad (2.155)$$

Для ленточного фундамент с шириной нагружения  $B$  погонная несущая способность (на единицу ширины) вычисляется по формуле:

$$Q = B (0.66 c N'_c + \gamma D_f N'_q + 0.5 \gamma B N'_\gamma), \quad (2.156)$$

где  $c$  – удельное сцепление грунта,  $\gamma$  – объемный вес грунта,  $D_f$  – глубина заложения фундамента. Значения безразмерных коэффициентов  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$ ,  $N'_c$ ,  $N'_q$  и  $N'_\gamma$  соответственно для круглого и ленточного фундаментов в зависимости от значений ускорений грунта в горизонтальном и вертикальном направлениях  $k_r$  и  $k_v$  и угла внутреннего трения грунта  $\phi$  приведены в табл.2.23. В таблице через  $k_c$  обозначен суммарный коэффициент сейсмичности:

$$k_c = \frac{k_r}{1 - k_v}. \quad (2.157)$$

Данные табл.2.23 при  $k_c=0$  соответствуют случаю определения величины несущей способности фундаментов  $Q$  без учета влияния землетрясения.

Таблица 2.23

|             | $\phi = 35^\circ$ |     |     |     |     | $\phi = 30^\circ$ |     |     |     |     | $\phi = 25^\circ$ |     |     |     |     |
|-------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-----|
|             | $k_c$             |     |     |     |     | $k_c$             |     |     |     |     | $k_c$             |     |     |     |     |
|             | 0                 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0                 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0                 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 |
| $N_c$       | 58                | 34  | 22  | 16  | 12  | 36                | 22  | 17  | 12  | 9   | 22                | 17  | 12  | 9   | 6   |
| $N_q$       | 43                | 20  | 12  | 7   | 4   | 22                | 12  | 7   | 4   | 3   | 12                | 7   | 5   | 3   | 3   |
| $N_\gamma$  | 42                | 20  | 9   | 3   | 2   | 20                | 9   | 4   | 2   | 1   | 9                 | 4   | 2   | 1   | 0   |
| $N'_c$      | 24                | 18  | 13  | 11  | 9   | 18                | 13  | 12  | 9   | 8   | 13                | 12  | 9   | 8   | 6   |
| $N'_q$      | 13                | 8   | 5   | 3   | 2   | 8                 | 5   | 4   | 2   | 2   | 5                 | 4   | 3   | 2   | 1   |
| $N'_\gamma$ | 10                | 5   | 2   | 1   | 0   | 6                 | 2   | 1   | 0   | 0   | 2                 | 1   | 0   | 0   | 0   |

Как показывает анализ таблицы, при увеличении коэффициента сейсмичности  $k_c$  (интенсивности землетрясения), наиболее значительно несущая способность грунта снижается за счет сопротивления трения ( $N_\gamma$ ), затем несущая способность снижается за счет заглубления фундамента ( $N_q$ ) и, наконец, снижение несущей способности самое незначительное за счет сцепления ( $N_c$ ).

**Осадка грунта.** При сейсмическом воздействии слабоконсолидированный грунт уплотняется и подвергается осадке. Предельная величина осадки в основном зависит от амплитуды ускорения грунта. Когда горизонтальное ускорение грунта достигает  $300-400 \text{ см/сек}^2$ , песчаный грунт на поверхности Земли течет и его состояние сильно изменяется. Наличие сооружения на поверхности грунта (дополнительное вертикальное нагружение) сильно влияет на характер осадки в зависимости от веса сооружения и частоты колебания грунта. Для ответственных сооружений на эти вопросы можно получить конкретные ответы только путем специальных экспериментальных модельных исследований.

**Напряжение в грунте от сосредоточенной силы.** От действия сосредоточенной силы на поверхности грунтового массива (рис.2.73), ограниченной горизонтальной плоскостью и имеющей большие (неограниченные) размеры в остальных направлениях, нормальные  $\sigma_z$  и касательные напряжения  $\tau_{xy}$  и  $\tau_{zx}$  имеют следующие значения [107]:

$$\sigma_z = \frac{3 P z^3}{2 \pi R^5}, \quad \tau_{xy} = \frac{3 P y z^2}{2 \pi R^5}, \quad \tau_{zx} = \frac{3 P x z^2}{2 \pi R^5}. \quad (2.158)$$

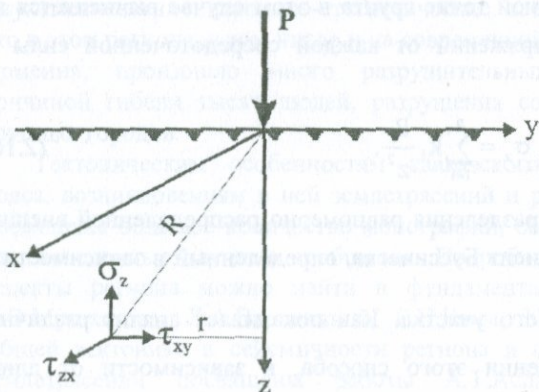


Рис. 2.73.  
Нормальное и касательное напряжение в грунте от сосредоточенной силы.



Эти формулы известны как формулы Буссинеска и имеют большое практическое применение. Для сжимающих напряжений  $\sigma_z$  обычно пользуются более простой формулой:

$$\sigma_z = k \frac{P}{z^2}, \quad (2.159)$$

где через  $k$  обозначено

$$k = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}, \quad r = \sqrt{R^2 - z^2} \quad (2.160)$$

Коэффициенты  $k$  называются коэффициентами Буссинеска. Их табличные значения для различных отношений  $r/z$  приводятся во многих ученых пособиях по механике грунтов.

В точке непосредственного приложения сосредоточенной силы сжимающие напряжения, как и следовало ожидать, достигают очень больших величин и грунт подвергается пластическим деформациям. Поэтому для некоторой полушаровой области вокруг сосредоточенной силы формулы (2.158) неприемлемы. Для получения более соответствующей действительности картины напряжения их значения вычисляются на некотором расстоянии (глубине) ниже точки приложения сосредоточенной силы. В случае *равномерно распределенной внешней нагрузки* для применения формул (2.159) ее можно разделить на равные участки и их рассматривать как *сосредоточенные*. Иными словами, равномерно распределенную нагрузку в первом приближении можно заменить эквивалентными сосредоточенными силами. Сжимающее напряжение  $\sigma_z$  в заданной точке грунта в этом случае вычисляется как сумма сжимающих напряжений от каждой сосредоточенной силы по формуле:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n k_i \frac{P_i}{z^2}, \quad (2.161)$$

где  $n$  — число участков деления равномерно распределенной внешней нагрузки,  $k_i$  — коэффициент Буссинеска, определенный в зависимости от отношения  $r_i/z$  для  $i$ -ого участка. Как показывает анализ различных примеров, при применении этого способа, в зависимости от длины распределенной нагрузки, погрешность вычисления  $\sigma_z$  не превышает 6%.

TES PRONTEMPS FLEURIRONT ENCORE,  
TES BEAUX JOURS RENAÎTRONT ENCORE,  
APRÈS L'HIVER, APRÈS L'ENFER,  
POUSSERA L'ARBRE DE VIE,  
POUR TOI, ARMÉNIE

CHARLES AZNAVOUR  
POUR TOI, ARMÉNIE

ТВОИ ВЕСНЫ К ТЕБЕ ВОЗВРАТЯТСЯ ЕЩЕ,  
ТВОИ СВЕТЛЫЕ ДНИ ВОЗРОДЯТСЯ ЕЩЕ.  
ПОСЛЕ АДА, ЗИМЫ И НЕВЗГОВ  
ДРЕВО ЖИЗНИ ЕЩЕ ЗАЦВЕТЕТ  
ДЛЯ ТЕБЯ, АРМЕНИЯ.

ШАРЛЬ АЗНАВУР  
“ДЛЯ ТЕБЯ, АРМЕНИЯ”

### 3.1. КРАТКИЙ ОЧЕРК О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ, ПРОИСХОДЯЩИХ НА АРМЯНСКОМ НАГОРЬЕ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ

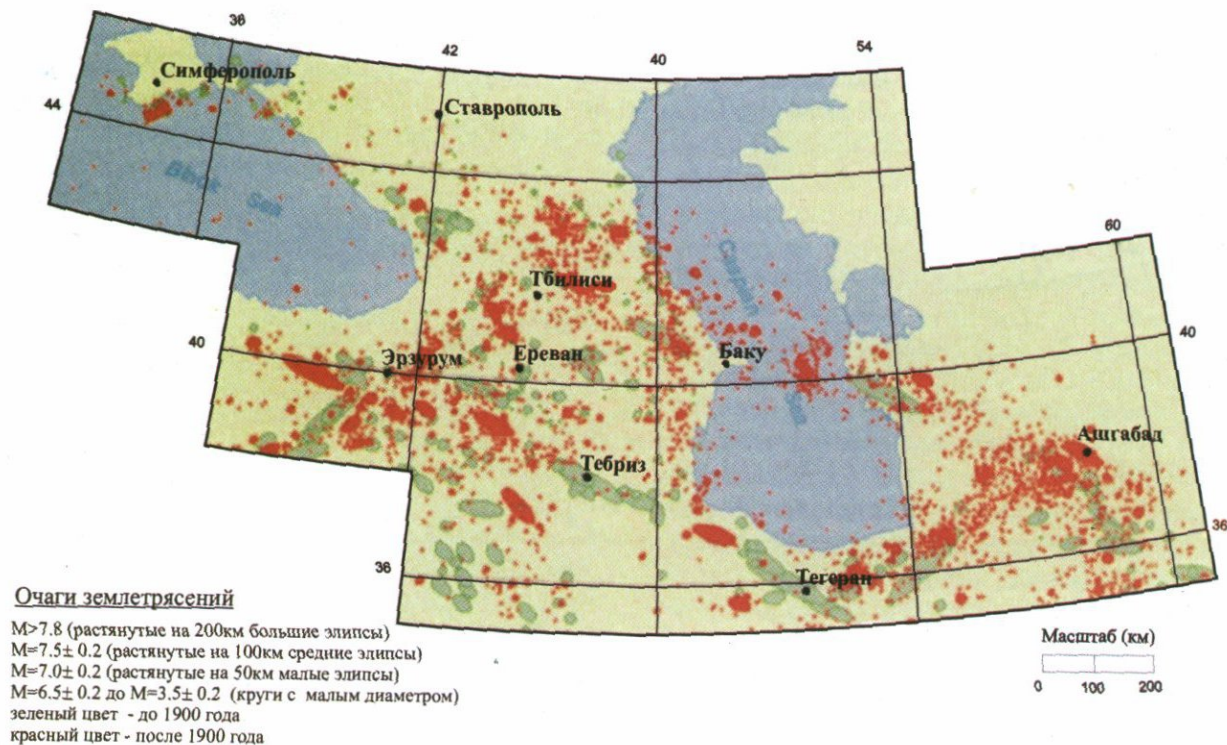
Армянское нагорье, которое в основном совпадает с исторической Арменией, а также Анатолийское плоскогорье и Кавказский хребет вместе составляют тот географический узел, который соединяет западную и восточную части Альпийской (Евразийской) сейсмоопасной зоны Земли. Армянское нагорье целиком находится в зоне коллизии Евразийской и Аравийской плит. Лобовые столкновения этих двух “богатырей” в регионе генерируют огромные тектонические напряжения, импульсивные разрядки которых вызывают сильные землетрясения. Двухтысячелетние историко-статистические сведения свидетельствуют, что в этом регионе, в том числе и на современной территории Республики Армения, произошло много разрушительных землетрясений, став причиной гибели тысяч людей, разрушения сотен населенных мест и крупных городов.

Тектоническим особенностям кавказского региона Альпийского пояса, возникновением в ней землетрясений и расположению их очагов посвящены большое количество монографий, сборники научных трудов, многочисленные научные сообщения. Подробные ответы на указанные аспекты региона можно найти в фундаментальных трудах Г.Абиха, И.В.Мушкетова, Л.А.Варданянца, Е.Н.Бюса, К.Н.Паффенгольца и др. Общей тектонике и сейсмичности региона и особенностям отдельных землетрясений посвящены работы А.Т.Асланяна, А.А.Габриеляна, А.Г.Назарова, Н.К.Карапетян, Б.К.Карапетян В.А.Степаняна, О.А.Саркисяна, Г.П.Симонян, С.А.Пирузяна, Ц.Г.Акопяна,



А.С.Караханяна, С.Ю.Баласаняна, С.Н.Назаретяна, А.Х.Баграмяна, С.М.Оганесян, Э.Г.Геодакяна, Л.А.Ахвердяна, А.С.Аванесяна, Р.Т.Мириджаняна, П.В.Алояна, Т.О.Бабаян, А.Г.Бабаджаняна, В.Г.Григоряна, Г.М.Петросяна, а также Г.П.Горшкова, Н.В.Кондорской, Н.А.Введенской, Н.В.Шебалина, В.Г.Трифоновой, В.И.Бунэ, А.А.Никонова, В.П.Солоненко, В.И.Уломова, А.Д.Цхакая, Д.И.Сихарулидзе, Э.А.Джибладзе, О.Д.Гоцадзе, В.Г.Папалашвили, И.В.Айвазашвили, Р.А.Агамирзоева, З.З.Султановой, Ф.Т.Кулиева, Э.Б.Агаларовой, А.Г.Гасановой и многих других. В последние годы во всех странах региона проводятся палеосейсмологические исследования по выявлению исторически неизвестных сильных землетрясений и переоценке интенсивности и силы прошлых сильных землетрясений для более надежного прогноза уровня сейсмической опасности территории региона в целом и отдельных его стран.

Первая удачная попытка по созданию летописи землетрясений, происходящих на Армянском нагорье, на основании письменных свидетельств принадлежит арменоведу Карапету Костанянцу, который в 1902 году в городе Тбилиси на армянском языке издал книгу "Летопись трясений на армянской земле". Книга содержит фактические данные о землетрясениях на территории Армении и прилегающих к ней стран начиная с древних времен до 19-го столетия. Сводная обобщенная картина армянских историков о землетрясениях на территории Армянского нагорья за последние два тысячелетия (около 795 землетрясений), как мы уже отметили, приведена в книге В.А.Степаняна, изданная на армянском языке в 1964 в Ереване. Н.К.Карапетян составил полный традиционный каталог 1487 землетрясений, произошедших на территории Армянского нагорья до 1992 года (включая Спитакское землетрясение 1988 года). Каталог содержит все необходимые данные о землетрясениях: дату землетрясения, координаты эпицентра, глубину очага и интенсивность по шкале MSK-64 [37]. На иностранных языках (английском, итальянском) о землетрясениях на территории Армянского нагорья и прилегающих странах сводные каталоги составили Н.Н.Амбрасейс и Р.Д.Адамс [115], М.К.Егиян и В.Г.Каграман [216], Е.А.Гуидобони и Г.Траина [143], М.Берберян [121]. Сейсмологами и инженерами Азербайджана, Армении, Грузии, России, Ирана и Турции, опубликованы сотни монографий, сборники научных исследований и отдельных статей об этих землетрясениях. Они вошли также в каталог землетрясений бывшего СССР, изданный в 1977 году [57], в каталоги землетрясений ( $M \geq 5.5$ ) на территории РА, составленный НССЗ РА [34] и Восточной Ойкумены, составленный В.Г.Трифоновым и А.С.Караханяном [83]. И наконец, в 2006 году сотрудницей ИГИС НАН РА Т.О.Бабаян был составлен "Атлас сильных землетрясений, произошедших на территориях Республики Армения, Арцаха и сопредельных стран от античных времен до 2003 года".



III

Рис 3.1. Распределение очагов землетрясений согласно специальному каталогу для Кавказской тестированной территории [117].



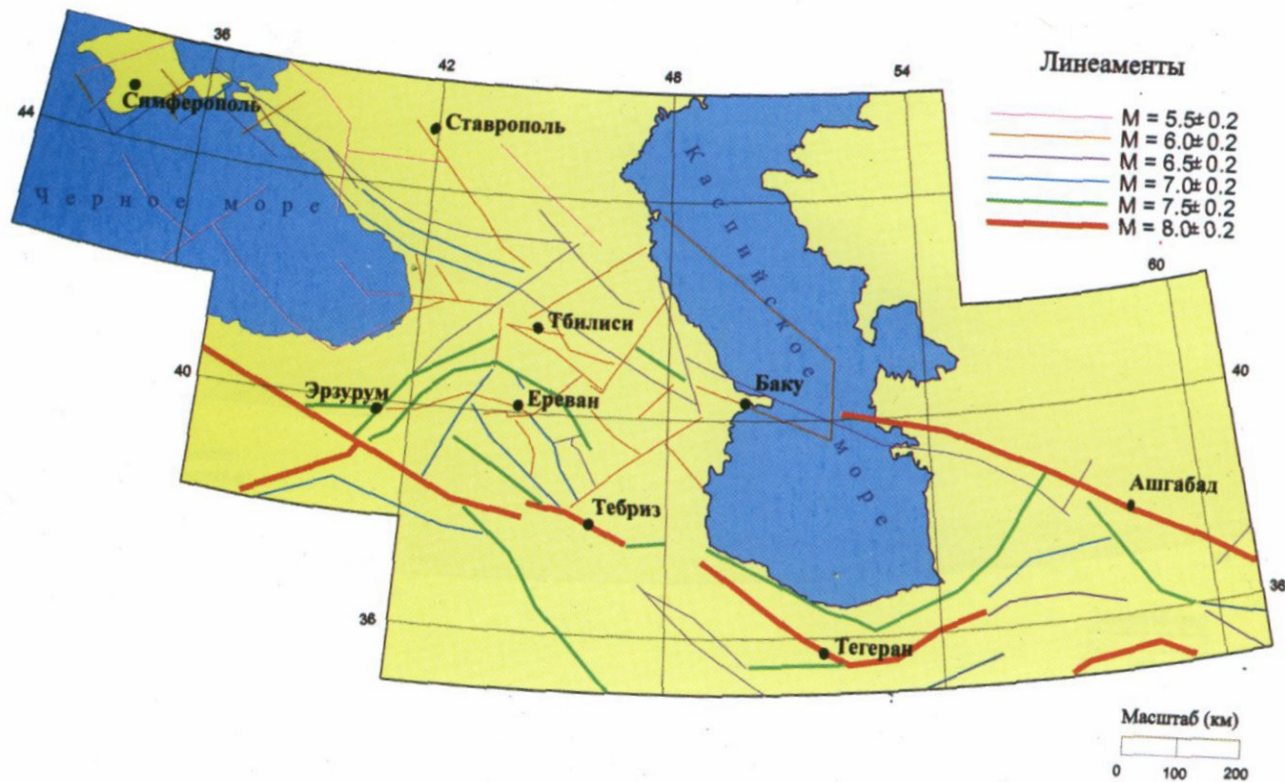


Рис 3.2. Линеаментная модель очаговых зон Кавказского региона [117].

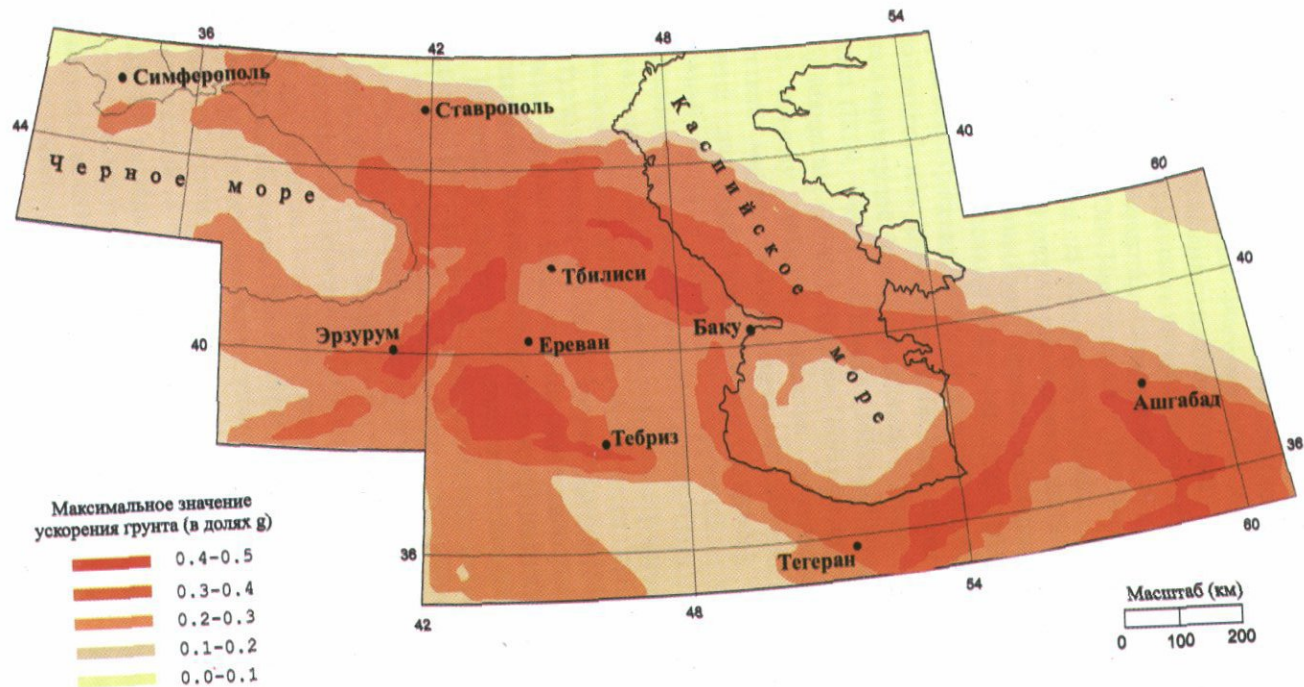


Рис 3.3. Карта сейсмической опасности Кавказского региона. Значение максимального ускорения грунта рассчитано для 50-летнего срока с 10%-ой вероятностью его не превышения (при повторяемости равной 450 лет) [117].



Исходя из вышеизложенного, мы подробно не будем останавливаться на исторических землетрясениях, произошедших на Армянском нагорье. Отметим только основные очаговые зоны нагорья. По мнению ряда специалистов, основными тектоническими узлами возникновения землетрясений на Армянском нагорье являются: Ерзинджанский, Тарон-Васпураканский (Ванский), Арартский, Карс-Ширакский, Сюник-Зангезурский и Юго-Зангезурский. По историческим сведениям наинтенсивный узел по генерации сильных землетрясений является *Ерзинджанский*. Эта территория является наиболее сейсмоопасной и в наши дни. Город Ерзинджан (Ерзика) несколько раз полностью был разрушен от землетрясений в 1045, 1166, 1287, 1668, 1939 годах. При этом магнитуда землетрясения 1939 года достигла 8, которая считается самой большой по сей день для этого региона. Разрушительные землетрясения в регионе с магнитудой более 7 произошли в Тавризе (1042, 1721, 1780гг.), в Гяндже (1139, 1482гг.), Шемахе (1667г.), Салмасе (1930г.), Спитаке (1988г.), Манджиле (1990г.), Кутаиси (1991г.) и других местах.

По нашему мнению, описания летописцами и свидетелями последствий многих землетрясений и особенно описания больших изменений на поверхности Земли (рельефа), наличие массовых разрушений жилья и церковных сооружений и большое количество человеческих жертв свидетельствуют о том, что в указанных выше всех каталогах магнитуда и интенсивность землетрясений скорее понижены, чем завышены. Такое несоответствие оценок сил прошлых землетрясений (магнитуды) отмечают Е.А.Гуидобони и Г.Траина [143], А.А.Никонов [56] и многие другие. Нам кажется эта заниженность магнитуды и интенсивности особенно относится к землетрясениям 735 года в Вайоц Дзоре, 893 года в Двине, 1139 года в Гяндже (Ганзаке), 1827 года в Цахкадзоре, 1840 года на Арарате. Занижение интенсивности было связано с выводом советских сейсмологов о 8-балльном сейсмологическом "потолке" для Большого Кавказа и всего Советского Закавказья.

Еще задолго до и особенно после Спитакского землетрясения ряд сейсмологов (Н.В.Щебалин, В.П.Солоненко, В.С.Хромовских, А.А.Никонов и др.) считали, что такой вывод появился не на научной, а на конъюнктурной основе [56]. В статье [56] А.А.Никонов отмечает, что ему удалось обнаружить несколько забытых источников о землетрясениях в Армении. Согласно ему, неизвестным осталось следующее свидетельство: "Воздвигнутый в память майора Монтрезора монумент недалеко от Амамлы 8 октября 1827 года от землетрясения совершенно разрушился так, что остался только один фундамент (приведено в "Актах, собранных Кавказской археографической комиссией" т.VII, Тифлис 1878, с.324). Селение Амамлы не что иное, как нынешний Спитак. Вот и судите об утверждении, что до 1988 года здесь не было подобных землетрясений 100 лет?", спрашивает А.А.Никонов. Причем сейсмичность большей части территории Северной Армении (Апаран, Варденис, Гагарин,

Калинино, Кировакан, Севан, Спитак, Степанаван, Цахкадзор), которая по картам сейсмического районирования СССР 1969 года имела сейсмичность VIII баллов, *в 1981 году была занижена на 1 балл*, что стало главной причиной больших разрушений в городах Спитаке, Кировакане и Степанаване при Спитакском землетрясении 1988 года.

За последние десятилетия существенно возросло внимание к вопросам землетрясений и сейсмической безопасности общества. Об этом свидетельствуют не только национальные программы по изучению этой проблемы, но, усилия и инициативы различных международных гуманитарных организаций. В частности, в деле новой глобальной оценки сейсмической опасности Земли в целом ООН организовала и финансировала специальную 10-летнюю программу (1990-1999) по снижению ущерба от стихийных бедствий. В рамках этой программы с участием специалистов всех сейсмоактивных стран *была составлена глобальная карта сейсмической опасности Земли* (цветная карта приведена в первой части книги). На рис. 3.1, 3.2 и 3.3 приведены части этой карты для Кавказского региона с прилегающими территориями, разработанные учеными-сейсмологами России, Украины, Грузии, Армении, Azerbaijan, Туркменистана, Италии, Турции, Ирана, Германии и Швейцарии (авторы С.Баласанян, Т.Аширов, Т.Челидзе, А.Гассанов, Н.Кондорская, Г.Молчан, Г.Пустовитенко, В.Трифонов, В.Уломов, Д.Джиардини, Н.Ердик, М.Фафору-Аштиану, Г.Грунтал, Д.Майер-Роза, В.Щенк и М.Стукчи) [117]. На картах показаны распределения мест зарегистрированных очагов сильных и слабых землетрясений с магнитудой от 5 до 7.8, размеры очагов до 1900 года и после него (рис.3.1). На рис.3.2 показаны линии разломов (линеаменты) региона, по которым возможны генерации потенциальных землетрясений с магнитудой от  $5.5 \pm 0.2$  до  $8.0 \pm 0.2$ . Уровень сейсмической опасности различных частей региона, выраженный в максимальных ускорениях грунта в долях  $g$ , вычисленный по вероятностной методике, показан на рис.3.3. *Из карт видно, что вероятностная оценка сейсмической опасности на территории РА по магнитуде не превышает  $M=7.5 \pm 2$ , а по ускорениям грунта –  $0.4g$ .*

### 3.2. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

На территории нынешней Республики Армения за последние два тысячелетия произошли десятки сильных и разрушительных землетрясений. По данным вышеуказанных каталогов, в табл.3.1 приведены основные характеристики наиболее известных землетрясений, их 21.

Ниже, на основании исторических армянских и иностранных источников, приводится краткое описание последствий некоторых из них.



## 1. Землетрясение 21 июля 735 года в Вайоц Дзоре

Землетрясение произошло на плоскогорье между Варденисским и Байкским хребтами (Вайоц Дзорская область РА). Оно продолжалось около 40 дней. Магнитуда землетрясения по вышеуказанным каталогам составляет  $M=7.0$ , интенсивность VIII-X баллов. На поверхности Земли образовались заметные трещины, в горах – обвалы. Погибло 10000 человек, погружаясь в Землю.

Название “Вайоц Дзор” местность получила после землетрясения. “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 горы”. Об этом свидетельствует армянский летописец Степанос Орбелян (13 век), который об этом землетрясении на грабаре (староармянском) написал [143]:

«Ապա յանկարծակի եկաւ ի վերուստ պատուհաս Տեառն. եւ կալեալ խաւար շոշափելի զկաւառն ամենայն զաւուրս 40, եւ շարժումն եւ դողդուճն սաստիկ. զի եռայր երկիրն ահեղ դողացմամբ յանդնդոց եւ բարձրանայր մինչեւ ի վեր. եւ անդէն իբր զալիս ծովու փուլգանիր. լեռինք տապալէին, վեճք ի հիմանց քակտէին, տունք եւ ապարանք գեղեցիկք լինէին գերեզմանք բնակչաց. աղբիւրք խցեցին. գետ կորչէին. եւ ամենայն տեղի երեւոյր տատանմամբ. եւ ծայրք մարդկեղեն բարբառոյ յանդնդոց եւ ի վերուստ յողոց «Վայ ծոր, վայ ծոր». եւ կենդանոյն ընկղմեցան ոգիք 10000 զորս գիտէին եւ թիւ արկին. եւ զանճանօրիցն ոչ ոք գիտէր զհամարն. յազաղս որոյ կոչեցաւ անուն կաւառին Վայոց ծոր.»

Перевод на русский язык вутядит 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 пропости гул поднимался вверх и снова спускался вниз как морская волна. Разрушились и опрокидывались горы, камни вырвались с оснований, дома и аппартаменты 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 [143]:

*“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 himan 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'".

## 2. Землетрясение 27 декабря 893 года в Двине

Землетрясение произошло ночью и за считанные секунды сравняло с землей красавицу-столицу древней Армении – город Двин. Магнитуда и интенсивность землетрясения оцениваются соответственно  $M=7.0$  и  $I=IX$  баллов. Во время землетрясения разрушились тысячи жилых домов, церквей, опрокидывались высотные оградительные стены и дамбы, святые места.

Таблица 3.1

### Землетрясения, произошедшие на территории Республики Армения [34, 37, 57, 77, 83]

|    | Дата землетрясения | Координаты эпицентра |                   | Глубина очага, $h$ (км) | Магнитуда землетрясения ( $M_s$ ) | Интенсивность землетрясения (в баллах) | Место землетрясения |
|----|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|---------------------|
|    |                    | Широта (градусы)     | Долгота (градусы) |                         |                                   |                                        |                     |
| 1. | 139                | 39.8                 | 44.6              | 15                      | 5.7                               | VIII                                   | Арагат              |
| 2. | 21.07.735          | 39.7                 | 45.5              | 16                      | 7.0                               | VIII-X                                 | Вайоц Дзор          |
| 3. | 858                | 40                   | 44.6              | 10                      | 5.5                               | VII                                    | Двин                |
| 4. | 893                | 40                   | 44.6              | 5                       | 7.0                               | IX                                     | Двин                |
| 5. | 906                | 39.7                 | 45.1              | 15                      | 6.1                               | VIII                                   | Вайоц Дзор          |
| 6. | 972                | 40.3                 | 44.1              | 8                       | 5.4                               | VIII                                   | Талиш               |
| 7. | 1132               | 40.5                 | 43.5              | 15                      | 6.0                               | VII-                                   | Ани                 |
| 8. | 1319               | 40.4                 | 43.6              | 16                      | 5.9                               | VIII                                   | Ани                 |
| 9. | 1530               | 42                   | 45.4              | 15                      | 5.7                               | VIII                                   | Алаверди            |
| 10 | 04.06.1679         | 40.1                 | 44.7              | 15                      | 7.0                               | IX-X                                   | Гарни               |
| 11 | 08.10.1827         | 40.5                 | 44.8              | 9                       | 7.0                               | VIII                                   | Цахкадзор           |
| 12 | 02.07.1840         | 39.7                 | 44.4              | 18                      | 7.4                               | IX                                     | Арагат (Акори)      |
| 13 | 18.01.1853         | 40.6                 | 44.9              | 8                       | 4.3                               | VII                                    | Цовагюх             |
| 14 | 22.10.1926         | 40.7                 | 43.7              | 7                       | 6.0                               | VIII-IX                                | Гюмри               |
| 15 | 27.04.1931         | 39.2                 | 46                | 20                      | 6.5                               | VIII-IX                                | Зангезур            |
| 16 | 07.01.1937         | 40.1                 | 44.1              | 10                      | 4.6                               | VII                                    | Ереван              |
| 17 | 03.06.1949         | 40.2                 | 44.2              | 5                       | 4.5                               | VII                                    | Бюракан             |
| 18 | 30.01.1967         | 41.0                 | 44.3              | 7                       | 5.1                               | VII                                    | Спитак              |
| 19 | 09.06.1968         | 39.2                 | 46.2              | 11                      | 5.0                               | VII-                                   | Зангезур            |
| 20 | 07.12.1988         | 40.8                 | 44.2              | 11                      | 7.0                               | IX-X                                   | Спитак              |
| 21 | 18.07.1997         | 41.1                 | 44.9              | 4                       | 4.4                               | VII                                    | Ноемберян           |



По этому землетрясению также имеются многочисленные письменные сведения о его последствиях. В частности, в рукописях историка XI века Товма Арцруни сказано: “Многолюдный, окруженный оградой и преградами с многочисленными торговыми и другими святыми заведениями, этот город с дьявольским лицом и открытым ртом протянул к пропасти людей, дома которых стали собственными кладбищами. Это землетрясение было сильнее, чем землетрясение при католикосе Закария (855-876). Сотрясения дошли до далекой Масличной горы (Mount of Olives в Иерусалиме). Говорят, что число погибших было больше чем 70000”

### **3. Землетрясение 4 июля 1679 года в Гарни**

Землетрясение произошло утром. Это было самое разрушительное землетрясение Арагатского уезда. Разрушились город Ереван, поселки Канакер, Норагавит, Дзорагюх, Норк и много других населенных пунктов. Сотрясению подвергалась обширная территория от востока до запада. В севере они дошли до озера Севан, на юге до Эчмиадзина, Хор-Вирапа. Землетрясение сопровождалось гулом и громом, бурей и песчаным смерчем. На поверхности Земли образовались огромные трещины, в скалах образовались трещины. Скальные берега обвалились и наполнили долины. Некоторые источники закрылись, в других местах появились новые родники. Из трещин вытекали черные водяные струи. Разрушилось большое количество церквей, сельских домов, апартаментов, крепостей, мечетей и каменных мостов. Обвалился прекрасный языческий храм I века Гарнийской крепости, построенный царем Трдатом (восстановлен по обломкам в 1966г). Землетрясение лишило жизни более чем 7600 людей. Афтершоки землетрясения продолжались до конца 1679 года, из которых наисильные произошли 12 июля и 8 сентября. Более подробное описание очевидцев этого землетрясения мы привели в первой части книги.

### **4. Арагатское землетрясение 2 июля 1840 года**

Землетрясение произошло утром. Разрушению подверглась обширная территория площадью около 5 тысяч квадратных километров, включая города Ереван, Нахичеван, Ордубад, Байазет, Тебриз и Александрополь. С места, ниже примерно на 2км от вершины Большого Араката, вырвались огромные куски скальных пород, покрытые льдом и снегом, и обрушились на село Акори и церковь Св.Акопа, полностью оставив их под толстым слоем пород. На поверхности Земли образовалась трещина шириной около 3 метра, из которой извергались большие фантаны жидкости с песком. Закрывались и открывались десятки старых и новых водных источников. В результате землетрясения изменились направление русла реки Аракс, скорость ее движения и глубина воды. Разрушились тысячи жилых домов, церквей, мечетей, крепостей, мельниц в Ереване,

Ордубаде, Нахичеване, Ехегнадзоре, Байазете и в других местах. Число человеческих жертв превышало одну тысячу. Более подробно об этом землетрясении было сказано в первой части книги.

### **5. Землетрясение 22 октября 1926 года в Гюмри**

Первый слабый удар (форшок) произошел днем в 16 часов 04мин. Затем в 16 часов 44мин. произошел первый сильный толчок. Сотрясениям подвергалась средняя часть реки Ахурян и сопредельные территории. Наинтенсивным сотрясениям подвергалась узкая полоса территории от города Гюмри до села Казарапат. В этой полосе до землетрясения предшествовал подземный гул, благодаря чему люди заранее покинули свои дома. Магнитуда землетрясения оценивается в пределах  $M=6.0$ , интенсивность – VIII-IX баллов. Больше всего от землетрясения пострадал город Гюмри (Ленинакан). Эпицентр землетрясения с неглубоким очагом был очень близок к городу. Разрушились более чем 1500 домов. Особенно сильно подверглись повреждениям каменные дома с кладкой системы “мидис”. Разрушились также качественно построенные жилые здания. Ряд памятников продвинулись на 10-20см и подверглись поворотам вокруг своей оси. В 44 деревнях были серьезные повреждения. На поверхности Земли и на склонах холмов образовались трещины. Число жертв достигло 300 человек, 600 были тяжело ранены [60, 77].

### **6. Зангезурское землетрясение 27 апреля 1931 года**

Сильные сотрясения землетрясения ощущались на площади более чем 100000км<sup>2</sup>. Оно произошло днем, в 16 часов 31 мин. Эпицентр находился между селами Ахталан Хуртс и Насерваз. Интенсивность в эпицентральной зоне оценивалась в IX баллов, магнитуда  $M=6.5$ . Полностью или частично разрушились более чем 100 населенных пунктов на территориях Армении и Нахичевана. От землетрясения сильно пострадал Татевский монастырский комплекс, показанный на рис.3.4.

Кстати, во дворе Татевского монастырского комплекса в начале X века была возведена *качающаяся* восьмигранная каменная колонна с декоративными орнаментами (Гавазан-Посох) высотой восемь метров, шарнирно соединенная с грунтом, посвященная Святой Троице. Колонна до сих пор стоит неповрежденной, испытав воздействие множества сильных землетрясений. В.Г.Трифонов и А.С.Караханян [83] считают, что фактически это один из первых сейсмографов маятникового типа: под воздействием сейсмических колебаний грунта он качался с разной амплитудой и по его величине и направлению можно было получить некоторые сведения о землетрясении. По легенде, качающаяся колонна служила также для опережающего оповещения о приближении к монастырю вражеских войск. Колонна начинала интенсивно качаться от шагов приближающихся воинов, создавая тревожную ситуацию.



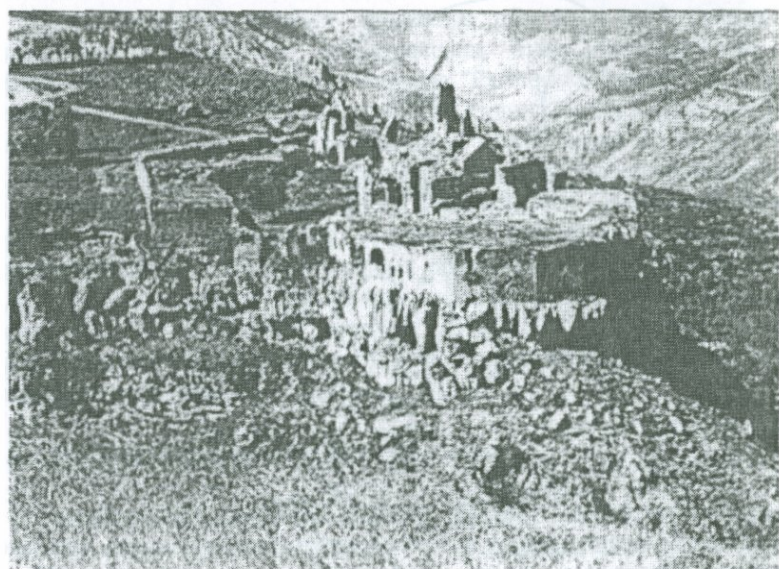
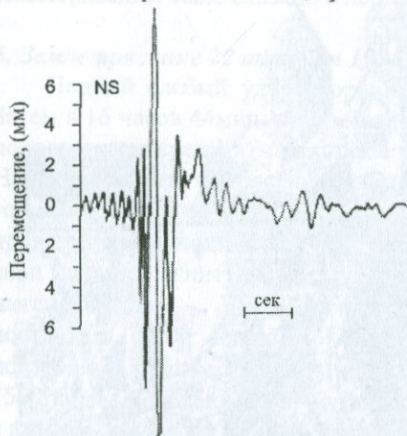


Рис. 3.4. Церковный комплекс Татевы до и после Зангезурского землетрясения 1931г. [218].

а. Сейсмограмма землетрясения, записанная 1-го сентября 1968 года в Каджаране



б. Трещина, образованная на поверхности Земли во время землетрясения 1968г.



г. Изосейсты землетрясения по данным Д.Рустановича и Н.Леонова

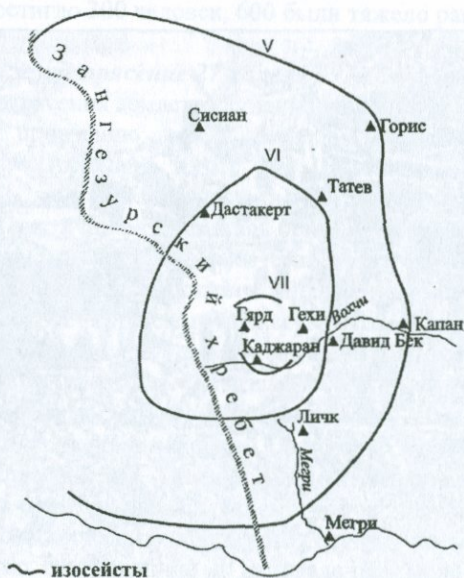


Рис. 3.5. Зангезурское землетрясение 1968 года [69].



## **7. Зангезурское землетрясение 1968 года**

9 июля и 1 сентября 1968 года в Зангезуре произошли 2 землетрясения. Максимальная интенсивность землетрясений оценивается в VIII баллов по шкале MSK-64. Ряд 1-2-этажных каменных зданий старой постройки получил серьезные повреждения. Новые дома не пострадали. Человеческих жертв не было. В эпицентральной зоне (г.Каджаран, с.Гехи) на поверхности Земли образовались мелкие трещины (рис.3.5б) и оползни.

Это единственное землетрясение на территории РА до Спитакского землетрясения, которое подверглось комплексному изучению. Были получены записи грунта во многих местах эпицентральной зоны при втором землетрясении 1 сентября. Одна из таких сейсмограмм показана на рис.3.5а. Максимальное перемещение грунта (полускальное) достигло 11.5мм. Изосейсты землетрясения, по данным Д.Рустановича, показаны на рис.3.5г. По результатам изучения землетрясения была издана специальная монография [64].

## **3.3. СПИТАКСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 7 ДЕКАБРЯ 1988 ГОДА**

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 (1989г.) под названием "Армянское землетрясение – рекогносцировочный доклад" под редакцией Лоринга Уайла и Джона Филсона [134]. Следующий более объемистый труд, содержащий статьи о Спитакском землетрясении специалистов многих стран мира, был опубликован в 1995г. Это были труды Международного семинара, посвященного землетрясению, организованного ЮНЕСКО в мае 1989г. в г.Ереване [198]. Нижеизложенные данные, анализы и иллюстрации в основном исчерпаны из этих двух источников.

### **3.3.1. 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.3.6 [140].

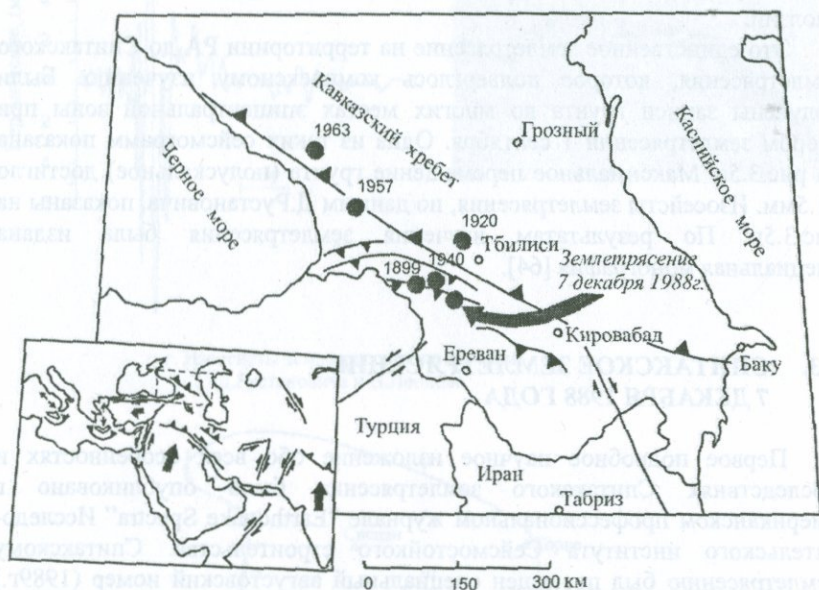


Рис. 3.6. Тектоническое положение Спитакского землетрясения [140].

Локальное тектоническое расположение Спитакского землетрясения показано на рис.3.7, заимствованное из [198]. 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.3.9), 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  $M = 5.6$ , о котором рассказано выше\*.

\* Для удобства читателей в дальнейшем повсюду вместо новых названий городов Гюмри и Ваиадзор приводятся их старые названия Ленинакан и Кировакан.





Рис. 3.7. Расположение Спитакского землетрясения на региональной тектонической карте [198].

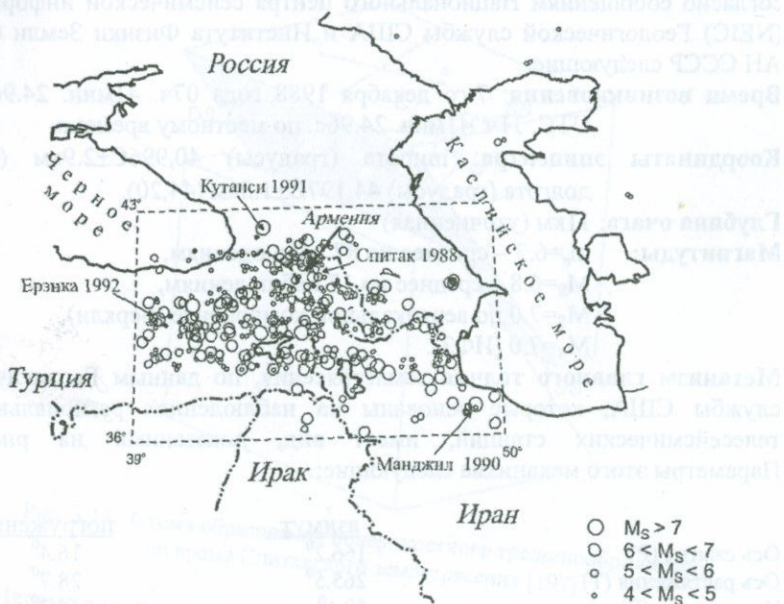


Рис. 3.8. Эпицентры исторических землетрясений на Армянском нагорье и прилегающих территориях с 139г. н.э. до 1992 года [216].

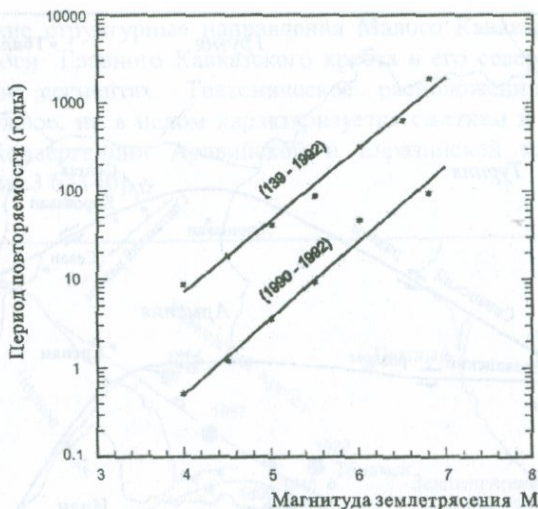


Рис. 3.9. Повторяемость землетрясений на территориях вокруг Спитака со 100км радиусом [216].

Спитакское землетрясение было зарегистрировано сейсмическими станциями по всему миру. Стандартные параметры землетрясения согласно сообщениям 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)  $40,996\text{S} \pm 2.9\text{км}$  (40,92) долгота (градусы)  $44,197\text{W} \pm 1.8\text{км}$  (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 телесейсмических станций, имеет вид, показанный на рис.3.10. 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)            | $308.0^0$     | $8.0^0$           |



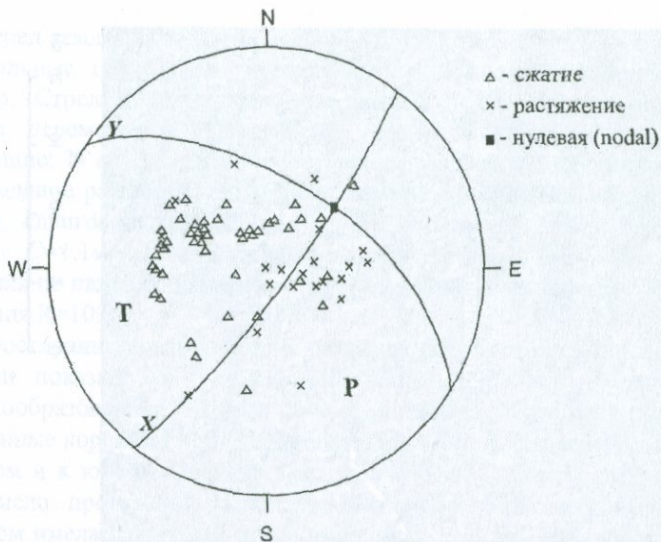


Рис. 3.10. Фокальный механизм очага Спитакского землетрясения [140].

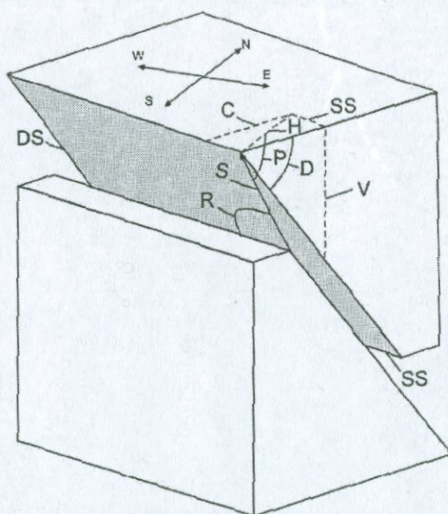


Рис. 3.11. Схема образования поверхностного трещинообразования во время Спитакского землетрясения [197].

Параметры плоскости разлома, по данным инверсии объемных и поверхностных волн [140] и геологических измерений на месте максимального смещения по поверхностному обнажению разлома, показаны на рис.3.11 [134, 197].

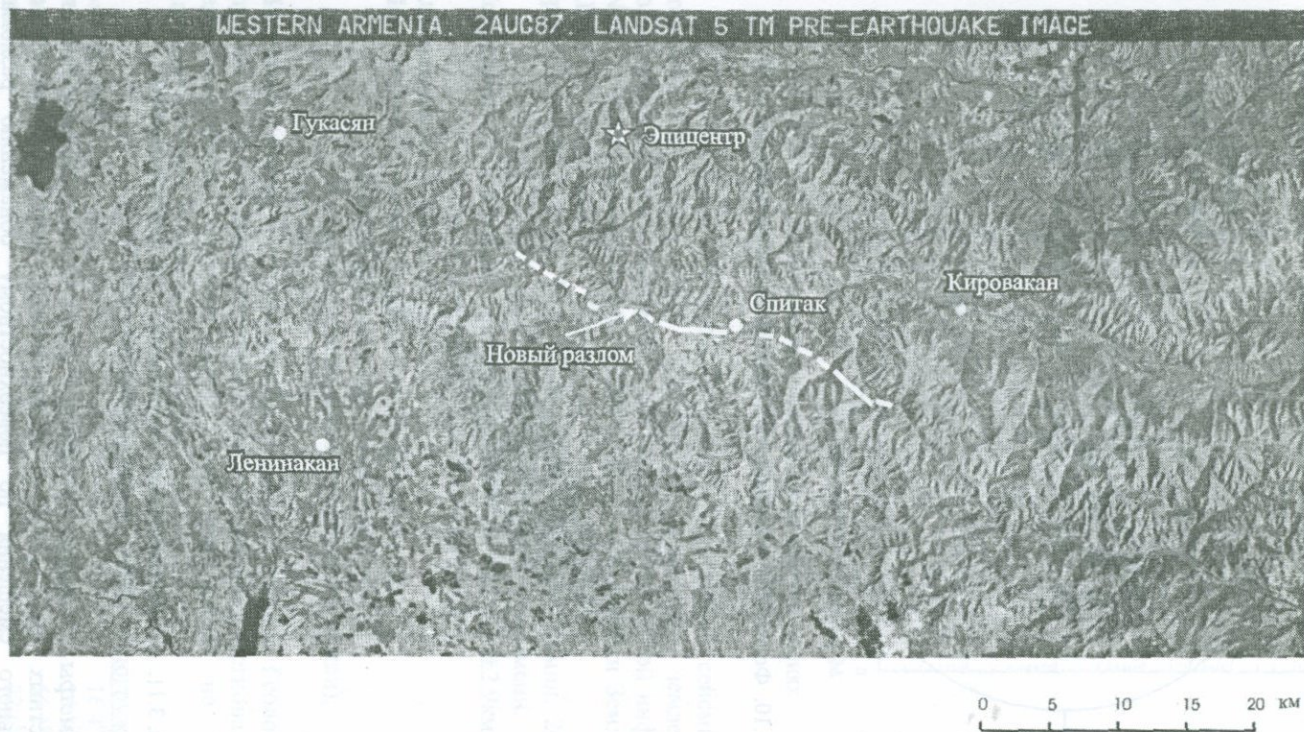


Рис. 3.12. Простираение поверхностного разрыва (разлома) во время Спитакского землетрясения [216].



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  $S=2$ м, вертикальная компонента  $V=1.6$ м, сдвиговая компонента  $SS=0.5$ м (правосторонняя), компоненты сжатия  $C=1.1$ м, горизонтальная компонента  $H=1.2$ м, компонента смещения по падению  $DS=1.9$ м, угол погружения смещения  $P=53^{\circ}$ , наклон смещения  $R=109^{\circ}$ .

Простирание поверхностных разрывов (местами прерывист) белыми линиями показано на рис.3.12 (Ландсат) [197, 216]. 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 37км. 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. 3.13 показан уступ разлома в зоне максимального взброса на участке между Спитаком и Гехасаром высотой около 2 метров.



Рис. 3.13. Уступ, образованный в окрестностях села Гехасар во время Спитакского землетрясения [84].

По исследованию [197], коренная порода вне зоны сдвигового смещения (подвижки) проявила себя как жесткий блок с небольшой внутренней деформацией.

По утверждению Истейбука, Паченко и Набелека [134], 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 4сек в 15км к юго-востоку от первого, а третье произошло через 10сек в 30км к западу от первого подсобытия, т.е. *в сторону Ленинакана*. Эти результаты указывают на то, что главный толчок по своей природе был очень сложен и мог образовать разрыв, по крайней мере, на двух сегментах [134].

**Сейсмический момент и энергия землетрясения.** Согласно уточненным данным [213], принимая длину поверхностного разрыва  $L=38\text{км}$ , глубину очага  $h=11\text{км}$ , среднее значение относительной подвижки спаренных блоков  $1.22\text{м}$  и для модуля сдвига  $G=3\cdot 10^{11}\text{дин/см}^2$  для *сейсмического момента* Спитакского землетрясения, получим

$$M_0 = FG\bar{u} = LhG\bar{u}. \quad (3.1)$$

Подставляя соответствующие значения, 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 формуле (1.96) будет:

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7 = 6.75, \quad (3.2)$$

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

**Энергия** Спитакского землетрясения, как мы уже вычислили в первой главе, составила

$$\lg E = 11.8 + 1.5M = 11.8 + 1.5\cdot 6.8 = 22$$

$$E = 10^{22}\text{эрг} = 10^{15}\text{джоуль}.$$

**Энергетический класс** землетрясения –  $k=15$ .

### 3.3.2. 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.3.2 [140]. В таблице  $m_s$  – 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 было отмечено в первой части книги, 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 27мин. Этот форшок ощутили жители Ленинакана и был зафиксирован в Ленинанканской сейсмической станции.

Таблица 3.2

| Дата       | Время возникновения по UTC |      |      | Магнитуда, $m_b$ | Источник | Магнитуда, $M_S$ | Источник      |
|------------|----------------------------|------|------|------------------|----------|------------------|---------------|
|            | час                        | мин. | сек. |                  |          |                  |               |
| 06.12.1988 | 15                         | 27   | 06.9 | 3.0              | ИФЗ      |                  |               |
| 07.12.1988 | 07                         | 41   | 25.0 | 6.3              | NEIC     | 7.00             | Н.К.Карапетян |
| 07.12.1988 | 07                         | 45   | 46.0 | 5.9              | NEIC     | 6.25             | - " -         |
| 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             | - " -         |

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. 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.3.2, 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.

Схема географического расположения главного толчка и афтершоков, происходящих в первые часы и дни, показана на рис.3.14.

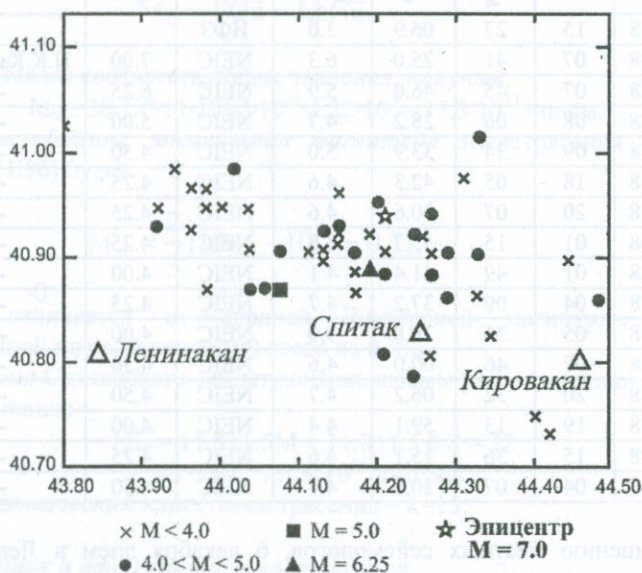


Рис. 3.14. Расположение эпицентров афтершоков, происходящих в течение первых 24 часов после главного толчка [37, 124].

Географическое расположение всех ощутимых афтершоков и их проекции на плоскости разрыва главного толчка показаны на рис.3.15 [127а, 198, 216].

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.



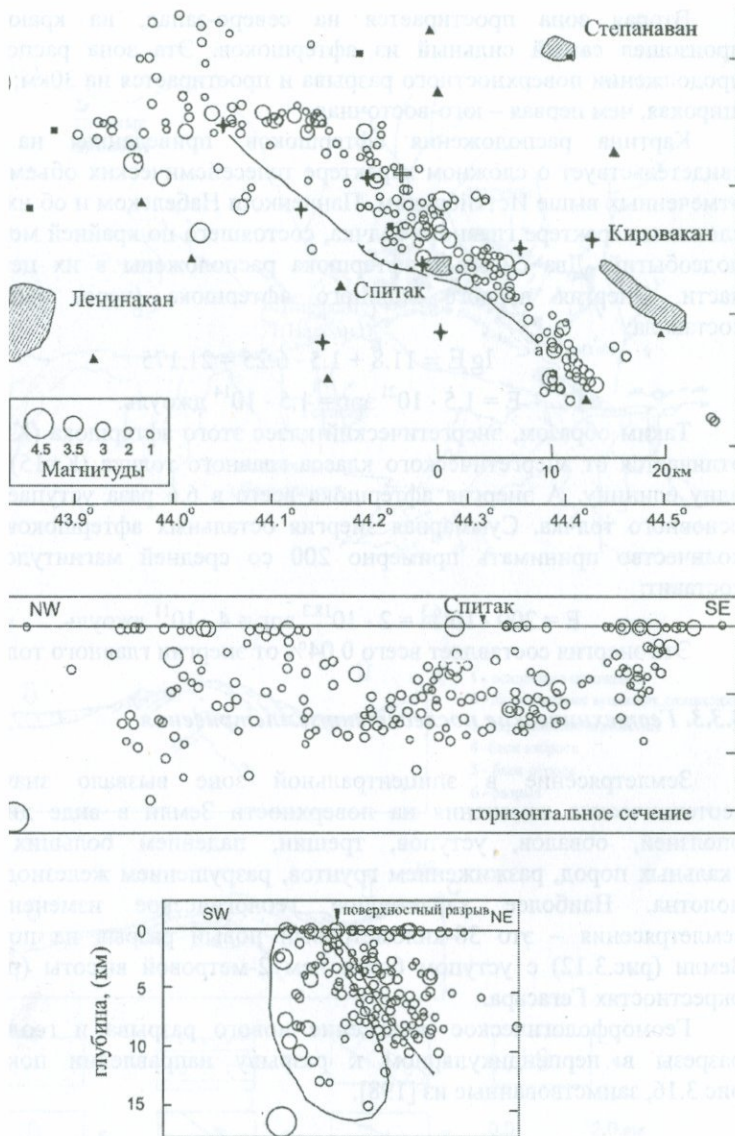


Рис. 3.15. Расположение афтершоков [127а, 198, 216]  
гическое расположение эпицентров,  
я гипоцентров на плоскости разрыва,  
гры в зоне плоскости, перпендикулярной поверхностному разрыву.

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.3.15, 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 21сек) 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. 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.

### 3.3.3. 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.3.12) с уступом более чем 2-метровой высоты (рис.3.13) в окрестностях Гегасара.

Геоморфологическое положение нового разрыва и геологические разрезы в перпендикулярном к разрыву направлении показаны на рис.3.16, заимствованные из [198].



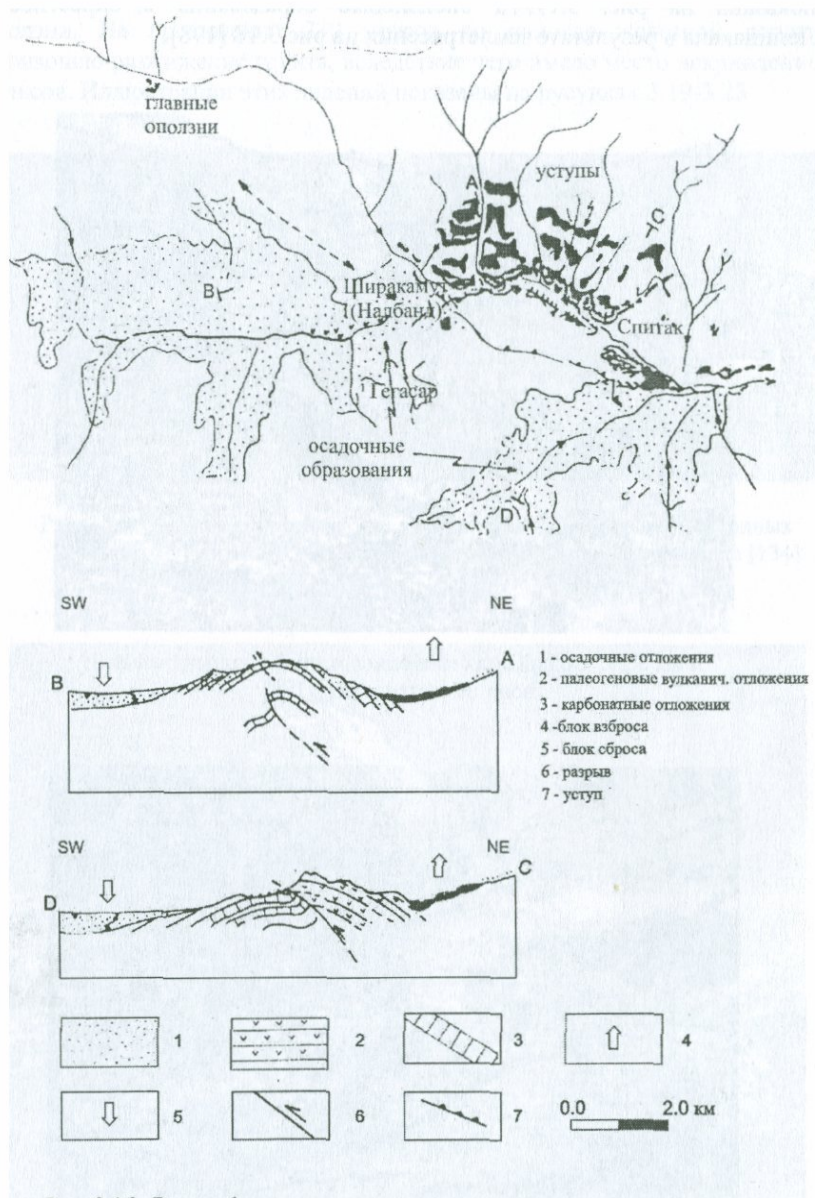


Рис. 3.16. Геоморфологическое положение поверхностного разрыва, образованного при Спитакском землетрясении и геологические разрезы в перпендикулярном к нему направлении [198].

Общая картина сейсмодислокаций в эпицентральной зоне около Спитака показана на рис. 3.17, а оползневые образования в окрестностях Ленинакана в результате землетрясения на рис.3.18 [198].



Рис. 3.17. Общий вид сейсмодислокаций в эпицентральной зоне землетрясения [198].



Рис. 3.18. Оползни в западной части города Ленинакана, образованные из-за землетрясения [198].



На проезжих частях дорог образовалось большое количество продольных трещин шириной до 40-50см, 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 3.19-3.23.



Рис. 3.19. Оползание туфовых пород около Спитака [134].

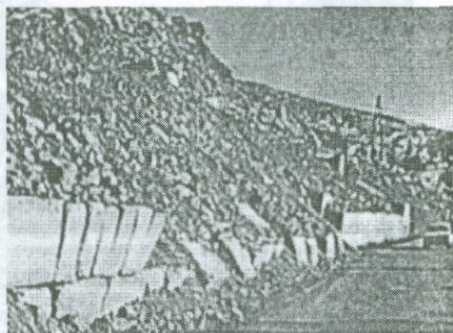


Рис. 3.20. Обвалы железобетонных подпорных стен около Спитака [134].



Рис. 3.21. Оползание-перемещение вулканических туфовых пород в западной части Спитака [134].



Рис. 3.22. Повреждения железной дороги около станции Налбанд [216].



Рис. 3.23. Трещины, образованные в проезжей части дорог [216].



О всех этих явлениях более подробные сведения можно найти во многих научных сборниках, посвященных Спитакскому землетрясению [82, 84, 134, 198, 216]. Такими материалами очень богат объемный сборник (530стр.) докладов, участников Международной научной конференции, посвященной годовщине Спитакского землетрясения, состоявшейся 23-26 мая 1989 года в городе Ереване, организованной UNESCO [198].

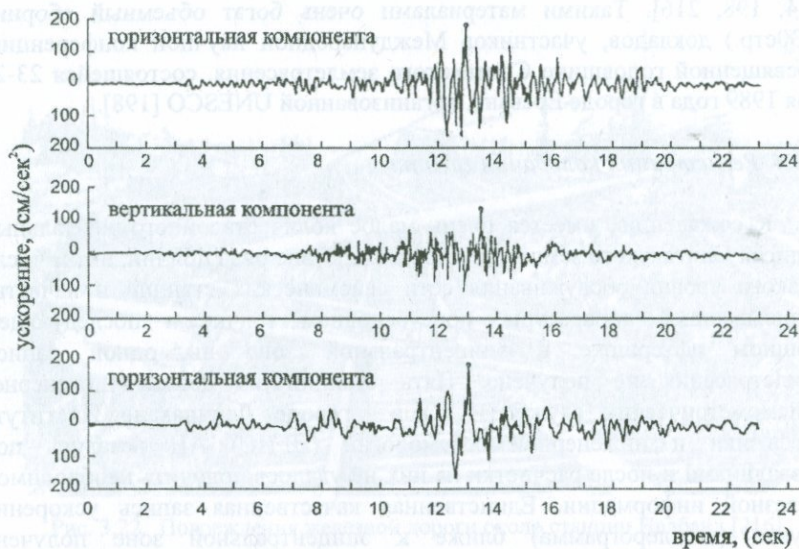
### 3.3.4. Регистрация колебания грунта

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 33км от эпицентра главного толчка трехкомпонентным акселерографом ССРЗ с собственным периодом колебаний 0.05сек (СССР). Акселерограф регистрировал как все три компонента главного толчка, так и афтершока (рис.3.24) [15, 44, 130, 134].

Максимальное горизонтальное ускорение грунта в Гукасяне при главном толчке достигло 0.21g, а вертикальное – 0.15g, при первом афтершоке – соответственно 0.15g и 0.05g. Ускорение колебания грунта было записано также в Ереване на расстоянии около 100км на ИСС N3 АрмНИИСА (ул.А.Аветисяна, 1, андезиты-базальты).

Запись осуществлялась сейсмоприемником ОСП (с собственным периодом колебания 0.15сек), настроенным на автоматическое включение и запись в течение 40-50сек. 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.3.25. Максимальное ускорение грунта при главном толчке составило около 60см/сек<sup>2</sup>.

## Основной толчок



## Первый афтершок

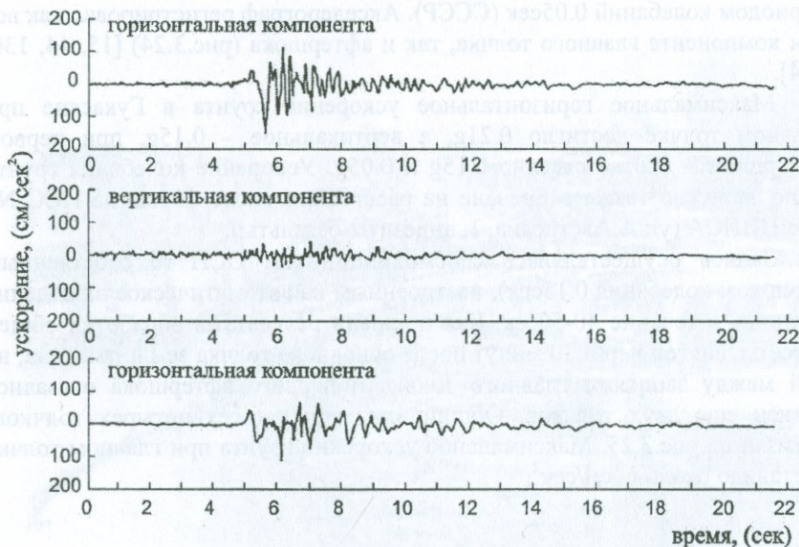


Рис. 3.24. Акселерограммы основного толчка и первого афтершока Спитакского землетрясения, записанные в Гукасяне (Апоцк).



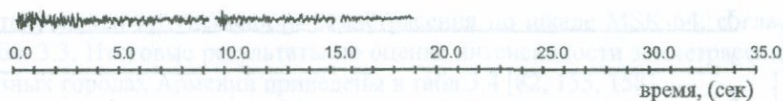


Рис. 3.25. Запись ускорения грунта в Ереване (коренные базальты) при главном толчке и последующих афтершоках [94].

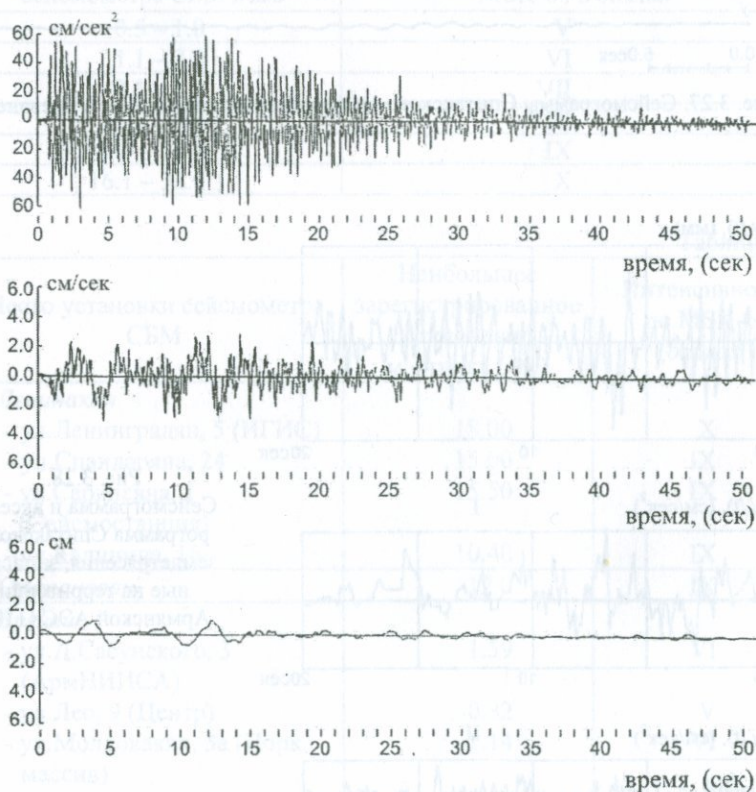


Рис. 3.26. Акселерограмма Спитакского землетрясения, записанная в Ереване (главным толчок) и соответствующие велесограммы и акселерограммы, полученные путем двойного интегрирования (Kazuhiko Kawashima, PWRI, Japan).

Методом интегрирования этой акселерограммы были получены также велисограмма и сейсмограмма грунта в Ереване при главном толчке (рис.3.26). Их максимальные значения составили соответственно 3см/сек и 0.9см. В Ереване на ИСС N2 (аллювий) и ИСС N5 (валуно-галечник) АрмНИИСА сейсмоприемником СМ-3 непосредственно были записаны также смещения грунта. Они показаны на рис.3.27.

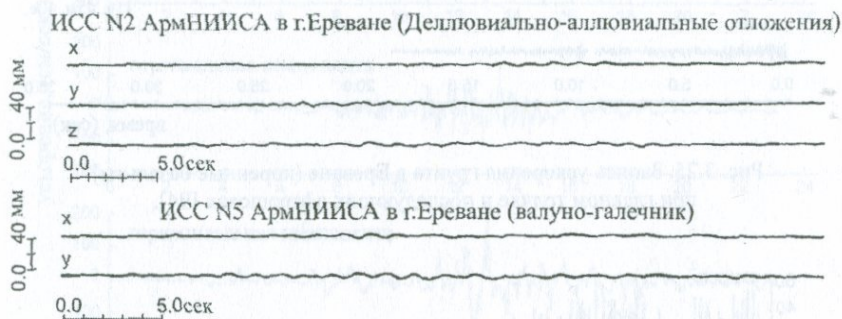


Рис. 3.27. Сейсмограммы Спитакского землетрясения, записанные в Ереване.

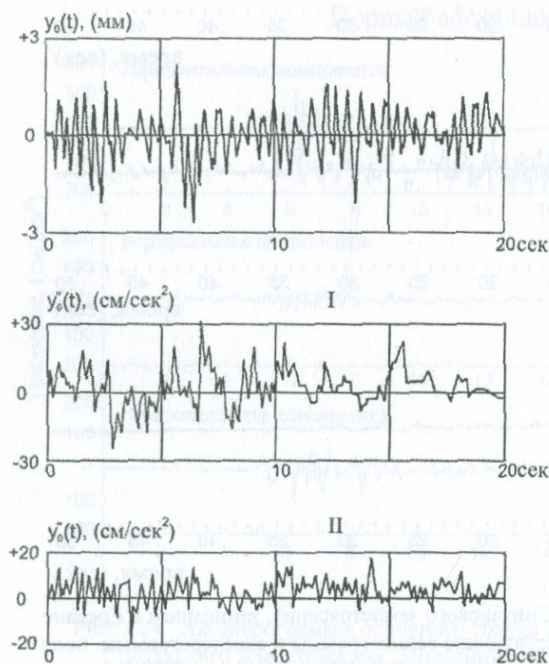


Рис. 3.28.  
Сейсмограмма и акселерограмма Спитакского землетрясения, записанные на территории Армянской АЭС [118].



Максимальное смещение грунта достигло 3.5мм ИСС N5. Кстати, пользуясь определением магнитуды, как значения десятичного логарифма от перемещения грунта (см.формулу 1.90) на расстоянии 100км (Спитак-Ереван), получим:

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

Спитакское землетрясение было записано также сейсмометром СБМ (сейсмометр балльности, период свободных колебаний – 0,25, декремент затухания – 0,5). Показания сейсмометра СБМ являются основанием для установления интенсивности землетрясения по шкале MSK-64, согласно табл. 3.3. Итоговые результаты по оценке интенсивности землетрясения в разных городах Армении приведены в табл.3.4 [82, 155, 158].

Таблица 3.3

| Отклонения маятника<br>сейсмометра СБМ в мм | Интенсивность землетрясения по<br>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                                                 |

Таблица 3.4

| Место установки сейсмометра<br>СБМ    | Наибольшее<br>зарегистрированное<br>отклонение<br>маятника (мм) | Интенсивность<br>по MSK-64<br>(баллах ) |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <i>г.Ленинакан</i>                    |                                                                 |                                         |
| - ул.Ленинградян, 5 (ИГИС)            | 18.00                                                           | X                                       |
| - ул.Спандаряна, 24                   | 15.00                                                           | IX                                      |
| - ул.Саркисяна, 1<br>(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<br>(АрмНИИСА)    | 1.59                                                            | VI                                      |
| - ул.Лео, 9 (Центр)                   | 0.82                                                            | V                                       |
| - ул.Молдовакан, 3а (Норк.<br>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                                       |

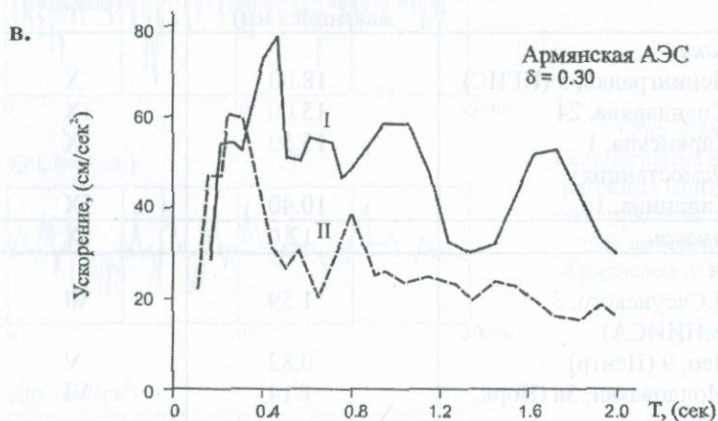
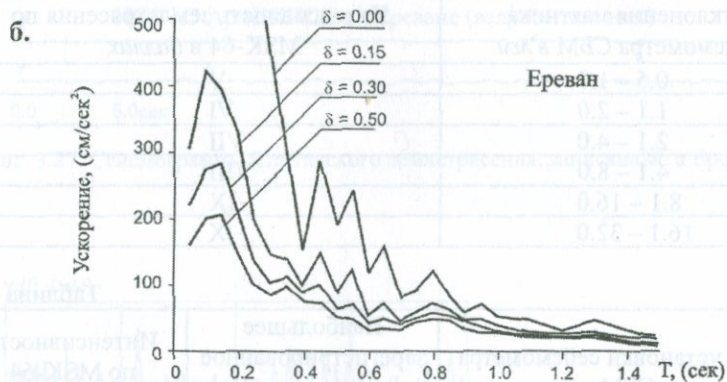
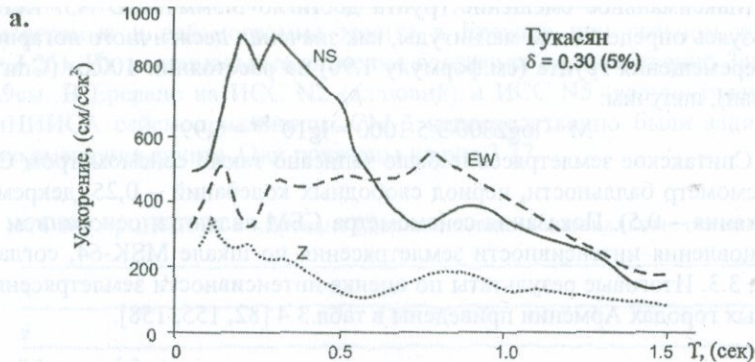


Рис. 3.29. Спектры реакции Спитакского землетрясения.



На рис.2.30 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 [44, 155, 158]. 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.3.31.

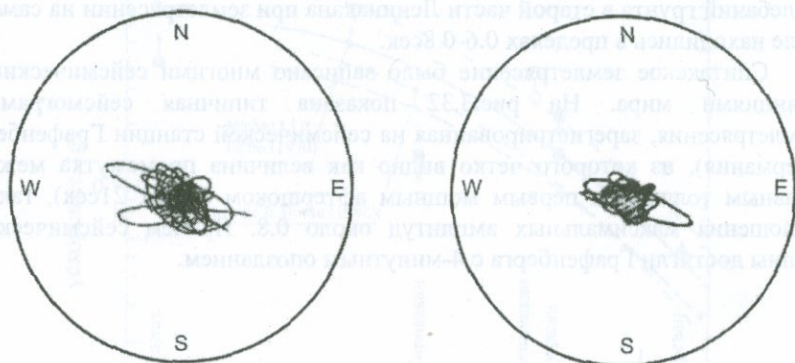


Рис. 3.30. Записи сейсмометра СБМ, полученные в Ленинакане.

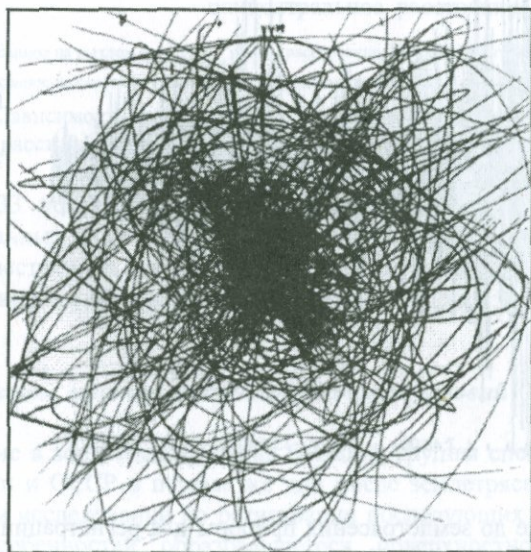


Рис. 3.31. Запись маятника с периодом 0.8сек маятникового сейсмометра ИГИС, полученная в Ленинакане.

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 (0.8с) к величине преобладающего периода колебания грунта во время землетрясения. Об этом свидетельствует также запись (рис.2.30) сейсмометра СБМ, установленного рядом в том же месте, маятник которого с периодом 0.25сек совершил всего 1-2 колебания с максимальной амплитудой.

Как было указано во II части книги, преобладающие периоды колебаний грунта в 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.3.32 показана типичная сейсмограмма землетрясения, зарегистрированная на сейсмической станции Графенберг (Германия), из которого четко видно как величина промежутка между главным толчком и первым мощным афтершоком (4мин. 21сек), так и отношения максимальных амплитуд около 0.8. Причем сейсмические волны достигли Графенберга с 4-минутным опозданием.

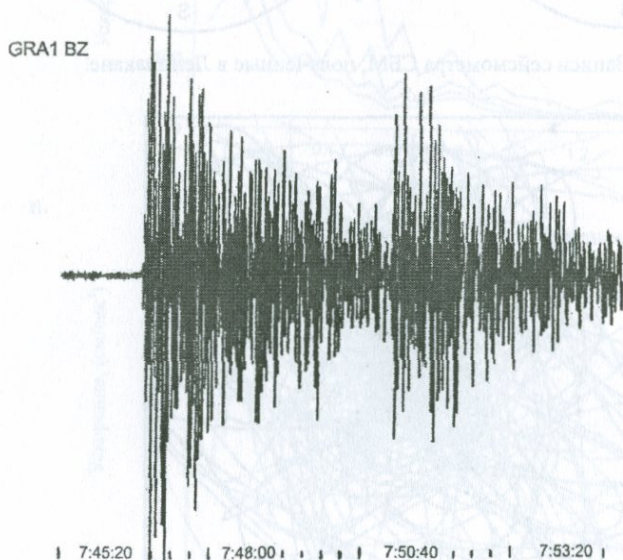


Рис. 3.32.  
Сейсмограммы  
Спитакского  
землетрясения,  
записанные на  
станции  
Графенберг  
(ФРГ).

В Спитаке до землетрясения приборы для регистрации землетрясения не были устроены. Косвенные оценки максимального ускорения грунта в Спитаке по различным эмпирическим формулам и по расчетам по опрокидыванию надгробных памятников были даны различными



специалистами [134, 145, 151, 166, 198, 216]. Они показывают, что величина ускорения грунта в Спитаке могла быть от 0.8g до 1.0g. Аналогичные оценки для Ленинакана – 0.47-0.53g, Степанавана – 0.46g, Кировакана – 0.40g. Значения нормативных ускорений грунта до землетрясения были приняты: для Спитака – 0.1g, Ленинакана – 0.2g, Степанавана и Кировакана – 0.1g [75a]. По новым нормам Армении ускорение грунта для всех 4-х городов принято равным 0.4g [75].

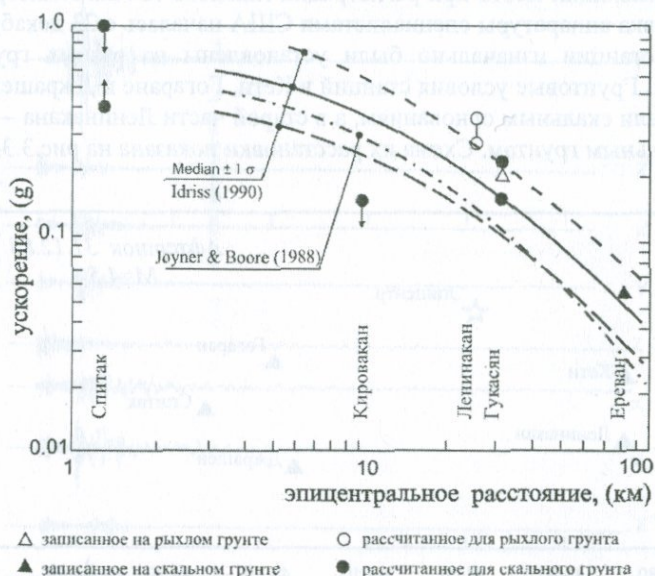


Рис. 3.33. Зависимость величин ускорения грунта от эпицентрального расстояния при Спитакском землетрясении [216].

На рис.3.33 показан график затухания ускорений по результатам зарегистрированных и вычисленных значений ускорений для различных городов на расстояниях до 100км. Там же для сравнения приведены известные кривые затухания Джорнера и Бура и Идрис, заимствованные из [216].

### 3.3.5. 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 Ленинакана – слабым аллювиальным грунтам. Схема их расстановки показана на рис.3.34.

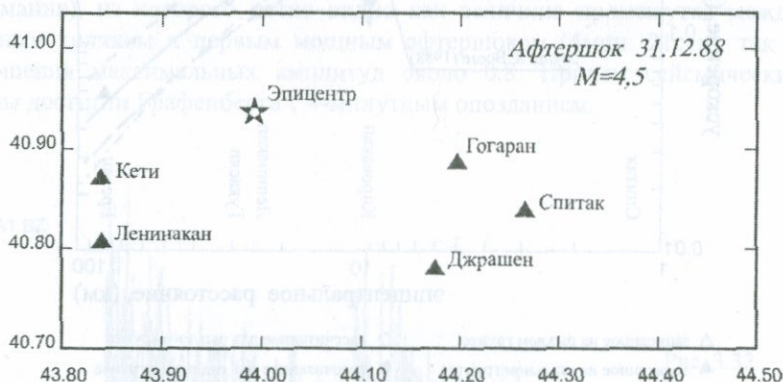


Рис. 3.34. Расположение временных сейсмических станций во время афтершока 31.12.1988 года.

На рис. 3.35, 3.36 и 3.37 показаны трехкомпонентные акселерограммы, велисограммы и сейсмограммы, записанные на четырех пунктах регистрации – Ленинакана, 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  $43^{\circ}58'В$  (велисограммы и сейсмограммы получены путем интегрирования акселерограммы). От эпицентра эти станции имеют почти одинаковое расстояние. В табл.3.5 приведены результаты регистрации и интегрирования [124].

Данные табл. 3.5 показывают, что перемещения грунта в Ленинакане 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 Ленинакане с учетом гипоцентрального расстояния в 1.5 раза больше, чем в Гогаране и Джрашене и, наоборот, в два раза меньше, чем в селе Кети.



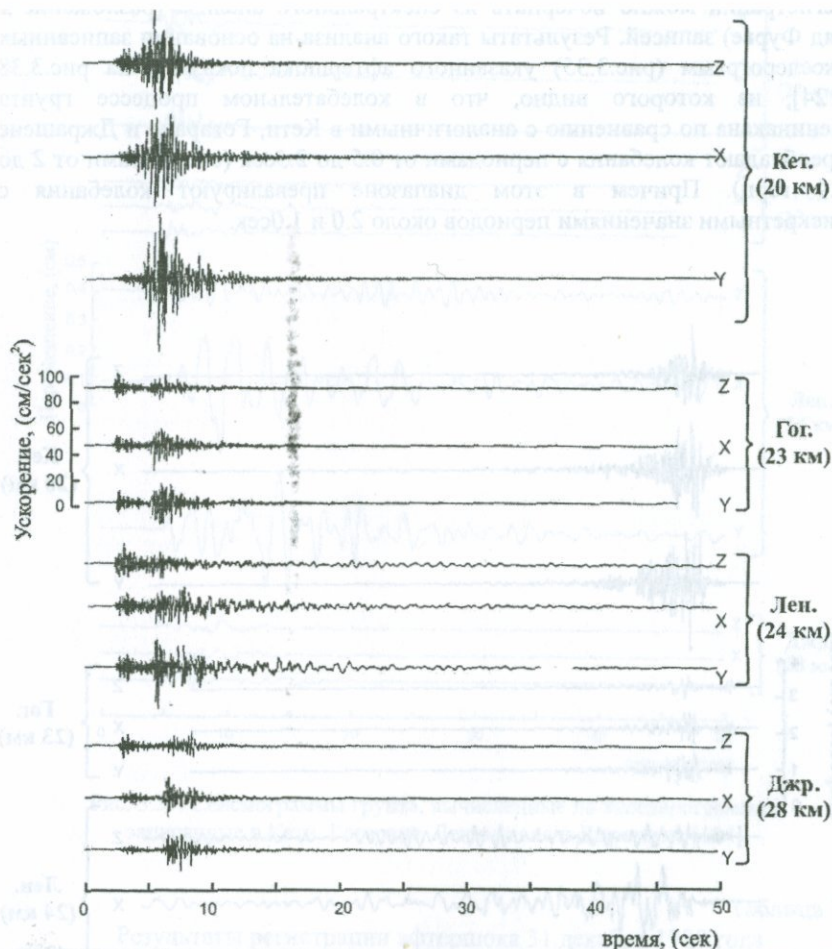


Рис. 3.35. Акселерограммы грунта, записанные в Кети, Гогаране, Ленинакане и Джрашене во время афтершока 31.12.1988 года [124].

Аналогичные результаты, когда ускорение грунта на скальных участках было больше, чем на аллювиальных участках (при небольших эпицентральных расстояниях до 50км), были зарегистрированы и при других землетрясениях [59, 93]. Наиболее отличительным признаком приведенных записей является то, что продолжительность колебаний грунта (по акселерограмме, велисограмме и сейсмограмме) в Ленинакане в два раза больше, чем в Кети, Гогаране и Джрашене. 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.3.35) указанного афтершока показаны на рис.3.38 [124], 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 2.5сек (с частотами от 2 до 0.4 герц). Причем в этом диапазоне превалируют колебания с дискретными значениями периодов около 2.0 и 1.0сек.

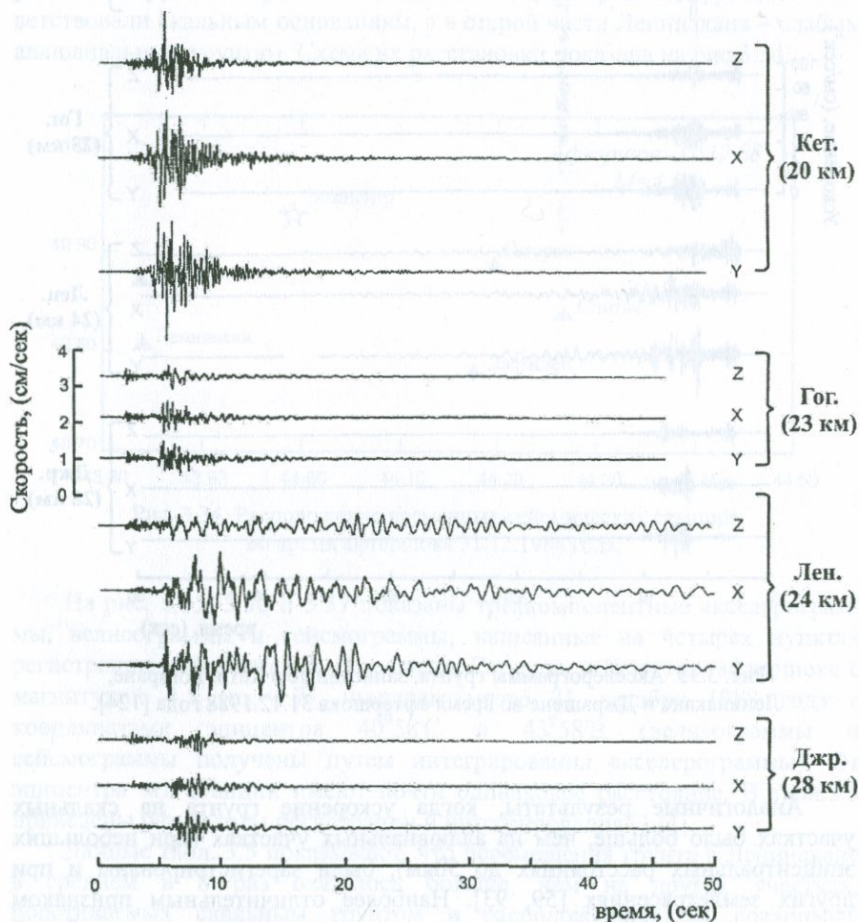


Рис. 3.36. Велисограммы грунта, вычисленные по акселерограммам, записанным в Кети, Гогаране, Ленинакане и Джрашене [124].



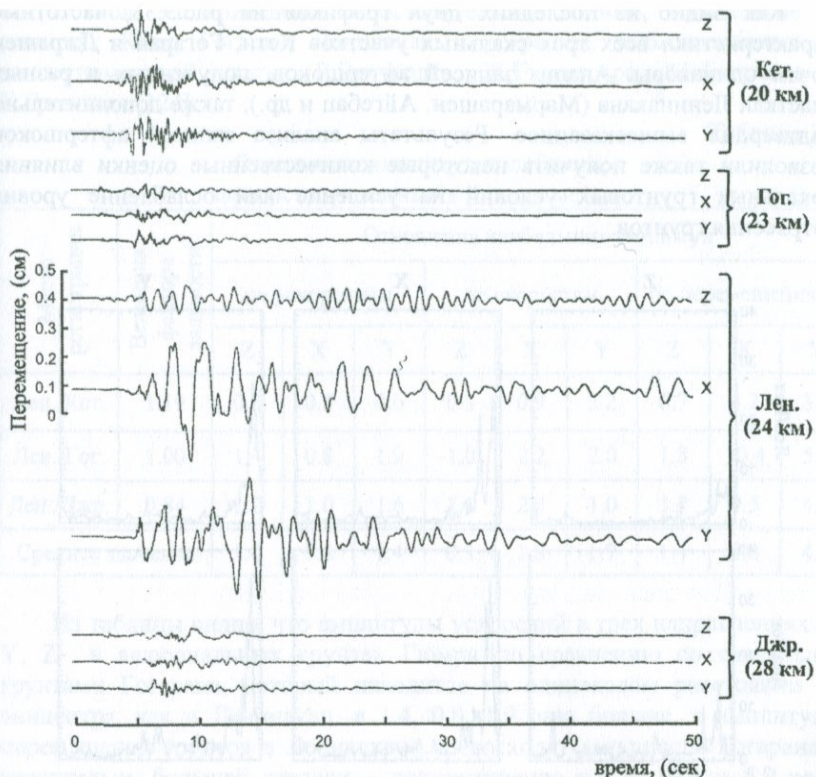


Рис. 3.37. Сейсмограммы грунта, вычисленные по акселерограммам, записанные в Кети, Гогаране, Ленинакане и Джрашене [124].

Таблица 3.5

Результаты регистрации афтершока 31 декабря 1988 года

| Станция<br>регистрации | Гипоцентральное<br>расстояние (км) | Максимальные значения                      |    |    |                             |     |     |                            |       |       |
|------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|----|----|-----------------------------|-----|-----|----------------------------|-------|-------|
|                        |                                    | Ускорение<br>грунта (см/сек <sup>2</sup> ) |    |    | Скорость<br>грунта (см/сек) |     |     | Перемещение<br>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 | 0.070 |
| Гогаран                | 23.5                               | 12                                         | 18 | 16 | 0.4                         | 0.5 | 0.5 | 0.028                      | 0.024 | 0.037 |
| Ленинакан              | 23.6                               | 17                                         | 15 | 31 | 0.4                         | 1.1 | 1.0 | 0.050                      | 0.250 | 0.220 |
| Джрашен                | 28.2                               | 12                                         | 13 | 16 | 0.3                         | 0.4 | 0.7 | 0.025                      | 0.022 | 0.042 |

Как видно из последних двух графиков на рис.3.38, 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.

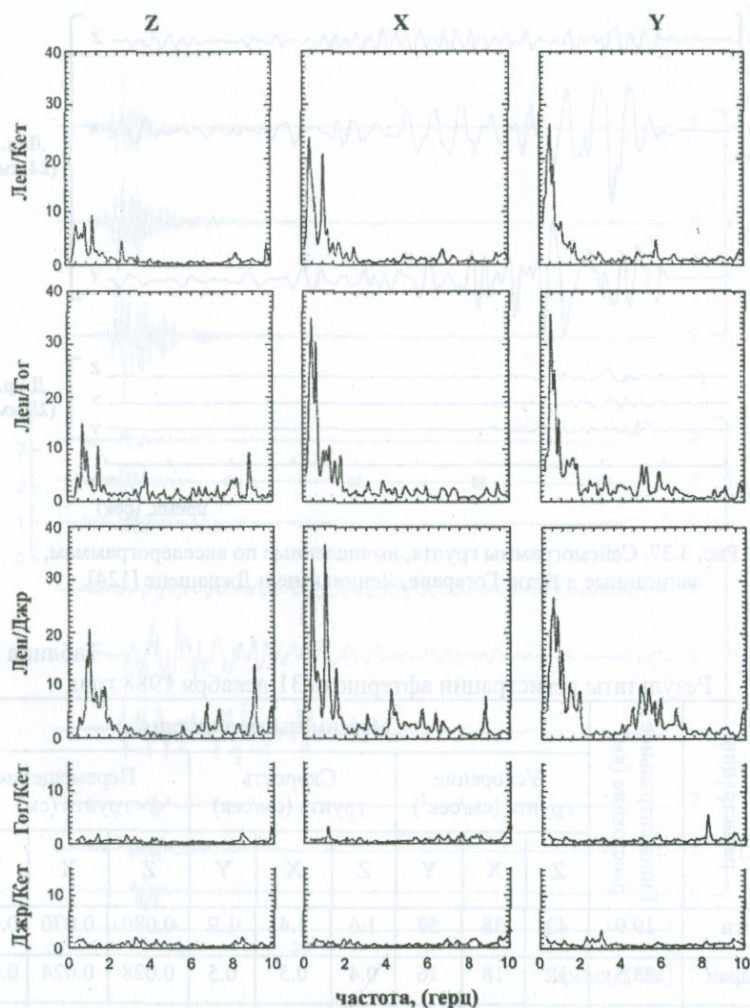


Рис. 3.38. Сравнительные спектральные анализы вертикальных (Z) и горизонтальных (X, Y) акселерограмм грунта, зарегистрированные в Кети, Гогаране, Лениакане и Джрашене от афтершока 31.12.1988 года [124].



В табл. 3.6 приведены сопоставительные данные, полученные на станциях Кети, Гогаран, Ленинакан и Джрашен, заимствованные из вышеупомянутой статьи Р.Боччердта, Ж.Гласстоера, М.Андревса и Е.Гранника [124].

Таблица 3.6

Отношения амплитуд колебаний,  
зарегистрированные в разных местах

| 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 Ленинакан, в 1.4, 0.8, 1.9 раза больше, а амплитуды перемещений грунтов в Ленинакане 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. 3.6 с учетом геологических особенностей грунтовых условий станций приводится в упомянутой статье [124].

### 3.3.6. 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, Ленинакане и Кировакане. Их расстояния от зоны разрыва соответственно составляли: 1-9км для Спитака, 32км для Ленинакана и 25км 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. Ленинакан расположен на обширной аллювиальной равнине. Региональные геологические разрезы указывают на то, что он находится в бассейне с осадочными образованиями, достигающими глубин 3-4км. Близкие к поверхности геологические разрезы, согласно данным Геологического управления Армянской ССР, показывают мощные слои аллювия (пески, глина, гравий, суглинки, озерные отложения), простирающиеся до глубины 300-400м под большей частью города Ленинакана. Кроме того, Кировакан расположен на узкой долине прямо напротив высоких гор, а Ленинакан – в широкой котловине [124, 134, 140].

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 ущелей, 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.

Из общего числа современных многоэтажных зданий обрушились или сильно пострадали в Спитаке 87%, в Ленинакане 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



Ленинакан. 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 2.5сек. К таким выводам привели и многочисленные измерения и анализ микросейсмических колебаний грунтов в городах Ленинакан, Спитак и Кировакан, произведенные непосредственно после землетрясения группой японских специалистов [166, 198, 205]. Согласно этим измерениям, преобладающие периоды колебаний грунтов в Ленинакане составили 0.5-0.6сек (приведенные во втором разделе расчеты свидетельствуют, что эти значения периодов соответствуют второй форме колебания грунтовой толщи), в Спитаке – 0.2-0.3сек, в Кировакане – 0.2-0.4сек. 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, 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. Что касается 9-этажных крупнопанельных зданий в Ленинакане, то кроме других известных преимуществ, их периоды (0.34сек) 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 (0.8g), 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 30сек 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 30км к западу от первого события, т.е. на расстоянии всего 10-12км от Ленинакана. Это означает, что эпицентрального расстояния (при третьем подсобытии) для Ленинакана было не 32км, как отмечено выше, а 10-12км

и, наоборот, эпицентрального расстояния для Кировакана при этом событии было не 25км, а примерно 40км.

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 111 и двух крупнопанельных зданий серии AI-451КП, в Кировакане четырех каменных (поврежденных), зданий серии 111 (поврежденных) и в Ленинакане одного крупнопанельного (поврежденного) здания. После землетрясения в центральной части Ленинакана не оказалось неполностью разрушенных зданий серий IA-451 и 111 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 0.295сек, поврежденных (в Кировакане) 0.461сек, неповрежденных 9-этажных серии 111 – 0.578сек, поврежденных – 0.886сек, неповрежденных 9-этажных крупнопанельных – 0.382сек, поврежденных (в Ленинакане) – 0.430сек. Сводные результаты сравнительного анализа приведены в табл.3.8 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 [75].

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.3.39 показана одна из схем изосейст, составленная группой советских и иностранных специалистов непосредственно в первые дни после землетрясения [198], которая более или менее соответствует реальному распределению повреждений.



| 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                                                                  |

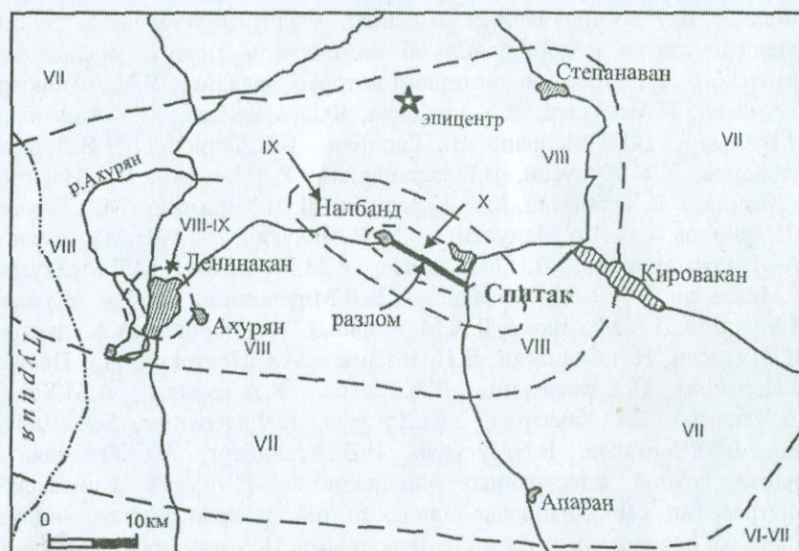


Рис. 3.39. Изосейсты Спитакского землетрясения [198].

Первое заключение об интенсивности Спитакского землетрясения и причинах массовых разрушений было составлено уже 15 декабря 1988г. группой ученых бывшего СССР в составе Т.Р.Рашидова, Б.К.Карапetyана, 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.Бадаляном, Р.С.Азояном, Г.С.Шестопёровым, А.М.Аветисяном, А.Н.Саркисяном, С.Г.Шагиняном, Р.Н.Арутюняном, С.Г.Азизяном, В.И.Григоряном приведены в книге "Трагедия Спитака не должна повториться", изданной под нашей редакцией к 10-летию землетрясения в 1998 году [82].

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.Амасын, 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.Поляев, С.В.Поляков, В.А.Ржевский, Е.А.Теняев, К.А.Тоноян, А.М.Уздин, Ш.А.Хакимов, С.О.Хачатрян, З.М.Хлгатын, И.Ф.Цепенюк, Г.Ш.Чануквадзе, В.М.Черкасов, В.В.Чугурян, В.В.Штейнберг, А.С.Юзбашян и большая группа иностранных специалистов [198]. 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



Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением





Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением



Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением

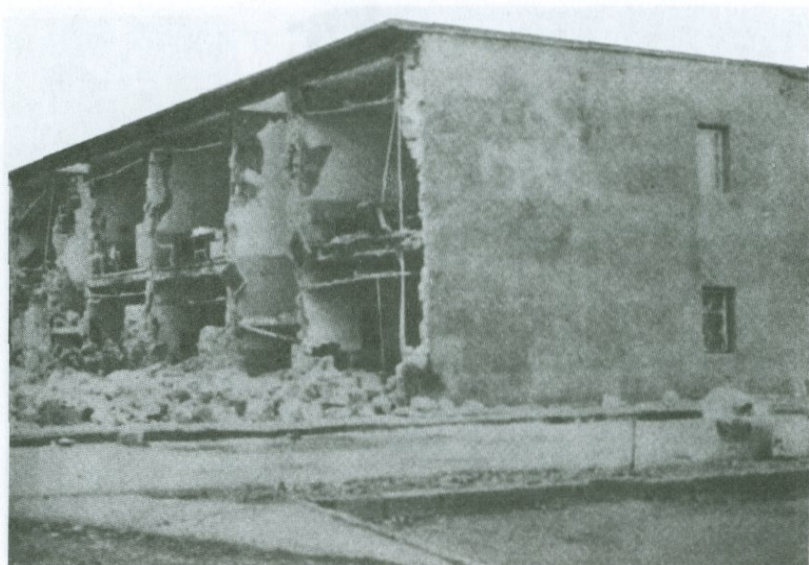




Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением



Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением





Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением



Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением





Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением

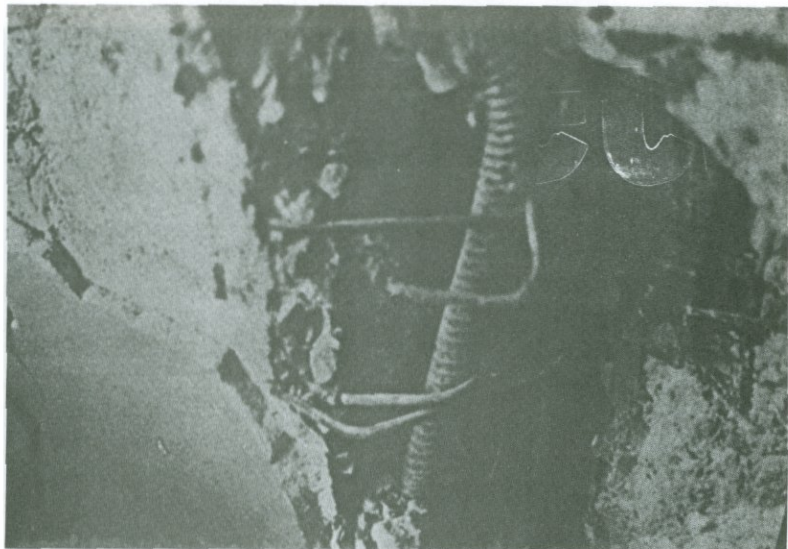


Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением

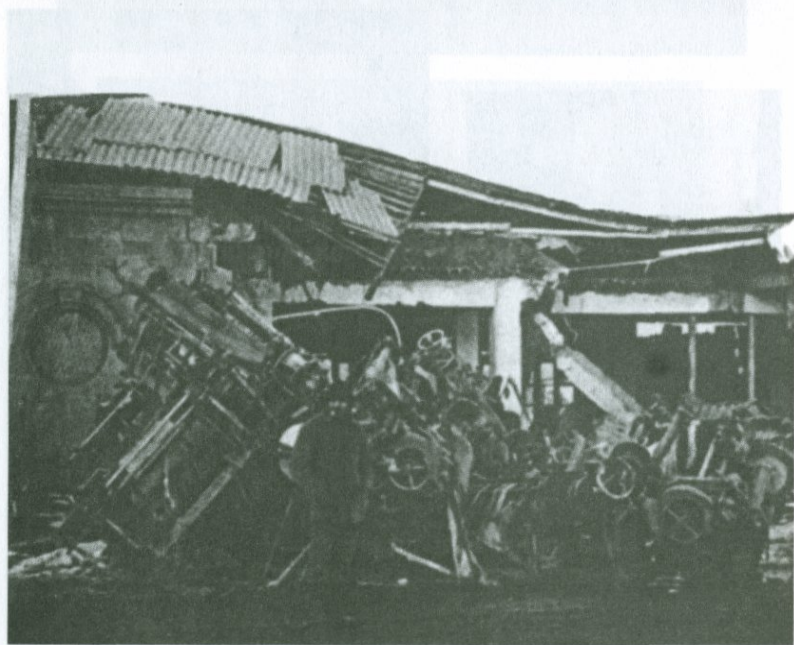




Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением

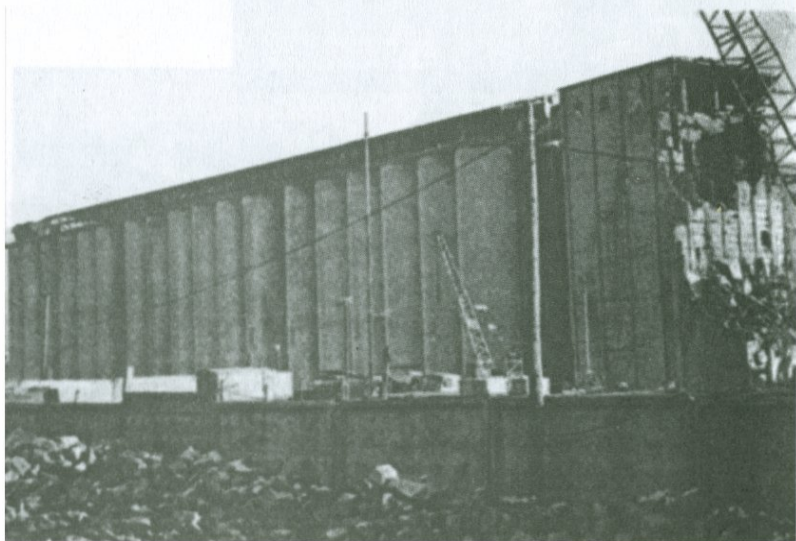
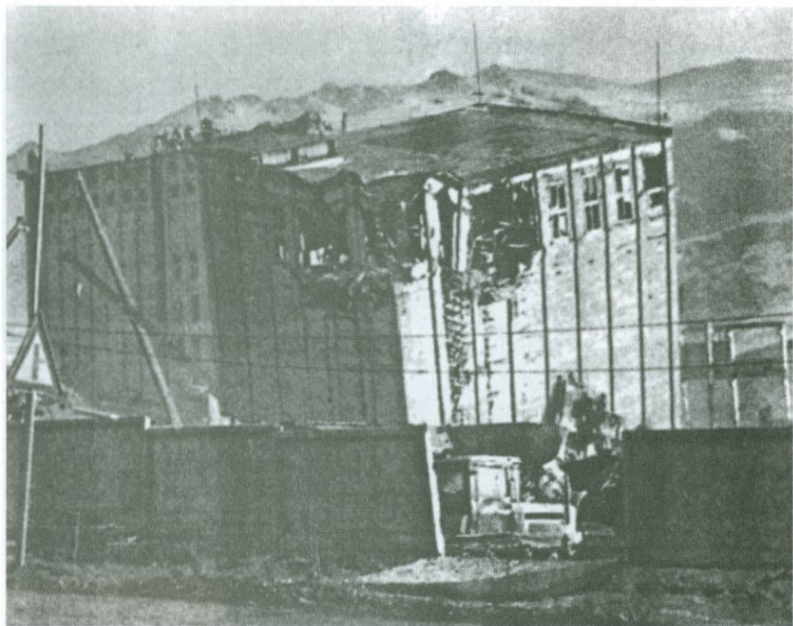


**Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением**

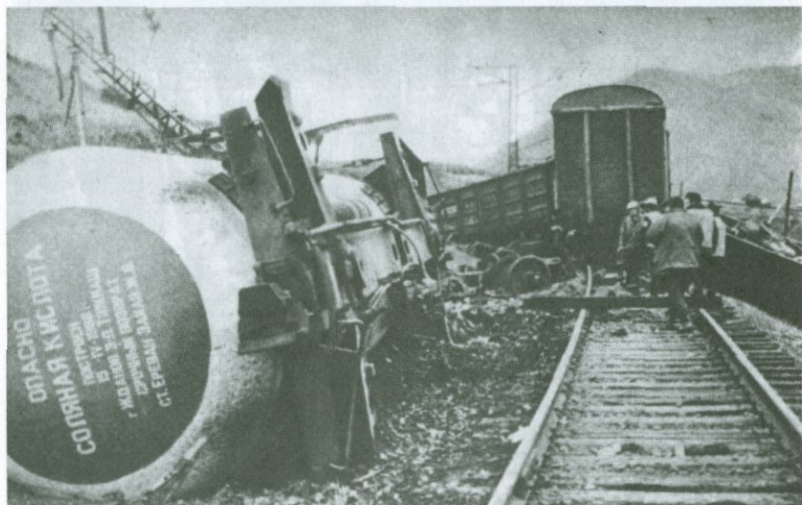




Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением

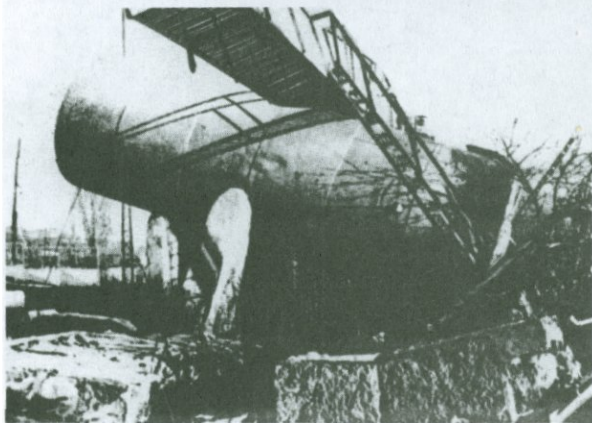
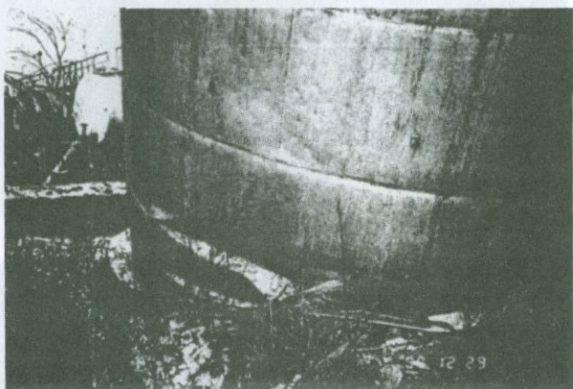
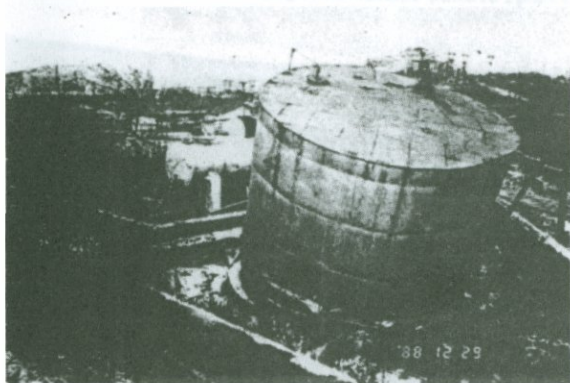


Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением

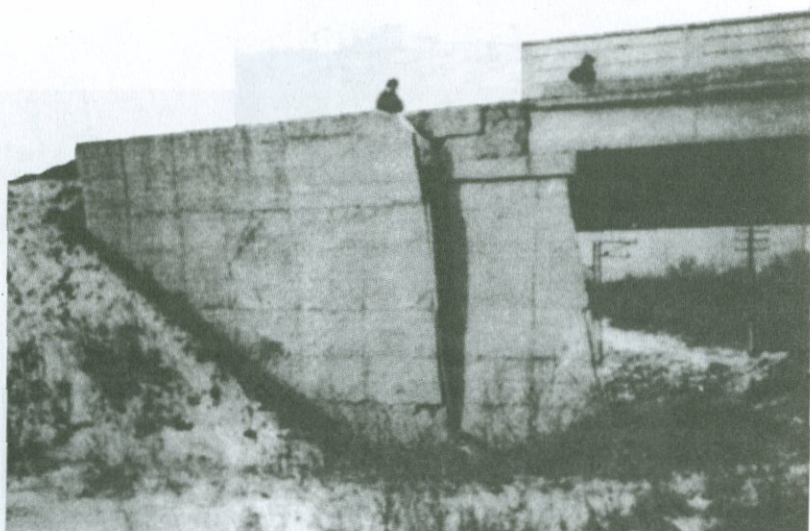




# Разрушения, причиненные Спитакским землетрясением



**Разрушения, причиненные  
Спитакским землетрясением**





## Разрушения, причиненные Спитакским землетрясением



### 3.3.7. 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 3.9

Общий объем ущерба Спитакского землетрясения [48]

| Территория,<br>подвергнутая<br>землетрясению | Число<br>жителей |         | Жилые дома |           | Промышлен-<br>ные и сель-<br>скохозяйст-<br>венные<br>предприятия |           | Обществен-<br>ные здания<br>и соору-<br>жения |           | 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<br>местность                        | 146500           | 4352    | 29533      | 20094     | 1404                                                              | 1293      | 581                                           | 186       | 34                 |
| Вся зона<br>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.3.9. От землетрясения в целом пострадало 9 млн.квadratных метров жилплощади, из коих 4.7млн. 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, 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 [82].* 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, промежутком времени между ними – всего 4 мин и 21 сек.. Если бы в этот день произошло только второе землетрясение с магнитудой  $M=6.25$ , то еще неизвестно сколько было бы число жертв (см. также 3.3.2). 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.

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 криминале.

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

### *3.3.8. 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, домостроительные 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 дисапоры – 50 млн долларов*. Общая сумма помощи от республик бывшего СССР составила 1.4 миллиарда рублей. 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.Суехиро* подарил АрмНИИ сейсмостойкого строительства измерительно-вычислительный комплекс OMNILIGHT-8М, для измерения микроколебаний грунтов, показанных на рис.2.10. 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. 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.

Объемы строительства социальных объектов за 1989-1990гг.  
по бывшим Союзным республикам [82]

| 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                     |

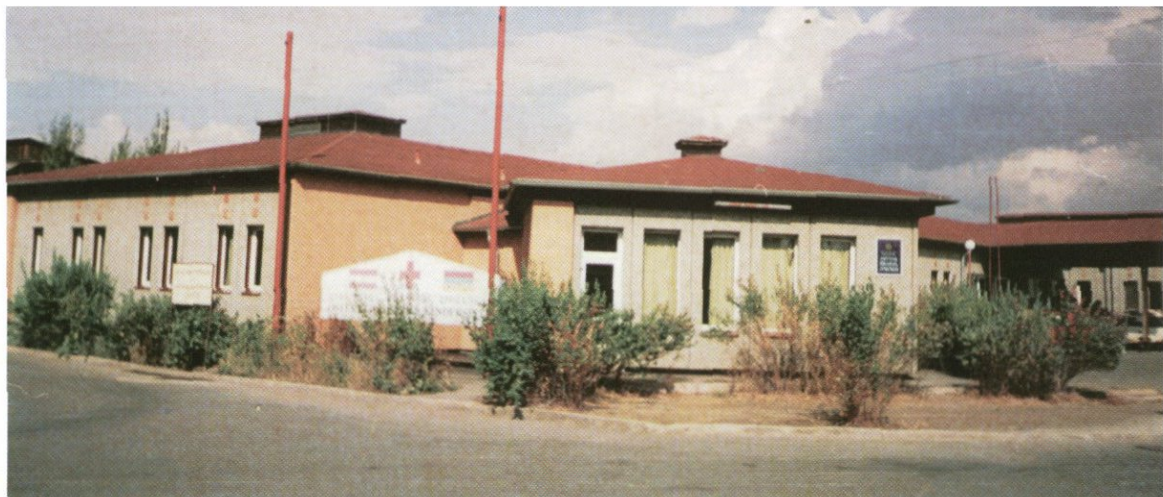






Оздоровительный центр “Берлин” в г.Гюмри, построенный **правительством Германии**.







Школа N10 с французским уклоном в г.Гюмри, построенная **Французским** правительством.







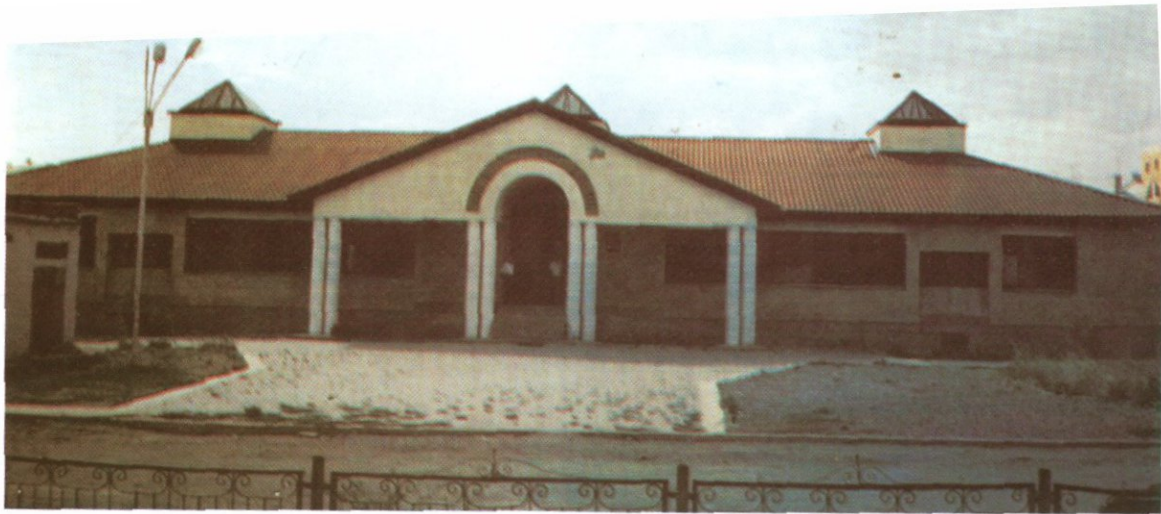
Школа N23 в г.Гюмри, построенная **правительством России.**











Детская лечебница в г.Гюмри, построенная **правительством Дании**.



Детская поликлиника в г.Гюмри, построенная Швейцарским Красным Крестом.





Норвежский квартал в г.Спитаке.







Итальянская школа в г.Спитаке.



**Швейцарский квартал в г.Спитаке.**





Чешская школа в г.Спитаке.



Детский сад N30 в г.Ванадзоре, построенный Россией.





Школа N5 в г.Ванадзоре, построенная Украиной.



Больница «Нарек» в г.Ванадзоре, построенная английскими строителями.





Реабилитационный центр «Красного Креста» в г.Ереване.



Жилые дома в г.Степанаване, построенные армянской общиной Америки.



Таблица 3.11

Объекты, построенные в зоне землетрясения по финансированию правительств, фирм и организаций зарубежных стран (кроме СНГ) [82]

| 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 первые дни после землетрясения с помощью специалистов и рабочих из разных стран были восстановлены десятки объектов первой необходимости. С нового 1989г. началось осуществление большой программы восстановительных работ, составленной Правительством СССР. Было предусмотрено за 2 года построить 5.3млн 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 1989-90гг. по бывшим Союзным Республикам приведен в табл.3.10, объекты, построенные правительствами разных стран, в табл.3.11. Более подробные сведения о помощи зоне бедствия приведены в [82].

На цветных вкладках показаны фотографии (авторы С.Н.Назаретян, А.А.Григорян) ряда объектов просвещения и медицинского обслуживания, построенные в зоне бедствия правительствами разных стран.

Полностью восстановить зону бедствия Армении еще не удалось. Об этом в последние годы постоянно заботится правительство Армении и общепармянский 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.Хамер, 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.Виардо, Ф.Фон-Штада, П.Бурчуладзе, А.Мило, Р.Репина*. По сообщениям информагенств, в декабрьские дни 1988г., накануне Рождества, на улице далекого Сиднея прохожие могли видеть хрупкую обаятельную девчущку 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 [8,9,19]. 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.





## ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ РАЗВИТИЯ СЕЙСМОЛОГИИ

- 132г. Создание сейсмоскопа Чжан Хена.
- 1783г. Начало научных полевых исследований землетрясения (Италия-Калабрия).
- 1846г. Первая научная статья Малёя о землетрясениях.
- 1855г. Создание первого сейсмографа Крейля.
- 1862г. Издание книги (из двух томов) “Великое неополитанское землетрясение 1857: основные принципы сейсмологических наблюдений” (автор Роберт Мамет, Ирландия).
- 1865г. Первые сейсмологические наблюдения с помощью сейсмоскопов в Маниле (Филлипины).
- 1879г. В Японии английскими специалистами создаются сейсмографы.
- 1880г. Организация Японского сейсмологического общества.
- 1880г. Дж.Юнг и Дж.Милн создали сейсмограф, с помощью которого создавалась возможность впервые обнаружить продольные (Р) и поперечные (S) сейсмические волны на сейсмограмме.
- 1884г. Разработка шкалы интенсивности землетрясения Росси-Фореа.
- 1885г. Статья Лорда Релея о теории “Релеевских волн”.
- 1887г. В Калифорнии создаются сейсмические станции.
- 1888г. Создание И.В.Мушкетовым Сейсмической комиссии Русского географического общества.
- 1893г. Составление И.В.Мушкетовым и А.П.Орловым первого каталога землетрясений на территории Российской империи.
- 1896г. Создание Британского сейсмологического центра.
- 1898г. В Токио Омори сконструировал новый сейсмограф.



- 1898г.** Британская ассоциация содействия науки рекомендовала распределить по всему миру единообразную сеть сейсмических станций, используя приборы Милна – начало первой единообразной международной сейсмической сети.
- 1900г.** Начало инструментальной сейсмологии в России. При Российской Императорской Академии наук образована Постоянная центральная сейсмическая комиссия (ПЦСК) под председательством О.А.Баклунда.
- 1902г.** Б.Б.Голицыным впервые предложен гальванометрический метод регистрации сейсмических волн, позволивший преобразовывать механические перемещения в электрическую форму и ставший основой всех последующих разработок новых поколений сейсмографов. С этого времени сейсмографами Б.Б. Голицына оборудуются сейсмические станции первого класса в Пулкове, Баку, Иркутске, Макеевке, Ташкенте и Тифлисе.
- 1902г.** Начат регулярный выпуск "Известий Постоянной центральной сейсмической комиссии" - первого печатного органа ПЦСК Императорской Академии наук, Центральное бюро которой возглавили Б.Б. Голицын, И.И. Померанцев и А.Н. Герасимов.
- 1903г.** Основание международного сейсмологического общества (International Seismological Association).
- 1906г.** Модель "упругой отдачи" Г.Ф.Рида по механизму возникновения землетрясения.
- 1909г.** Открытие подошвы земной коры - "границы Мохоровичича" (резкое изменение скорости сейсмических волн) хорватским сейсмологом А.Мохоровичичем.
- 1911г.** Основание Американского сейсмологического общества и начало издания его периодического журнала - BSSA.
- 1911г.** Теория волн А.Е.Н.Лява.
- 1913г.** Б.Гутенберг в Гёттингене определил радиус ядра Земли.
- 1918г.** Начало издания международной сейсмологической сводки – ISS (International Seismological Summary, Оксфордский университет).
- 1922г.** Тернер (Англия) обнаружил глубокофокусные землетрясения.

- 1923г. В Токио создан институт исследования землетрясений — Earthquake Research Institute.
- 1923г. В Пасадене начались регулярные записи землетрясений с помощью сейсмометра Вуда-Андерсона.
- 1924г. В СССР получили распространение сейсмографы Никифорова.
- 1926г. После Ленинанканского землетрясения 1926г. для повышения сейсмостойкости зданий с несущими каменными и кирпичными стенами К.Завриевым предложены “антисейсмические пояса”.
- 1927г. М.Ишимото создал первый наклономер.
- 1928г. Образован Сейсмологический институт АН СССР — в дальнейшем Институт физики Земли им.О.Шмидта.
- 1928г. Предложение К.С.Завриева по переходу в СССР от статического метода расчета сооружений на сейсмостойкость к динамическому.
- 1931г. Основание Ереванской сейсмической станции.
- 1932г. Бениофф сконструировал измеритель деформаций — деформограф.
- 1933г. В Калифорнии, после землетрясения в Лонг-Биче, издан первый законодательный акт о строительстве школьных зданий, с учетом сейсмического воздействия. Начало создания норм сейсмостойкого строительства.
- 1935г. Опубликование шкалы магнитуд Чарльза Рихтера.
- 1937г. Составление первой карты сейсмического районирования территории СССР.
- 1941-1943г. Понятие о спектре реакции землетрясения (М.Био, Дж.Хаузнер, Р.Танабаси и др.).
- 1945г. А.Г.Назаров предложил оценить воздействие землетрясения на сооружение по показателям смещений грунта серии сейсмографов.
- 1946г. Испытание атомной бомбы в Бикини; Р-волны регистрировались удаленными станциями.
- 1951г. Опубликование Калифорнийского кода “Lateral Forces of Earthquake and Wind” (“Горизонтальные силы от землетрясений и ветра”), основанные на спектре реакции землетрясения, предложенным М.Био.



- 1953г.** С.Медведев создал сейсмометр СБМ для инструментальной оценки силы землетрясения.
- 1954г.** А.Назаров создал многоятниковый сейсмометр АИС (Армянский институт сооружений) для инструментального построения спектра реакции землетрясения.
- 1956г.** Первая международная конференция по сейсмостойкому строительству, посвященная 50-летию землетрясения в Сан-Франциско, Беркли Калифорния (июль 1956).
- 1957г.** Разработка первых норм сейсмостойкого строительства в СССР, основанных на спектре реакции землетрясения (И.Л.Корчинский и др.).
- 1957-1958г.** Международный геофизический год. Начало осуществления программы “проект Вела Юниформ” (VELA Uniform) по установке 150 идентичных сейсмических станций на земном шаре.
- 1961г.** Создание Института геофизики и инженерной сейсмологии в Армении.
- 1962г.** Опубликован краткий анализ японских специалистов под названием “Прогнозирование землетрясений – достижения и программы дальнейших исследований” (авторы К.Цубои, К.Вадаи и Т.Хагивара).
- 1964г.** Создание шкалы по оценке силы землетрясения MSK-64 (авторы С.Медведев, В.Шпонауер, В.Карник).
- 1966г.** Идея сейсмического момента землетрясения (К.Аки и др.).
- 1975г.** 4 февраля в 14:00 китайские сейсмологи исходя из наличия ряда предвестников объявили общую тревогу об ожидаемом в городе Хайчене сильном землетрясении: было сообщено, что в течение ближайших двух дней ожидается сильное землетрясение. Были осуществлены все возможные спасательные мероприятия, в том числе эвакуации людей из жилищ и больниц. По истечении 5 часов и 30 минут после объявления в 19:36 произошло сильное землетрясение с магнитудой  $M=7.3$ . Впервые в истории сейсмологии было успешно прогнозировано такое сильное землетрясение.

- 1976г.** Одна из величайших сейсмических катастроф. Землетрясение 28.06.1976г. в Хебейе (Китай) унесло жизнь 5000000 человек. Оно произошло всего через 1.5 года после удачного прогнозирования Хайченского землетрясения и сильно расшатало позиции сторонников прогнозирования. Начало свертывания национальных программ по прогнозированию землетрясений и приданию в сейсмозащите приоритета превентивным мероприятиям по подготовке к ним.
- 1982г.** Сдана в эксплуатацию Гарнийская комплексная геофизическая международная обсерватория в Армении.
- 1989г.** Под эгидой ООН в Ереване состоялся Международный симпозиум, посвященный Спитакскому землетрясению 7 декабря 1988 года.
- 1990г.** Армянский научно-исследовательский институт строительства и архитектуры преобразован в АрмНИИ сейсмостойкого строительства.
- 1991г.** Создание Национальной службы сейсмической защиты (НССЗ) РА.
- 1994г.** Разработаны и введены первые национальные нормы сейсмостойкого строительства Республики Армения.
- 1990-1999г.** Международное десятилетие по снижению ущерба от стихийных бедствий.
- 1999г.** Под эгидой ООН разработана новая глобальная карта сейсмической опасности Земли (Global Seismic Hazard Map).
- 2004г.** 26 декабря в юго-восточной Азии, в Индийском океане в 160км от острова Суматра произошло самое сильное землетрясение с магнитудой  $M=9.0$ , породившее гигантские цунами и сопровождающееся небывалыми человеческими страданиями и жертвами.



# **ВАЖНЕЙШИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ПРОИЗОШЕДШИЕ НА ЗЕМЛЕ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ**

с дополнениями и обновлениями заимствованы из работ

[14, 21, 27, 29, 37, 40, 56, 57, 60, 62, 65, 67, 68, 77, 78, 82, 83, 106, 122, 134, 135, 142, 143, 168, 169, 172, 174, 176, 191, 194, 209, 210, 213, 216] и других источников

| Дата землетрясения       | Место землетрясения                 | Магнитуда | Число жертв | Последствия, наблюдения, особенности                                                                                                                        |
|--------------------------|-------------------------------------|-----------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                        | 2                                   | 3         | 4           | 5                                                                                                                                                           |
| при-мерно 1250г. до н.э. | <i>Гора Синай</i>                   |           |             | “Вся гора сильно колебалась”, когда Моисей приготовился услышать десять заповедей. Книга Исхода, 19:18.                                                     |
| 780г. до н.э.            | <i>Китай, пров.Шеньси</i>           |           |             | Многочисленные разрушения к западу от Синай.                                                                                                                |
| несколько веков до н.э.  | <i>Армения, Арарат</i>              |           |             | На северо-восточном склоне горы Арарат образовался развал с большой глубиной и шириной. Факт землетрясения отмечается в “Истории Армении” Мовсеса Хоренаци. |
| 373г. до н.э.            | <i>Греция</i>                       |           |             | Разрушен Гелис у Коринфского залива. Значительная часть города сползла в море.                                                                              |
| 70г. до н.э.             | <i>Китай, пров.Шаньдун</i>          |           | 6000        |                                                                                                                                                             |
| 63г. до н.э.             | <i>Италия возле вулкана Везувий</i> |           |             | Землетрясения продолжались 16 лет, завершившись знаменитым извержением 24 августа 79 года, которое погребло Помпей и Геркуланум.                            |
| 139г.                    | <i>Армения, Араратская долина</i>   | 5.7       |             |                                                                                                                                                             |
| 341г.                    | <i>Турция</i>                       |           | 40000       | Разрушена Антиохия. “Армянские горы сначала удалились друг от друга, а потом приблизились с ужасным гулом...” (историк)                                     |

| 1                | 2                                           | 3   | 4      | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------|---------------------------------------------|-----|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 21.07.<br>365г.  | <i>Восточное<br/>средиземно-<br/>море</i>   |     | 50000  | Большие разрушения на Крите. В Александрии цунами смыло 5000 человек.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 09.07.<br>551г.  | <i>Ливан</i>                                |     |        | Разрушен Бейрут.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 21.07.<br>735г.  | <i>Армения,<br/>Вайоц Дзор</i>              | 7.0 | 15000  | “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 пропости 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”. (Степанос Орбелян, арм. ист.). |
| 18.09.<br>844г.  | <i>Сирия</i>                                |     | 50000  | Разрушен Дамаск.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| декабрь<br>856г. | <i>Сев. Африка<br/>и Средний<br/>Восток</i> |     | 45000  | Разрушены многие города от Туниса до Ирана.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 27.03.<br>893г.  | <i>Армения,<br/>Двин</i>                    | 7.0 | 70000  | Царская резиденция Армении “Двин” превратилась с груды развалин.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 893г.            | <i>Индия</i>                                |     | 180000 | Разрушения на большой площади.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 1011г.           | <i>Турция,<br/>Эрзинджан<br/>(Ерзнка)</i>   | 7.0 |        | “В день праздника произошло катастрофическое землетрясение, город Ерзнка полностью был погребен и остался только дом Киракоса Вогормаци. Много церквей и крепостей обвалились” (арм. историк).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |



| 1                | 2                                        | 3   | 4      | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------|------------------------------------------|-----|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 09.01.<br>1038г. | <i>Китай,<br/>пров. Шаньси</i>           | 7.3 | 32000  | К северу от Тайюаня разрушено много селений.                                                                                                                                                                                                                                                 |
| июнь<br>1045г.   | <i>Турция,<br/>Эрзинджан<br/>(Ерзка)</i> | 6.6 |        | “В армянском 494г. (=1045г.) снова произошло землетрясение во всей вселенной... город Ерзка полностью разрушен, треснула Земля и люди были погребены в глубине земли и много дней были слышны их стоны из глубины. Время было летнее и в том году Земля дрожала каждый день” (арм. историк). |
| 1046г.           | <i>Армения,<br/>Ани</i>                  | 5.5 |        | “Землетрясение разрушило прекрасные дворцы и церкви и проглотил много людей” (арм. историк).                                                                                                                                                                                                 |
| 18.03.<br>1068г. | <i>Палестина</i>                         |     | 25000  | Разрушено много селений.                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 1111г.           | <i>Иран,<br/>Хорасан</i>                 | 6.6 | 8000   | “В Хорасане было землетрясение, мечеть и 600000 (??) мужчин и женщин унесло под землю” (арм. историк).                                                                                                                                                                                       |
| 08.09.<br>1138г. | <i>Сирия</i>                             |     | 100000 | Разрушен Алеппо.                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 25.09.<br>1139г. | <i>Азербайджан,<br/>Гянджа</i>           | 7.5 | 290000 | Разрушен город Гянджа (Ганзак). Развалилась гора Алаарак закрывая течение реки: образовалось новое озеро Гёк-Гёль, которое существует до сих пор. Разрушена церковь в Ахпате (Армения) на расстоянии 150км от эпицентра.                                                                     |
| 20.05.<br>1202г. | <i>Средний<br/>Восток</i>                |     | 30000  | Ощущалось на площади 2000000км <sup>2</sup> , включая Египет, Сирию, Малую Азию, Сицилию, Армению и Азербайджан. В сообщениях указывается либо 1201г. либо 1202г., а число жертв оценивается в 1 млн.человек, что в высшей степени невероятно.                                               |
| 11.10.<br>1254г. | <i>Турция,<br/>Ерзка</i>                 | 5.3 | 16000  | “В 1254 году снова было землетрясение в Ерзка и погибли 16000 человек” (арм. историк).                                                                                                                                                                                                       |
| 20.05.<br>1293г. | <i>Япония,<br/>преф. Канагава</i>        |     | 30000  | Большие повреждения в Камакуре.                                                                                                                                                                                                                                                              |

| 1                | 2                             | 3       | 4      | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------|-------------------------------|---------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17.09.<br>1303г. | <b>Китай,</b><br>пров.Шаньси  | 8.0     | 15000  | Большие разрушения в Хундуле и его окрестностях.                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 1319г.           | <b>Турция,</b><br>Ани         | 5.9-6.2 |        | Столица средневековой Армении г.Ани превращается в груды развалин. В таком состоянии она до сих пор. "После землетрясения 1320(19) года, полностью разрушившего Ани – крупный политический, экономический и культурный центр Армении X-XIII веков, его жители вынуждены были расселиться в разных частях света – от Польши до Ирана". (Николас Амбрийсиз). |
| 05.12.<br>1455г. | <b>Италия</b>                 |         | 40000  | Сильно пострадал Неаполь.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 26.01.<br>1531г. | <b>Португалия,</b><br>Лисабон |         | 30000  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 23.01.<br>1556г. | <b>Китай,</b><br>пров.Шэньси  | 8.0     | 830000 | <b>Величайшая природная катастрофа в истории.</b> Землетрясение произошло ночью в густонаселенном районе вокруг Сианя. Образовались тысячи оползней на склонах холмов, сложенных мягкими породами. Погибли многие жители, обитающие в пещерах. Разрушены многие селения и тысячи людей погибли, когда рухнули дома.                                        |
| ноябрь<br>1668г. | <b>Азербайджан,</b><br>Шемаха | 7.8     | 80000  | "В течение трех месяцев в Шемахи непрерывно происходили землетрясения, где не только много домов рухнули, но и некоторые горы. Дороги до такой степени пришли в негодность, что караваны вынуждены были искать новые дороги, погибло примерно 80000 человек" (Мушкетов И., Орлов А.).                                                                      |



| 1                   | 2                              | 3   | 4      | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------|--------------------------------|-----|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17.06.<br>1692г.    | <i>Ямайка,<br/>Порт-Ройал</i>  |     | 2000   | Значительная часть города (снискавшего славу самого жесткого и безнравственного в мире) погрузилась в море. Здания целиком опускались на дно, и по сей день на дне моря видны почти не разрушенные строения.                                                                                                                                          |
| 04.07.<br>1679г.    | <i>Армения,<br/>Гарни</i>      | 7.0 | 8000   | Рухнул прекрасный языческих храм (77г. н.э., арх.Трдат) Гарнийской крепости. Крупные камни храма в несколько тонн падали в ближайшее ущелье. (В 1975г. по этим камням храм был восстановлен). Повреждены много церквей и минаретов. Крепость Еревана разрушилась. Разрушен каменный мост через р.Зангу. Закрылись старые источники и открылись новые. |
| 05.07.<br>1688г.    | <i>Турция</i>                  | 6.8 | 15000  | Разрушения вдоль побережья Эгейского моря.                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 9(11).01.<br>1693г. | <i>Италия,<br/>Сицилия</i>     | 6.7 | 100000 | Разрушена Катания.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 18.05.<br>1695г.    | <i>Китай,<br/>пров.Шаньси</i>  | 8.0 | 30000  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 30.12.<br>1703г.    | <i>Япония,<br/>район Токио</i> | 8.2 | 5200   | Цунами.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 1715г.              | <i>Алжир</i>                   |     | 20000  | Разрушен город Алжир.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 18.11.<br>1727г.    | <i>Иран,<br/>Тебриз</i>        | 5.7 | 77000  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 1737г.              | <i>Россия,<br/>Камчатка</i>    |     |        | Самое крупное цунами высотой не менее <b>70 метров</b> . Это цунами описано русским ученым С.П.Крашениниковым, обследующим в это время Камчатку.                                                                                                                                                                                                      |
| 01.11.<br>1755г.    | <i>Португалия,<br/>Лисабон</i> | 8.6 | 60000  | День всех святых; многие погибли в обрушившихся церквях и от пожаров, охвативших город. Многие погибли от огромного цунами.                                                                                                                                                                                                                           |

|                  |                               |         |        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------|-------------------------------|---------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 27.12.<br>1779г. | <b>Иран,<br/>Тебриз</b>       |         | 100000 | Землетрясение 1779 года по официальной статистике местных властей было восьмым, при котором причиненный ущерб превзошел суммарный ущерб всех предыдущих семи землетрясений. "В течение нескольких секунд от строений домов города даже следа не осталось. Стерлось с лица земли все, что было на ней. Было такое впечатление, что до землетрясения здесь ничего не было" (иранский очевидец). Землетрясения продолжались почти 3 года. |
| 05.02.<br>1783г. | <b>Италия,<br/>Калабрия</b>   |         | 50000  | Первая попытка научного исследования последствий землетрясения.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 16.12.<br>1811г. | <b>США,<br/>Нью Мадрид</b>    | 7.5     |        | Серия трех крупных землетрясений вызвала значительные изменения ландшафта, образовалось озеро, реки (Миссисипи) изменили русла. Ощущалось в Бостоне на расстоянии 1800км. Произошло вдали населенных пунктов и число жертв невелико.                                                                                                                                                                                                   |
| 23.01.<br>1812г. | <b>там же</b>                 | 7.3     |        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 07.02.<br>1812г. | <b>там же</b>                 | 7.8     |        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 06.10.<br>1827г. | <b>Армения,<br/>Цахкадзор</b> | 7       | 10000  | Разрушен купол знаменитой церкви Кечарис (1033г.), памятник Монтрезора в Спитаке.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 20.02.<br>1835г. | <b>Чили,<br/>Консепсьон</b>   | 8.5     | 30000  | Описано Ч.Дарвином, бывшим тогда на побережье, в "Путешествие на Бигле". Большие перемещения грунта. Цунами.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 1837г.           | <b>Серия и<br/>Палестина</b>  |         | 5000   | Разрушены города Дамаск и Бейрут.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 02.07.<br>1840г. | <b>Армения,<br/>Арагат</b>    | 6.7 (?) | 2000   | Образовавшееся в результате обвала у вершины Большого Арарата ледяные и каменные куски, падая с 2км высоты, полностью покрыли монастырь св.Акопа и село Акори, оставив под завалами 1000 людей. Разрушились более 6000 домов, 25 церквей и мечетей.                                                                                                                                                                                    |



| 1                            | 2                                         | 3   | 4     | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------|-------------------------------------------|-----|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11.11.<br>1855г.             | <b>Япония,</b><br>о.Хонсю                 | 6.9 | 7000  | Большой пожар в Эдо (ныне Токио).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 09.01.<br>1857г.             | <b>США,</b><br>Форт-Техон,<br>Калифорния  | 8.3 | 1     | Смещение на 9м вдоль разлома Сан-Андреас, разлом вспоролся на протяжении 400км. Из-за удаленности землетрясения от населенных мест погиб всего один человек.                                                                                                                                                                                                                                          |
| 02.06.<br>(21.05.)<br>1859г. | <b>Турция,</b><br>Эрзрум                  | 6.3 | 15000 | Полностью рухнули 1800 домов, 2400 домов получили тяжелые и легкие повреждения. Разрушились армянские, греческие и французские церкви и частично много мечетей. «Купол мечети Пярвиз оглу от первого удара сместился в одну сторону, а от второго удара снова переместился в первоначальное положение, даже чуть дальше. Воды реки Карасу, где поверхностный разрыв пересекал ее, вскипели» (Г.Абих). |
| 13.08.<br>1868г.             | <b>Чили и Перу</b>                        | 8.5 | 25000 | Большое цунами опустошило город Арику (Чили).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 16(28).01.<br>1872г.         | <b>Азербайджан,</b><br>Шемаха             | 6.0 | 139   | Массовые разрушения и повреждения жилых домов. Повреждены православная и армянские церкви, старинная мечеть. Учитывая большую частоту происходящих здесь землетрясений, был поставлен вопрос о переносе места г.Шемаха.                                                                                                                                                                               |
| 26.03.<br>1872г.             | <b>США,</b><br>Оуэнс-Валли,<br>Калифорния | 8.5 | 27    | Одно из сильнейших землетрясений США. Образовался уступ высотой 6м.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 09.06.<br>1887г.             | <b>Казахстан,</b><br>Верный<br>(Алматы)   | 7.3 | 332   | Было разрушено 1800 зданий со стенами из сырцового кирпича. Около 800 деревянных зданий не пострадали. Много обвалов, оползней и трещин на грунте.                                                                                                                                                                                                                                                    |

| 1                | 2                                        | 3                            | 4     | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------|------------------------------------------|------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15.06.<br>1896г. | <i>Япония,<br/>Санрику</i>               | 7.5                          | 27000 | Большое цунами высотой 30 метров. В итоге 27122 жертв и 10617 смытых в море домов.                                                                                                                                                                                                       |
| 12.06.<br>1897г. | <i>Индия,<br/>Ассам</i>                  | 8.7                          | 1500  | Образовался громадный уступ высотой 11м. Типичное землетрясение с “подбрасыванием” предметов. “... Кусок гранита размером 0.3х1м был подброшен на высоту 2.5м” (очевидец).                                                                                                               |
| 31.12.<br>1899г. | <i>Грузия,<br/>Ахалкалаки</i>            | VIII-IX<br>баллов в<br>эпиз. | 274   | Разрушены 664 дома. Землетрясение охватило большую часть территории Закавказья.                                                                                                                                                                                                          |
| 16.12.<br>1902г. | <i>Узбекистан,<br/>Андижан</i>           | 6.4                          | 4500  | Сильно пострадали глинобитные и со стенами из сырцового кирпича здания. Ажурная часть верхушки минарета Джама, включая купол, свалились. Наблюдался поворот кирпичных столбов.                                                                                                           |
| 31.03.<br>1906г. | <i>У берегов<br/>Экватора</i>            | 8.9                          | 1000  | Одно из сильнейших землетрясений, записанных приборами. Продолжалось более 3 минут.                                                                                                                                                                                                      |
| 18.04.<br>1906г. | <i>США,<br/>Сан-<br/>Франциско</i>       | 8.3                          | 700   | Разлом Сан-Андреас впоролся на протяжении 430км с подвижкой 5-7 метров. Лопнули водопроводы, вырваны “седые” дубы с двухметровым обхватом. От развалившихся горячих печей и замыкания электропроводов вспыхнули пожары. Землетрясение впервые побудило общество заранее укрепить здания. |
| 28.12.<br>1908г. | <i>Италия,<br/>Мессинский<br/>пролив</i> | 7.5                          | 75000 | Разрушена Мессина и 40 <sup>6</sup> маленьких городов. Большую помощь в спасательных работах и медицинской помощи оказали русские моряки.                                                                                                                                                |



| 1                | 2                         | 3       | 4                | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------|---------------------------|---------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 16.12.<br>1920г. | <i>Китай,<br/>Ганьсу</i>  | 8.6     | 200000           | Землетрясение охватило территории с площадью 4 млн.км <sup>2</sup> . На расстоянии более чем 1500км в Хайфоне в обсерватории Фульена остановились астрономические часы. Обрушения густонаселенных пещерных селений, вырытых в лесовых склонах. Сильные изменения в рельефе. В одной местности, получившей название Долина смерти, семь гигантских оползней срезали склоны гор и погребли под собой фермы и селения. Один дом (внутри мужчина с ребенком), захваченный оползнем, был перенесен на движущейся массе пород и каким-то чудом остался на поверхности. Так он проделал путь более 800м по течению лавы..." (Г.Тазиев). |
| 01.09.<br>1923г. | <i>Япония,<br/>Токио</i>  | 7.9-8.3 | 99300-<br>142807 | Известно как землетрясение Канто. Тяжелейший ущерб причинен на большой территории, включая Токио (на расст. 104км от эпицентра) и Иокогаму. Огромный пожар в Токио, жертвой которого стали 38000 человек. Из 483000 домов сгорели 301000. Береговые районы затоплены большими цунами. 14000 жителей исчезли в океане. Горизонтальные смещения достигли до 4,5м (Полуостров Босо).                                                                                                                                                                                                                                                |
| 22.11.<br>1926г. | <i>Армения,<br/>Гюмри</i> | 5.7     | 300              | Главному удару землетрясения предшествовал сильный подземный гул, благодаря чему люди заранее выходили из зданий. Некоторые памятники сместились на 10-20см и поворачивались. 1500 зданий получили повреждения.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

| 1                          | 2                                          | 3        | 4     | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------|--------------------------------------------|----------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 26.06.<br>11.09.<br>1927г. | <b>Украина,<br/>Крым</b>                   | 6<br>6.8 |       | В Ялте было повреждено около 70% всех строений.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 03.03.<br>1933г.           | <b>Япония,<br/>у побережья<br/>Санрику</b> | 8.9      | 3000  | Одно из сильнейших землетрясений, зарегистрированных приборами. Крупное цунами причинили большой ущерб и вызвало гибель людей.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 10.03.<br>1933г.           | <b>США,<br/>Лонг-Бич</b>                   | 6.3      | 120   | Многочисленные повреждения зданий, особенно школ. Это землетрясение послужило сильным толчком для развития сейсмостойкого строительства. Были составлены новые нормы. В Калифорнии был принят "Полевой Акт" по обязательному проектированию всех школ с учетом сейсмического воздействия.                                                                                                                                                                                                            |
| 15.01.<br>1934г.           | <b>Индия,<br/>Бихар</b>                    | 8.4      | 10700 | Образовался большой пояс просядок. Отмечалось опускание насыпных дорог и железнодорожных насыпей. Стены многих зданий погрузились на глубину до 60см (2 футов). В аллювиальном грунте образовались большие зияющие трещины. Образовалась яма глубиной 3.7 и шириной 1.5 метров. "... Повсюду появились сотни струй, выдымая вверх воду и песок; из песка складывались миниатюрные вулканы и оттуда, как из кратеров, били струи воды; высота некоторых струй достигла более шести футов" (очевидец). |
| 27.12.<br>1939г.           | <b>Турция,<br/>Эрзинджан</b>               | 8.0      | 32700 | Разрушены более чем 30000 домов. На поверхности земли образовались трещины шириной до 4 метров. Правосторонний сдвиг амплитудой около 3.7м и сброс около 1 метра.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |



| 1                | 2                                | 3       | 4     | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------|----------------------------------|---------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10.11.<br>1940г. | <b>Румыния,<br/>Вранча</b>       | 7.4     |       | Крупнейшее землетрясение в Европе. Ощущалось в Румынии, Молдове, Болгарии, Югославии, Венгрии, Украине. В Бухаресте было разрушено или сильно повреждено до 50% зданий, в том числе 14-этажное каркасное здание из железобетона. Особенно пострадали здания с кирпичными стенами. В Кишиневе было разрушено 200 зданий. Сильно пострадали ряд церквей, отмечались опрокидывание и поворот надгробных памятников.                                                                                                   |
| 28.11.<br>1945г. | <b>Пакистан,<br/>(у берегов)</b> | 8.3     | 4100  | Цунами.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 21.12.<br>1946г. | <b>Япония,<br/>о.Сикоку</b>      | 8.4     | 1464  | Известно как Нанкайское землетрясение. Большое цунами.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 28.06.<br>1948г. | <b>Япония,<br/>Фукуи</b>         | 7.1     | 3895  | Единственный известный случай гибели человека, попавшего в трещину в грунте. Разрушено 35.5 тыс. зданий. Товарный поезд сошел с рельсов и опрокинулся. "Жертва работала на рисовой плантации, почувствовав толчок, она побежала прочь, но провалилась в трещину, которая открылась на ширину 4 фута. Трещина тотчас же закрылась и поглатила упавшую в нее женщину с головой. Женщина погибла. Тело было сразу же откопано (хотя оставались видны слабые следы трещины) соседями и мужем этой женщины" (Ч.Рихтер). |
| 06.11.<br>1948г. | <b>Туркменистан<br/>Ашгабад</b>  | 7.3-7.6 | 45000 | Землетрясение произошло ночью. В Ашгабаде разрушились более 200 домов из сырцового и обожженного кирпича. Состав товарного поезда вместе с тепловозом был сброшен с рельсов.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

| 1                | 2                                      | 3       | 4    | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------|----------------------------------------|---------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15.08.<br>1950г. | <b>Индия,</b><br>Восточный<br>Ассам    | 8.7     | 150  | Нанесен большой ущерб районам вдоль границы с Тибетом. Сильное изменение рельефа. "Общий вес перемешанных горных пород составил два миллиарда тонн. В образовавшуюся 6-метровую трещину свалились 4 человека вместе с мулом и утонули в заполнявшей трещину зеленовато-желтой грязи. Автомашины были отброшены на расстояние до 800 метров» (Э.Роберте).                                                                                                                |
| 21.07.<br>1952г. | <b>США,</b><br>Керн Каунти             | 7.7     | 12   | Обрушился железнодорожный туннель в Тахачапи. Стальные рельсы согнулись, как мягкие макароны. Много оползней. Сооружения, спроектированные с учетом сейсмического воздействия, почти не получили повреждений, в том числе здания школ. Высотные здания в Лос-Анджелесе и Лонг-Биче на расстоянии 110-160км получили легкие повреждения. <b>Примыкающие друг другу высотные здания с различными периодами "били" друг друга, в результате чего разрушились их стены.</b> |
| 09.09.<br>1954г. | <b>Алжир,</b><br>Эль-Аснам             | 6.8     | 1240 | Разрушен Эль-Аснам.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 28.07.<br>1957г. | <b>Мексика,</b><br>шт.Герреро          | 7.9     | 68   | В городе Мехико в 300км от эпицентра повреждены высотные дома, возведенные на водонасыщенных глинах с малой несущей способностью.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 04.12.<br>1957г. | <b>Монголия,</b><br>Гоби-<br>Алтайское | 7.7-8.6 |      | На поверхности Земли образовался разрыв длиной 275км. Максимальное горизонтальное смещение 8.8 метра, вертикальное - 9.9 метра.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |



| 1                | 2                                   | 3   | 4     | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------|-------------------------------------|-----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 09.07.<br>1958г. | <b>США,</b><br>бух. Литуа<br>Аляска | 7.9 | 5     | Грандиозное землетрясение. "Земля разверзлась". Огромный оползень. В узком заливе с 1000-метровой высоты гор обрушались колоссальные лавины, образовав огромные волны высотой до 165м. Территория в 1 млн.км <sup>2</sup> подвергалась сотрясению. В результате смещений морского дна разорваны подводные кабели на расстоянии 400км от эпицентра.                                                                                                     |
| 29.02.<br>1960г. | <b>Марокко,</b><br>Агадир           | 5.7 | 12000 | Погибло треть жителей Агадира. Город почти полностью разрушен. Причина больших повреждений малая глубина очага: 2-3км.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 22.05.<br>1960г. | <b>Чили,</b><br>в море              | 8.5 | 5700  | Главному толчку 22 мая за день предшествовали несколько сильных толчков, которые заставили людей выбежать на улицу и остаться там. Цунами высотой волн до 6 метров вызвало гибель 61 человека в Хило (Гавайи) и 180 человек в Японии. Путь цунами от Чили до Японии (18000км) занял 22 часа. Длина разрыва на поверхности Земли достигла 1000км, а относительная подвижка – 20 метров. 450 тыс. зданий были сильно повреждены, из них 45000 разрушены. |
| 01.09.<br>1962г. | <b>Иран,</b><br>Казвин              | 7.3 | 12225 | В 324 деревнях разрушено 21тыс. зданий со стенами из сырца с тяжелыми земляными кровлями.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 26.07.<br>1963г. | <b>Македония,</b><br>Скопье         | 6.0 | 1070  | Обрушились и повреждены 55% жилых зданий (около 9000 зданий). 170тыс. человек остались без крова.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

| 1                | 2                                           | 3         | 4   | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------|---------------------------------------------|-----------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 27.03.<br>1964г. | <b>США,</b><br>зал.Принца-<br>Вильям Аляска | 8.4 - 8.6 | 131 | Известно как землетрясение Страстной пятницы. Тяжелые повреждения в Анкоридже (130км от эпицентра) и других городах. Оползни. Разрушились два шести-этажных здания гостиницы "Четыре сезона", возведенные методом подъема этажей вокруг двух монолитных башен. Большое цунами. Изучение последствий землетрясения впервые подтвердили гипотезу возникновения землетрясения вследствие медленных движений литосферных плит. |
| 16.06.<br>1964г. | <b>Япония,</b><br>Ниигата                   | 7.6       | 26  | Разжижение и опускание грунта на больших территориях, вследствие чего значительное количество зданий целиком опрокинулись или наклонились без заметных повреждений конструкций. Большие разрушения в Ниигата на расстоянии 50км от эпицентра. Большое цунами затопило прибрежную зону.                                                                                                                                     |
| 26.04.<br>1966г. | <b>Узбекистан,</b><br>Ташкент               | 5.1-5.9   | 9   | Эпицентр находился под городом. Разрушены или получили повреждения около 1400 различных зданий со стенами из кирпичной кладки и сырцового кирпича. 2211 человек были ранены, 80тыс. остались без крова. Землетрясение стало началом исследований по содержанию радона в подземных водах в качестве предвестника землетрясений.                                                                                             |
| 29.07.<br>1967г. | <b>Венесуэла,</b><br>Каракас                | 6.5       | 266 | Повреждено много домов. Рухнуло несколько высотных зданий в Каракасе.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 11.12.<br>1967г. | <b>Индия,</b><br>плотина Койна              | 6.4       | 177 | Землетрясение вызвано заполнением водохранилища. Городку Койна-Нагар причинен большой ущерб.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |



| 1                | 2                                         | 3   | 4     | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------|-------------------------------------------|-----|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 16.05.<br>1968г. | <b>Япония,</b><br>Хатинохе<br>(у берегов) | 8.6 | 48    | Эпицентр был в океане в 180км от берега. Разрушено 676 зданий, сильно повреждено около 3000. Цунами причинило ущерб многим зданиям и портовым сооружениям.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 31.08.<br>1968г. | <b>Иран,</b><br>Хорасан                   | 7.3 | 15000 | Разрушено 15тыс. домов. Около 60000 человек остались без крова.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 28.03.<br>1970г. | <b>Турция,</b><br>Гедиз                   | 7.3 | 1100  | Полностью разрушено 14852 зданий, частично – 3546.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 31.05.<br>1970г. | <b>Перу,</b><br>Чимбота                   | 7.8 | 67000 | Величайшая сейсмическая катастрофа в Западном полушарии. Около 800000 человек остались без крова. Чудовищный оползень, увлекший за собой десятки миллионов тонн льда и камня, на горе Уаскаран погреб 18000 человек в городах Ранрахирка и Юнгай.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 09.02.<br>1971г. | <b>США,</b><br>Сан-Фернандо               | 6.6 | 58    | Разрушение десятков зданий, больниц и мостов. На узкой скальной гряде, вблизи одной из опор арочной бетонной плотины Пакойма высотой 115м, зарегистрированное значение ускорения достигло 1,25g. На грунтах, зданиях и мостах осуществлялись записи большого количества (250) акселерограмм. Причиной полного обрушения двух зданий госпиталя Олив-Вью и окружной администрации было нарушение известного правила: несущие элементы от фундамента до крыши должны проходить без разрывов. В обоих случаях поперечные стены прерывались на первом этаже, чтобы сделать его сквозным. |
| 04.02.<br>1975г. | <b>Китай,</b><br>Хайчен                   | 7.3 | 1300  | Землетрясение было успешно предсказано, население заранее было эвакуировано. Тяжелые повреждения зданий и сооружений. Благодаря предсказанию человеческих жертв в большой степени (по некоторым подсчетам до 3млн.) удалось избежать.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

| 1                | 2                                    | 3       | 4                 | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------|--------------------------------------|---------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 04.02.<br>1976г. | <i>Гватемала</i>                     | 7.5-8.0 | 23000             | Длина поверхностного разрыва достигла 250км с максимальным левосторонним сдвигом 3,25м, ширина трещины 1-3м. Обширные повреждения глинобитных зданий. Множественные оползни. Пятая часть населения осталась без крова.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 08.04.<br>1976г. | <i>Узбекистан,<br/>Газли</i>         | 7.0     | 1                 | Эпицентр землетрясения находился в пустынной асейсмичной местности, в 40км северо-западнее газового месторождения Газли. Охватило около 1.5 млн. км <sup>2</sup> территории. Зарегистрированное значение ускорения грунта (17.05.1976) в эпицентральной зоне в вертикальном направлении достигло 1.08g. В результате двух землетрясений в Газли не осталось пригодных для эксплуатации жилых и общественных зданий, в том числе и крупнопанельных. Землетрясение стимулировало исследование в области наведенной сейсмичности.                                                                                                                              |
| 17.05.<br>1976г. | <i>Узбекистан,<br/>Кызылкум</i>      | 7.3     |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 28.06.<br>1976г. | <i>Китай,<br/>Хебэй,<br/>Таншань</i> | 7.8     | 243000-<br>500000 | Одна из величайших сейсмических катастроф. Крупнейший индустриальный центр полностью разрушен. Четыре автешока с M=6.5, 6.0, 7.1, 6.0. Весь город сравнялся с землей. Разрушились дома, мосты, автострады, плотины, трубопроводы, искривились железнодорожные пути, перевернулись поезда. Число раненых составило 780тыс. человек. Город был орашен с вертолетов дезинфицирующими средствами для предупреждения эпидемии. Землетрясение происходило всего через 1,5 года после удачного прогнозирования Хайченского землетрясения (4.02.1975). Оно стало причиной гибели огромного количества людей и сильно расшатало позиции сторонников прогнозирования. |



| 1                | 2                                        | 3       | 4     | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------|------------------------------------------|---------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 04.03.<br>1977г. | <i>Румыния,<br/>Врача</i>                | 7.2     | 1570  | В Бухаресте, в 200км от очага, обрушилось много высотных (10-ти этажных) зданий, погиб 1391 человек, 11275 человек были ранены. Обрушилось или сильно пострадало 32897 квартир, 763 промышленных, строительных и транспортных предприятий, без жилья остались 34582 семьи. Землетрясение вызвало разрушение и повреждения в Югославии, Болгарии, Молдове. Оно ощущалось даже в Москве и Италии. |
| 16.09.<br>1978г. | <i>Иран,<br/>Табас</i>                   | 7.7     | 18220 | В Табас с населением 130000 человек погибло 9000.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 15.04.<br>1979г. | <i>Черногория,<br/>в море</i>            | 7.2     | 156   | Эпицентр на адриатическом побережье. Обширные повреждения.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 10.11.<br>1980г. | <i>Алжир,<br/>Эль-Аснам</i>              | 7.3     | 5000  | Вдоль разлома образовались большие уступы, обрушилось много зданий. 200000 человек остались без крова. Эль-Аснам разрушен на 60%.                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 19.09.<br>1985г. | <i>Мексика,<br/>у берегов<br/>океана</i> | 8.2     | 10000 | Эпицентр в Тихом океане. В городе Мехико на расстоянии <b>свыше 400км от эпицентра</b> (зарегистрированное значение ускорения грунта - 0.17g, преобладающий период - 2.1сек, дин. коэфф. - 5) обрушились многие высотные здания (12-15 этажей) старой постройки, возведенные на слабых насыпных грунтах с мощностью до 50м.                                                                     |
| 07.12.<br>1988г. | <i>Армения,<br/>Спитак</i>               | 6.8-7.0 | 25000 | 37-километровый разрыв на поверхности Земли с максимальных сбросом 2м. Разжижение грунта, оползни, камнепады, искривление рельсов железнодорожных линий. 130тыс. раненых, 500тыс. человек остались без крова. Разрушены более чем 35000 жилых домов, 2000 общественных и промышленных зданий.                                                                                                   |

| 1                | 2                              | 3          | 4     | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------|--------------------------------|------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17.11.<br>1989г. | <b>США,</b><br>Ломо Приета     | 7.1        | 62    | 40-километровый разрыв на поверхности Земли с 2.2-метровой горизонтальной подвижкой. Большие трещины на земле, разжижение грунта, оползни, обвалы. Общая сумма ущерба - 60млрд. долларов. На территориях с радиусом до 180км получены 690 записей ускорений грунтов и на различных уровнях многоэтажных зданий, мостов и плотин. Тяжелые повреждения получило большое количество мостов, жилых и общественных зданий, в том числе на расстоянии 80км от эпицентра в Сан-Франциско. 3757 человек были ранены, 12000 остались без крова. |
| 20.06.<br>1990г. | <b>Иран,</b><br>Манджил-Рудбай | 7.7        | 35000 | На поверхности Земли образовался разрыв с 2.5-метровым уступом, трещины шириной до 50см, оползни, разжижения грунта, камнепады. Разрушились 100000 жилых, общественных, промышленных и сельскохозяйственных зданий и сооружений, мостов, плотин.                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 29.04.<br>1991г. | <b>Грузия,</b><br>Амблролаури  | 6<br>(7.3) | 100   | Наблюдались сильные оползни, камнепады, разрывы поверхностных структур, лавинообразным сходом откоса погребено село Хахиети. Разрушены и значительно повреждены около 50000 жилых домов, более 1000 общественных зданий, производственных и сельских объектов, осталось без крова более 100000 человек.                                                                                                                                                                                                                                |
| 12.06.<br>1993г. | <b>Япония,</b><br>о.Окушири    | 7.8        | 230   | Эпицентр находился в Японском море на расстоянии 70км от западного берега о.Хоккайдо. На острове Окушири высота волн цунами достигла 30м, от которого пострадали 690 строений. Крупный прибрежный оползень, повсеместные трещины, разрушение проезжей части дорог.                                                                                                                                                                                                                                                                     |



| 1                | 2                                      | 3       | 4     | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------|----------------------------------------|---------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17.01.<br>1994г. | <b>США,</b><br>Нортридж,<br>Калифорния | 6.7     | 68    | Получили серьезные повреждения большое количество металлических мостов и многоэтажных зданий со стальными каркасом в Лос-Анджелесе. Во многих случаях <b>причиной повреждений были сварочные соединения элементов металлического каркаса.</b>                                                                                                       |
| 17.01.<br>1995г. | <b>Япония,</b><br>Коби                 | 6.9-7.2 | 6000  | Получили ранения 26000 человек, 300000 остались без крова. Полностью были разрушены 20000 зданий, 35000 – повреждены на 50%. В Ханшине с основания была оторвана эстакада скоростной дороги на протяжении 600м. В г.Кобе <b>целиком обрушились средние этажи 6-12-этажных ж/б зданий.</b> Общий ущерб землетрясения составил 200млрд. долларов США. |
| 27.05.<br>1995г. | <b>Россия,</b><br>Сахалин              | 7.5     | 2000  | Землетрясение на земной поверхности образовало разрыв длиной 30км. Отмечено разжижение песчаных грунтов, разрушение насыпей дорог, оползни. В Нефтегорске 17 пятиэтажных жилых зданий со стенами из крупных кирпичных блоков обвалились, оставив под собой 2500 человек, 1990 из которых погибли.                                                   |
| 10.05.<br>1997г  | <b>Иран,</b><br>пров. Хорасан          | 7.3     | 1568  | В 147 деревнях были большие повреждения. 2600 человек получили ранения.                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 17.08.<br>1999г. | <b>Турция,</b><br>Измит                | 7.4     | 17000 | Длина разрыва на поверхности Земли достигла 120км, правосторонний сдвиг 4.5м. Обвалились более чем 20000 зданий.                                                                                                                                                                                                                                    |
| 25.01.<br>1999г. | <b>Колумбия</b><br>г.Армения           | 6.2     | 1200  | Разрушились более 50000 зданий и сооружений, вследствие чего 5000 человек получили ранения, 200000 - остались без крова.                                                                                                                                                                                                                            |

| 1                | 2                                    | 3   | 4                       | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------|--------------------------------------|-----|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 21.09.<br>1999г. | <i>Тайван,<br/>Чи-Чи</i>             | 7.7 | 2350                    | Разрушились 10000 зданий, транспортные и гидротехнические сооружения, 7000 получили повреждения. Ранены 8700 человек. После двойного интегрирования зарегистрированной в очаговой зоне акселерограммы с максимальным ускорением 0.4g, перемещение грунта составило около 10м. Это, по-видимому, подвижка одного из вспаренных блоков.               |
| 26.07.<br>2001г. | <i>Индия,<br/>пров.<br/>Гуджарат</i> | 8.1 | 100000<br>(не<br>офиц.) | Большие повреждения на территории с радиусом до 250км.                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 25.04.<br>2002г. | <i>Грузия,<br/>Тбилиси</i>           | 4.5 | 9                       | Очаг землетрясения находился под городом с глубиной 2.4-4км. Около 4800 малоэтажных зданий старой застройки (конец 19-го века) с кирпичными и каменными несущими стенами в центре города получили повреждения 3-4 степени. Это было самое сильное землетрясение в Тбилиси за последние 1500 лет.                                                    |
| 22.06.<br>2002г. | <i>Иран</i>                          | 6.4 | 261                     | 25000 человек остались без крова, 1300 – были ранены.                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 01.05.<br>2003г. | <i>Турция,<br/>Бинголь</i>           | 6.4 | 200                     | Разрушены более чем 100 зданий школ.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 21.05.<br>2003г. | <i>Алжир,<br/>Земмоури</i>           | 6.8 | 2500                    | Обвадились 12000 зданий, 100000 человек остались без крова, 1200 – были ранены.                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 26.05.<br>2003г. | <i>Япония,<br/>северо-восток</i>     | 7.0 |                         | Эпицентр в Тихом океане. На суше в трех участках были зарегистрированы ускорения грунта соответственно 1.21g, 1.27g и 1.0g, но с очень коротким преобладающим периодом (около 0.12сек.), вследствие чего в стенах школьных зданий образовались легкие повреждения. 172 человека были ранены. Крупномасштабные подвижки по берегам склонов, оползни. |



| 1                | 2                                                         | 3   | 4      | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------|-----------------------------------------------------------|-----|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 26.12.<br>2003г. | <i>Иран,<br/>Бам</i>                                      | 6.3 | 50000  | Полностью разрушен исторический город Бам, находящегося в юго-востоке Ирана. Обвалились 1-2-этажные глинобитные дома. Многие погибли, находясь под завалами и от удушения земляной пыли. Землетрясение произошло ранним утром, что также стало причиной большего количества человеческих жертв.                                                                                                                                                                                                                                   |
| 26.12.<br>2004г. | <i>Индонезия,<br/>Индийский океан, 160км от о.Суматра</i> | 9.0 | 300000 | Самое сильное землетрясение, зарегистрированное на Земле. Страшное цунами высотой волн до 30м. Землетрясение и цунами охватили 12 стран в том числе Индонезия, Индия, Шри-Ланка, Таиланд, Малазия. Больше всего пострадал г.Банда-Ачех на о.Суматра. По некоторым сведениям, о.Суматра сместился на 34м на юго-запад, ось Земли сместилась на доли сантиметров. Основной причиной разрушения и гибели людей было цунами, от которого пострадали даже берега Африки. Более 5млн. человек нуждались в помощи, 500000 – были ранены. |
| 28.03.<br>2005г. | <i>Индонезия,<br/>о.Нias<br/>Индийский океан</i>          | 8.7 | 3000   | Население заранее было уведомлено об опасности цунами, но оно было слабым – 3м высотой. Полностью подверг повреждениям о.Нias.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 08.11.<br>2005г. | <i>Пакистан,<br/>Кашмир</i>                               | 7.6 | 80000  | Самое сильное землетрясение за последние 100 лет в этом районе. Разрушились тысячи зданий и сооружений. 63тыс. человек получили ранения, 3.5млн. остались без крова.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 27.05.<br>2006г. | <i>Индонезия,<br/>Индийский океан</i>                     | 6.3 | 5500   | Эпицентр находился в 25км от г.Джокьякарта в океане. Разрушены десятки тысяч домов, в том числе аэропорт. Были ранены 20000 человек, 200000 – остались без крова.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

| 1                | 2                                   | 3       | 4     | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------|-------------------------------------|---------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 25.03.<br>2007г. | <i>Япония</i>                       | 6.9-7.1 | 1     | Разрушены 68 зданий, 200 человек получили ранения. Нарушены автомобильные и железнодорожные сообщения. На грунте образовались широкие трещины.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 25.03.<br>2007г. | <i>Тихий океан,<br/>ост.Вануату</i> | 7.3     | 1     | 117 человек получили ранения.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 02.04.<br>2007г. | <i>Тихий океан</i>                  | 7.5-8.0 | 20    | Эпицентр находился в юго-восточном районе архипелага Соломоновские острова на расстоянии 300км от г.Хониара. Мощное цунами высотой 10м покрыло обширную территорию Соломоновских островов. 30000 человек и две деревни остались под водой.                                                                                                                                                                                                                    |
| 16.07.<br>2007г. | <i>Япония,<br/>Ниигата</i>          | 6.9     | 10    | Существенные изменения на поверхности Земли. Разрушены 300 домов, 100 человек получили ранения. Приостановлен выпуск автомашин Тойота и Нисан. Сработали устройства автоматической остановки реакторов АЭС. Большой пожар на трансформаторной подстанции АЭС. Произошла небольшая утечка радиации, не опасная для людей и окружающей среды. Атомная станция на год приостановила работу. Это первый случай серьезного нарушения работы АЭС при землетрясении. |
| 18.08.<br>2007г. | <i>Перу,<br/>Тихий океан</i>        | 7.9     | 600   | Два сильнейших удара с магнитудами 7.9 и 7.5. Глубина очага 40км. Четыре города на юге Перу превратились в руины. Тысячи раненых, сотни разрушенных домов. В городе Ика обвалилась церковь, где происходила дневная месса, оставив под обломками 60 человек.                                                                                                                                                                                                  |
| 12.05.<br>2008г. | <i>Китай,<br/>Сычуань</i>           | 7.9-8.0 | 70000 | Массовые разрушения. Образовались новые озера, оползни. Серьезные повреждения плотин и хим.заводов. 290 тыс. раненных, 6 млн. человек остались без крова.                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |



**ШКАЛА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ MSK-64**

(для 6-9 баллов — редакция Межведомственного совета  
по сейсмологии и сейсмостойкому строительству, 1973) [29]

**Классификация, принятая в шкале**

*Типы сооружений* (здания, возведённые без необходимых антисейсмических мероприятий)

- тип А — здания из рваного камня, сельские постройки, дома из кирпича-сырца, глинобитные дома;
- тип Б — обычные кирпичные дома, здания крупноблочного типа, здания из естественного камня;
- тип В — здания панельного типа, каркасные железобетонные здания, деревянные дома хорошей постройки.

*Количественные характеристики:*

- отдельные - около 10%
- многие - около 50 %
- большинство - около 75%

**Классификация повреждений**

- 1-я степень. Легкие повреждения: тонкие трещины в штукатурке и откалывание небольших кусков штукатурки;
- 2-я степень. Умеренные повреждения: небольшие трещины в стенах, откалывание довольно больших кусков штукатурки, падение черепицы с крыш, трещины в дымовых трубах, падение частей дымовых труб;
- 3-я степень. Тяжелые повреждения: большие глубокие и сквозные трещины в стенах, падение дымовых труб;
- 4-я степень. Разрушения: обрушение внутренних стен и стен заполнения каркаса, проломы в стенах, обрушение частей зданий, разрушение связей между отдельными частями зданий;
- 5-я степень. Обвалы. Полное разрушение зданий.

*Группировка признаков шкалы:*

- а) люди и их окружение;
- б) сооружения;
- в) природные явления.

**Интенсивность (в баллах)****I балл. Неощутимое землетрясение**

а) Интенсивность колебаний лежит ниже предела чувствительности людей; сотрясения почвы обнаруживаются и регистрируются только сейсмографами.

## **II балла. Едва ощутимое землетрясение**

а) Колебания ощущаются только отдельными людьми, находящимися в покое внутри помещений, особенно на верхних этажах.

## **III балла. Слабое землетрясение**

а) Землетрясение ощущается многими людьми, находящимися внутри помещений; под открытым небом - только в благоприятных условиях. Колебания схожи с сотрясением, создаваемым проезжающим легким грузовиком. Внимательные наблюдатели замечают легкое раскачивание висячих предметов, несколько более сильное - на верхних этажах.

## **IV балла. Заметное сотрясение**

а) Землетрясение ощущается внутри зданий многими людьми, под открытым небом - немногими. Кое-где спящие просыпаются, но никто не пугается. Колебания схожи с сотрясением, создаваемым проезжающим тяжело нагруженным грузовиком. Дребезжание окон, дверей, посуды. Скрип полов и стен. Начинается дрожание мебели. Висячие предметы слегка раскачиваются. Жидкость в открытых сосудах слегка колеблется. В стоящих на месте автомашинах толчок заметен.

## **V баллов. Пробуждение**

а) Землетрясение ощущается всеми людьми внутри помещений, под открытым небом - многими. Многие спящие просыпаются. Немногие люди выбегают из помещений. Животные беспокоятся. Сотрясение зданий в целом, висячие предметы сильно качаются. Картины сдвигаются с места. В редких случаях останавливаются маятниковые часы. Некоторые неустойчивые предметы опрокидываются или сдвигаются. Незапертые двери и окна распахиваются и снова захлопываются. Из наполненных открытых сосудов в небольших количествах выплескивается жидкость. Ощущаемые колебания схожи с колебаниями, создаваемыми падением тяжелых предметов внутри здания.

б) Возможны повреждения 1-й степени в отдельных зданиях типа А;

в) В некоторых случаях меняется дебит источников.

## **VI баллов. Испуг**

а) Землетрясение ощущается большинством людей как внутри помещений, так и под открытым небом. Многие люди, находящиеся в зданиях, пугаются и выбегают на улицу. Некоторые теряют равновесие. Домашние животные выбегают из укрытий. В немногих случаях



может разбиться посуда и другие стеклянные изделия; падают книги. Возможно движение тяжелой мебели; может быть слышен звон малых колоколов на колокольнях.

б) Повреждения 1-й степени в отдельных зданиях типа Б и во многих зданиях типа А. В отдельных зданиях типа А повреждения 2-й степени.

в) В немногих случаях - оползни, на сырых грунтах возможны трещины шириной до 1 см; в горных районах отдельные случаи оползней. Возможны изменения дебита источников и уровня воды в колодцах.

## **VII баллов. Повреждение зданий**

а) Большинство людей испуганы и выбегают из помещений. Многие люди с трудом удерживаются на ногах. Колебания отмечаются лицами, ведущими машины. Звонят большие колокола.

б) Во многих зданиях типа В повреждения 1-й степени и в отдельных - 2-й степени. Во многих зданиях типа Б повреждения 2-й степени и в отдельных - 3-й степени. Во многих зданиях типа А повреждения 3-й степени и в отдельных - 4-й степени. В отдельных случаях оползни проезжих частей дорог на крутых склонах и трещины на дорогах. Нарушение стыков трубопроводов; трещины в каменных оградах.

в) На поверхности воды образуются волны, вода становится мутной вследствие поднятия ила. Изменяется уровень воды в колодцах и дебит источников. В немногих случаях возникают или пропадают существующие источники воды. Отдельные случаи оползней на песчаных или гравелистых берегах рек.

## **VIII баллов. Сильные повреждения зданий**

а) Испуг и паника; испытывают беспокойство даже лица, ведущие автомашины. Кое-где обламываются ветви деревьев. Сдвигается и иногда опрокидывается тяжелая мебель. Часть висячих ламп повреждается.

б) Во многих зданиях типа В повреждения 2-й степени и в отдельных - 3-й степени. Во многих зданиях типа Б повреждения 3-й степени; в отдельных - 4-й степени. Во многих зданиях типа А повреждения 4-й степени, в отдельных - 5-й степени. Отдельные случаи разрыва стыков трубопроводов. Памятники и статуи сдвигаются. Надгробные памятники опрокидываются. Каменные ограды разрушаются.

в) Небольшие оползни на крутых откосах выемок и насыпей дорог; трещины в грунтах достигают нескольких сантиметров. Возникают новые водоемы. Иногда пересохшие колодцы наполняются водой или существующие колодцы иссыкают. Во многих случаях изменяется дебит источников и уровень воды в колодцах.

## **IX баллов. Всеобщие повреждения зданий**

а) Всеобщая паника; большие повреждения мебели. Животные мечутся и издают крики.

б) Во многих зданиях типа В повреждения 3-й степени и в отдельных случаях - 4-й степени. Во многих зданиях типа Б повреждения 4-й степени и в отдельных - 5-й степени. В большинстве зданий типа А повреждения 5-й степени. Памятники и колонны опрокидываются. Значительные повреждения искусственных водоемов; разрывы части подземных трубопроводов. В отдельных случаях - искривление железнодорожных рельсов и повреждение проезжих частей дорог.

в) На равнинах наводнения, часто заметны наносы песка и ила. Трещины в грунтах достигают ширины 10 см, а по склонам и берегам рек - свыше 10 см; кроме того, большое количество тонких трещин в грунтах. Скалы обваливаются; частые оползни, осыпания грунта. На поверхности воды большие волны.

## **X баллов. Всеобщие разрушения зданий**

б) Во многих зданиях типа В повреждения 4-й степени, а в отдельных - 5-й степени. Во многих зданиях типа Б повреждения 5-й степени, в большинстве зданий типа А повреждения 5-й степени. Опасные повреждения плотин и дамб, серьезные повреждения мостов. Легкие искривления железнодорожных рельсов. Разрывы или искривление подземных трубопроводов. Дорожные покрытия и асфальт образуют волнообразную поверхность.

в) Трещины в грунтах шириной в несколько дециметров и в некоторых случаях - до 1 м. Параллельно руслам водных потоков появляются широкие разрывы. Осыпание рыхлых пород с крутых склонов. Возможны большие оползни на берегах рек и крутых морских побережьях. В прибрежных районах перемещаются песчаные и илистые массы. Выплескивание воды в каналах, озерах, реках и т. д. Возникают новые озера.

## **XI баллов. Катастрофа**

б) Серьезные повреждения даже зданий хорошей постройки, мостов, плотин и железнодорожных путей; шоссе и дороги приходят в негодность; разрушение подземных трубопроводов.

в) Значительные деформации почвы в виде широких трещин, разрывов и перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях; многочисленные горные обвалы. Определение интенсивности сотрясения (балльности) требует специального исследования.



## **XII баллов. Изменение рельефа**

б) Сильное повреждение или разрушение практически всех наземных и подземных сооружений.

в) Радикальные изменения земной поверхности. Наблюдаются значительные трещины в грунтах с обширными вертикальными и горизонтальными перемещениями. Горные обвалы и обвалы берегов рек на больших площадях. Возникают озера, образуются водопады, изменяются русла рек. Определение интенсивности (балльности) требует специального исследования.

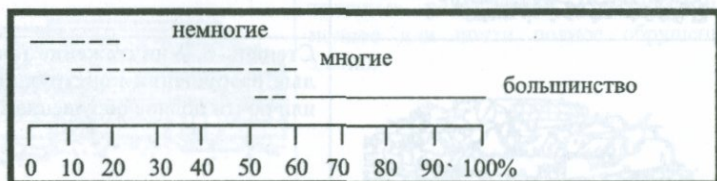
## ЕВРОПЕЙСКАЯ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКАЯ ШКАЛА ИНТЕНСИВНОСТИ EMS\*

### 1.Разделение зданий по классам уязвимости

| Типы зданий                                                 | Класс уязвимости  |                   |               |       |   |   |
|-------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------|---|---|
|                                                             | A                 | B                 | C             | D     | E | F |
| кладка                                                      |                   |                   |               |       |   |   |
| Бутовый камень, полевой камень                              | o                 |                   |               |       |   |   |
| Саман (земляной кирпич, адоба)                              | o ---             |                   |               |       |   |   |
| Простой камень                                              | --- o             |                   |               |       |   |   |
| Массивный камень                                            |                   | --- o ---         |               |       |   |   |
| Неармированная кладка (кирпич, бетонные блоки)              | --- o ---         |                   |               |       |   |   |
| Неармированная кладка (кирпич) с ж/б перекрытиями           |                   | --- o             |               |       |   |   |
| Усиленная кладка (кирпич) (армированная с ж/б сердечниками) |                   |                   | --- o ---     |       |   |   |
| железобетон (ж/б)                                           |                   |                   |               |       |   |   |
| Ж/б без антисейсмических мероприятий (без ASD)              | --- --- --- o --- |                   |               |       |   |   |
| Ж/б с минимальным уровнем ASD                               |                   | --- --- --- o     |               |       |   |   |
| Ж/б со средним уровнем ASD                                  |                   |                   | --- --- --- o |       |   |   |
| Ж/б с высоким уровнем ASD                                   |                   |                   |               | --- o |   |   |
| дерево                                                      |                   |                   |               |       |   |   |
| Деревянные здания                                           |                   | --- --- --- o --- |               |       |   |   |

|       |                                                     |
|-------|-----------------------------------------------------|
| о     | - наиболее вероятный класс уязвимости;              |
| ----- | - вероятный диапазон;                               |
| ----- | - диапазон менее, вероятный, исключительные случаи. |

## 2. Определение количественных характеристик



\* Перевод с английского М.А.Клячко, С.-Петербург, 1996.

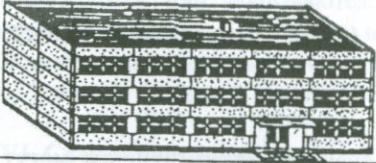
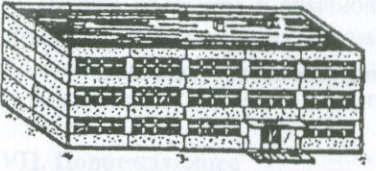


### 3. Классификация повреждений

Замечание: каким образом деформируется здание при землетрясении, зависит от типа здания. Как широкую категорию, в одну группу можно собрать здания из кладки и ж/б.

| Таблица 1. Классификация повреждений каменных и кирпичных зданий                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Степень 1. Пренебрежимые или легкие повреждения (нет повреждений конструкций): волосные трещины в немногих стенах; отпадение маленьких кусков только штукатурки. Очень в редких случаях падение незакрепленных камней с верхних частей здания.                                                                |
|    | Степень 2. Умеренные повреждения (легкое повреждение конструкции, умеренные повреждения неконструктивных элементов): трещины во многих стенах; падение относительно больших кусков штукатурки; падают части дымовых труб.                                                                                     |
|    | Степень 3. Существенные или тяжелые повреждения (умеренные повреждения конструкции, тяжелые повреждения неконструктивных элементов): большие протяженные трещины в большинстве стен; черепица соскальзывает с крыши. Дымовые трубы ломаются на уровне крыши; разрушение отдельных неконструктивных элементов. |
|   | Степень 4. Очень тяжелые повреждения (Тяжелые повреждения конструкции, очень тяжелые повреждения неконструктивных элементов): серьезные разрушения стен; частичные разрушения конструкции здания.                                                                                                             |
|  | Степень 5. Уничтожение (очень тяжелые разрушения конструкции): полное или почти полное обрушение здания.                                                                                                                                                                                                      |

**Таблица 2. Классификация повреждений  
зданий из железобетона**

|                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p><b>Степень 1. Пренебрежимые или легкие повреждения (нет повреждений конструкций):</b> тонкие трещины в штукатурке над частями каркаса и в простенках.</p>                                                                                                                                                           |
|    | <p><b>Степень 2. Умеренные повреждения (легкое повреждение конструкции, умеренные повреждения неконструктивных элементов):</b> волосные трещины в колоннах и балках; выпадение раствора из сочленений с поддерживаемыми стеновыми панелями; трещины в перегородках; падение кусков хрупкой шпатлевки и штукатурки.</p> |
|    | <p><b>Степень 3. Существенные или тяжелые повреждения (умеренные повреждения конструкции, тяжелые повреждения неконструктивных элементов):</b> трещины в колоннах с отделением кусков бетона, трещины в балках.</p>                                                                                                    |
|   | <p><b>Степень 4. Очень тяжелые повреждения (Тяжелые повреждения конструкции, очень тяжелые повреждения неконструктивных элементов):</b> серьезные повреждения сочленений строительного каркаса с разрушением бетона и оголением арматуры; частичное падение здания; наклонение колонн.</p>                             |
|  | <p><b>Степень 5. Уничтожение (очень тяжелые разрушения конструкции):</b> полное или почти полное обрушение здания.</p>                                                                                                                                                                                                 |



#### 4. Определения степеней интенсивности

##### Устройство шкалы:

- а) Действие на людей.
- б) Действие на предметы и природу (кроме повреждений зданий, воздействий на грунт и провалов грунта).
- в) Повреждение зданий.

**Вступительное замечание:** Отдельные значения интенсивности могут включать эффекты, характерные для толчков меньших величин, даже если это не указано явно.

##### I. Не ощутимое

- а) Не ощущается даже при самых благоприятных обстоятельствах.
- б) Нет воздействия.
- в) Нет повреждений.

##### II. Едва заметное

- а) Дрожание ощущается только очень немногими (менее 1%) людьми в покое и в особо чувствительных точках зданий.
- б) Нет воздействия.
- в) Нет повреждений.

##### III. Слабое

- а) Землетрясение в помещениях ощущается немногими. Люди в покое ощущают покачивание или легкое дрожание.
- б) Висящие объекты слегка качаются.
- в) Нет повреждений.

##### IV. Общезаметное

- а) Землетрясение в помещении ощущается многими, на улице - очень немногими. Некоторые люди встревожены. Уровень вибрации не пугает. Вибрация умеренная. Наблюдатели ощущают легкое дрожание или покачивание здания, комнаты или кровати, стула и т.д.
- б) Фарфор, стаканы, окна и двери дребезжат. Висящие объекты раскачиваются. Изредка заметно качается легкая мебель. Деревянные предметы изредка скрипят.
- в) Нет повреждений.

##### V. Сильное

- а) Землетрясение в помещении замечают большинство, снаружи немногие. Немного людей пугается и выбегает на улицу. Многие спящие просыпаются. Наблюдатели ощущают сильное сотрясение или качание всего здания, комнаты или мебели.

- б) Висящие предметы заметно качаются. Фарфор и стекло звенят, соударяясь друг о друга. Мелкие, с высоким центром тяжести или плохо закрепленные предметы могут сдвинуться или упасть. Двери и окна открываются или закрываются. В немногих случаях бьется оконное стекло. Жидкости волнуются и могут пролиться из полных сосудов. Животные в помещении проявляют беспокойство.
- в) У немногих зданий повреждения степени 1.

#### **VI. Слегка повреждающее**

- а) Ощущается большинством внутри и многими снаружи. Немногие люди теряют равновесие. Многие люди пугаются и выбегают из дома.
- б) Мелкие предметы с обычной устойчивостью могут упасть, а мебель сдвинуться. В немногих случаях могут разбиться тарелки и стекло. Домашние животные (даже на улице) могут испугаться.
- в) Повреждения степени 1 у многих зданий; у немногих - степени 2.

#### **VII. Повреждающее**

- а) Большинство людей пугаются и пытаются выбежать на улицу. Многим трудно стоять, особенно на верхних этажах.
- б) Мебель двигается, неустойчивая может опрокинуться. Предметы падают с полок в большом количестве. Вода выплескивается из сосудов, цистерн и бассейнов.
- в) Многие здания класса уязвимости В и немногие класса С имеют повреждения степени 2. Многие здания класса А и немногие класса В имеют повреждения степени 3; немногие из класса А имеют повреждения степени 4. Повреждения особенно заметны в верхних частях зданий.

#### **VIII. Сильно повреждающее**

- а) Многим людям трудно стоять, даже на улице.
- б) Мебель может опрокинуться. Предметы типа телевизора, пишущей машинки падают на пол. Могильные камни могут быть сдвинуты, повернуты или перевернуты. На очень мягком грунте могут быть видны волны.
- в) Многие здания класса уязвимости С имеют повреждения степени 2. Многие здания класса В и немногие класса С имеют повреждения степени 3. Многие здания класса А и немногие класса В имеют повреждения степени 4; немногие здания класса А имеют повреждения степени 5. Немногие здания класса D имеют повреждения степени 2.

#### **IX. Разрушительное**

- а) Общая паника. Людей может бросить на землю.
- б) Многие памятники и колонны падают или поворачиваются. На мягком грунте видны волны.
- в) Многие здания класса уязвимости С имеют повреждения степени 3. Многие здания класса В и немногие класса С имеют повреждения степени



4. Многие здания класса А и немногие класса В имеют повреждения степени 5.

Многие здания класса D имеют повреждения степени 2; немногие - степени 3. Немногие здания класса Е имеют повреждения степени 2.

#### **X. Очень разрушительное**

в) Многие здания класса уязвимости С имеют повреждения степени 4. Многие здания класса В и немногие класса С имеют повреждения степени 5, так же, как и большинство класса А.

Многие здания класса D имеют повреждения степени 3; немногие - степени 4. Многие здания класса Е имеют повреждения степени 2; немногие - степени 3. Немногие здания класса F имеют повреждения степени 2.

#### **XI. Уничтожающее**

в) Большинство зданий класса уязвимости С имеют повреждения степени 4. Большинство зданий класса В и многие класса С имеют повреждения степени 5.

Многие здания класса D имеют повреждения степени 4; немногие - степени 5. Многие здания класса Е имеют повреждения степени 3; немногие - степени 4. Многие здания класса F имеют повреждения степени 2, немногие - степени 3.

#### **XII. Полностью уничтожающее**

в) Практически все здания над и под землей уничтожены.

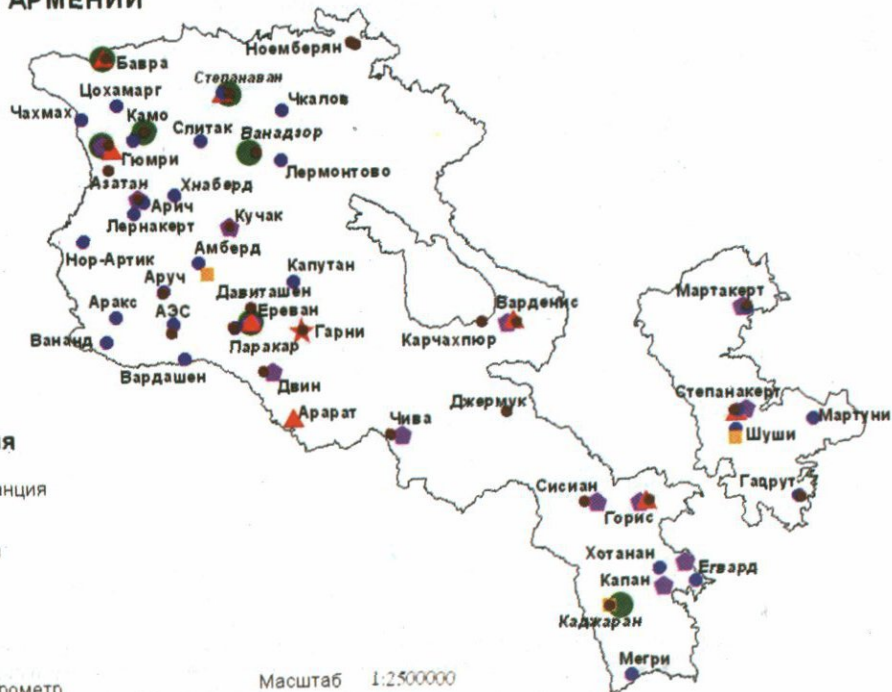




# НАЦИОНАЛЬНАЯ СЕТЬ НАБЛЮДЕНИЙ НССЗ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ



НССЗ РА  
ЕРЕВАН 2007 г.



САЛА ПОВРЕЖДЕНИЙ ПО НОРМАМ СНРА II-6.02.2006 РА

| Уровень повреждения                  | Характерные особенности количественные показатели повреждения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Увеличение периода колебания объекта по сравнению с неповрежденным, % | Мероприятия по восстановлению и усилению                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Повреждений нет                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- нет повреждений</li> <li>- осыпание чешуек побелки стен и потолка</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0                                                                     | Не требуется                                                                                                                                                                                                                      |
| Легкие повреждения несущих элементов | <ul style="list-style-type: none"> <li>- мелкие трещины (до 0,5 мм) в штукатурке</li> <li>- отпадание кусков штукатурки</li> <li>- тонкие трещины по контуру перегородок и панелей</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0-5                                                                   | Ремонт отделки здания                                                                                                                                                                                                             |
| Умеренные повреждения конструкций    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- небольшие трещины (0,5-1 мм) в каменных перемычках, простенках, стенах</li> <li>- отпадание облицовки, больших кусков штукатурки на больших участках</li> <li>- трещины до 0,5 мм в несущих железобетонных элементах и выколы бетона вблизи оснований колонн</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                           | 10-15                                                                 | Ремонт отделки здания с восстановлением поврежденных элементов                                                                                                                                                                    |
| Значительные повреждения конструкций | <ul style="list-style-type: none"> <li>- сквозные, наклонные и диагональные трещины (1-10 мм) в каменных стенах</li> <li>- расслоение кладки в отдельных элементах, не влияющие на пространственную жесткость здания</li> <li>- смещение отдельных плит перекрытий</li> <li>- отдельные трещины в примыканиях наружных и внутренних стен</li> <li>- локальные отколы бетона в шпонках замоноличивания и его раздробление</li> <li>- трещины до 0,5 мм и выколы бетона, оголение арматуры колонн</li> <li>- обвал и наклонение дымоходов, обрушение отдельных участков парапетов</li> </ul> | 30-40                                                                 | Временная эвакуация людей для восстановления, усиления или восстановления с усилением и ремонта здания, после чего оно пригодно к дальнейшей эксплуатации                                                                         |
| Сильные повреждения конструкций      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- обрушение наружных самонесущих и частично несущих стен</li> <li>- разрыв антисейсмических поясов и отрыв наружных стен от внутренних</li> <li>- значительные смещения перекрытий и площадок опирания; падение панелей</li> <li>- разрушение значительного количества перемычек и простенков и частично стеновых панелей крупнопанельных зданий, разрушение участков стен монолитных зданий</li> <li>- разрушение бетонов, оголение арматуры, выпучивание продольной арматуры колонн, отрыв закладных деталей</li> </ul>                           | 50-100                                                                | Немедленная эвакуация людей. Снос здания или большие восстановительные работы по его усилению для пригодности к эксплуатации. Вопрос решается для каждого отдельного объекта с учетом технико-экономических и социальных факторов |
| Обрушение                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- частичное или полное обрушение здания</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | -                                                                     | Снос                                                                                                                                                                                                                              |



## ЭТИ ПРАВИЛА ДОЛЖНЫ ЗНАТЬ ВСЕ [29]

**Что делать до, во время и после землетрясения  
(практические рекомендации)**

Во время землетрясения очень редко причиной человеческих жертв бывает движение почвы само по себе. Большинство жертв является результатом падения предметов, камней, стекол, стен и т.д., когда сильные колебания сотрясают и разрушают здания. Вот главные причины несчастных случаев:

- обрушение отдельных частей здания, падение кирпичей, дымовых труб, карнизов, лепных украшений, балконов, облицовочных плит, рам, осветительных установок, статуй, декоративной лепки;
- падение битых стекол, особенно с верхних этажей;
- падение разорванных электропроводов на проезжую часть улиц;
- падение тяжелых предметов в квартире;
- пожары, вызванные утечкой газа из повреждением труб и замыканием электролиний. Опасность пожара усугубляется отсутствием воды в результате возможных повреждений водопровода;
- неконтролируемые действия людей в результате паники.

Уменьшить опасность травм и гибель людей при землетрясении можно, если заранее спокойно подготовиться к нему и продумать образ своих действий.

**До землетрясения**

*Основное правило.* Продумайте заранее образ ваших действий во время землетрясения в самых обычных условиях: дома, на работе, в кино, театре или на улице. Это поможет вам в дальнейшем действовать спокойно и результативно в аварийной ситуации.

*На работе.* Порядок и ответственность во всем - наилучшая подготовка. Любая неаккуратность, всякая недоделка во время землетрясения могут обернуться несчастьем. В особенности это относится к качеству строительно-монтажных работ.

В каждом учреждении должен существовать четкий план экстренных мероприятий на случай землетрясения с указанием в нем ответственных лиц и перечислением их обязанностей.

Следует освободить коридоры, проходы, лестничные клетки и внутренние двери. Тяжелые шкафы и стеллажи следует надежно прикрепить к стенам. Нельзя размещать тяжелые предметы на верхних полках. Каждый сотрудник должен знать расположение пожарных кранов, электрорубильников и газовых кранов.

*Дома.* Прежде всего следует регулярно проверять состояние электропроводки и газовых труб. Все жильцы должны знать, где находится рубильник, газовый и водопроводный магистральные краны, чтобы в случае необходимости можно было бы их перекрыть.

Шкафы, этажерки, полки и стеллажи в квартирах нужно закрепить, а с верхних полок снять тяжелые предметы.

Надо обучить всех членов семьи правилам оказания первой помощи - в случае сильного землетрясения у медицинской службы будет много забот.

Всегда держите наготове огнетушители, аптечку первой помощи. Все члены семьи должны знать, где находятся эти предметы.

## **Во время землетрясения**

Самая лучшая из всех возможных мер защиты от землетрясения - не поддаваться панике.

Сохраняйте спокойствие и постарайтесь успокоить других. Если вы в помещении - оставайтесь в помещении. Если вы на улице - оставайтесь на улице. Много несчастных случаев происходит от того, что в спешке одни люди стремятся войти в здание, а другие - покинуть его; иногда даже прыгают из окон верхних этажей.

Если вы находитесь в невысоком здании (первый - третий этажи), нужно покинуть здание. В современных высотных домах лучше всего оставаться в своих квартирах.

Стоять нужно у стены в дверном проеме или у опорной колонны. Держитесь подальше от окон и входных дверей. Покидая помещение, спускайтесь по лестнице, а не на лифте.

Не пользуйтесь свечами, спичками, зажигалками во избежание возникновения пожара от утечки газа.

*На улице* не стойте вблизи зданий, а перейдите на открытое пространство. Держитесь в стороне от нависающих балконов, карнизов, парапетов, проводов. Если вы находитесь в автомобиле, - остановитесь на открытом месте, но не покидайте автомобиль, пока толчки не прекратятся. Ваши услуги могут понадобиться для спасения других людей.

## **После землетрясения**

Ни в коем случае не выдумывайте и не передавайте никаких сведений, прогнозов, догадок, слухов о возможных следующих толчках. Пользуйтесь только официальными сообщениями по этому поводу.

Проверьте водопровод, газ, электричество. Если имеются повреждения, отключите линию. Утечку газа проверяйте только по запаху: не зажигайте спичек. Если обнаружили утечку газа, откройте все окна и двери, немедленно покиньте помещение и сообщите



соответствующим службам. Не занимайте телефон для обмена впечатлениями - он может понадобиться для более важных дел.

Не ходите босиком, чтобы не поранить ноги о стекла. Будьте осторожны, подходя к дымоходам.

Избегайте поврежденных зданий, не заходите в них за вещами. Помните, что высокая опасность повторных толчков сохраняется особенно в первые часы после землетрясения. Она остается значительной также в течение 2-3 суток с момента первого сильного толчка.

Всегда и во всем будьте образцом мужественного, спокойного гражданского поведения.

## СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ, ИСПОЛЬЗОВАННЫХ В КНИГЕ

|                                        |                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Акселерограмма</b>                  | Графическое изображение ускорения грунта во времени, записанная акселерографом.                                                                                                |
| <b>Акселерограф</b>                    | Прибор для измерения ускорений грунта как функции времени.                                                                                                                     |
| <b>Активный разлом</b>                 | Разлом, по которому в историческое время происходило смещение пород или возникли очаги землетрясений.                                                                          |
| <b>Асейсмичный район</b>               | Район, в котором почти не бывает землетрясений.                                                                                                                                |
| <b>Астеносфера</b>                     | Частично расплавленный слой, мощностью до 250км, подстилающий литосферу и характеризующийся низкими скоростями распространения и высокой степенью затухания сейсмических волн. |
| <b>Афтершоки</b>                       | Более слабые землетрясения, возникающие в той же области после основного землетрясения.                                                                                        |
| <b>Балл</b>                            | Единица оценки степени последствий уже свершившегося землетрясения.                                                                                                            |
| <b>Бар</b>                             | Единица измерения давления (напряжения)<br>$1\text{бар} = 1\text{кг/см}^2 = 100\text{кПа}$                                                                                     |
| <b>Волны Лява</b>                      | Сейсмические поверхностные волны, при распространении которых происходит только горизонтальное смещение частиц перпендикулярно направлению движения волны.                     |
| <b>Волны Рэлея</b>                     | Сейсмические поверхностные волны, при распространении которых частицы совершают колебания только в вертикальной плоскости, содержащей направление волны.                       |
| <b>Гипоцентр (фокус) землетрясения</b> | Место начала вспарывания в очаге землетрясения.                                                                                                                                |
| <b>Годограф</b>                        | График зависимости времени пробега сейсмических волн от расстояния.                                                                                                            |



|                                                   |                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Деформация (упругая)</b>                       | Изменение геометрической формы тела. Приращение угла, длины, площади или объема, деленное на исходную величину.                                                                     |
| <b>Дилатансия</b>                                 | Увеличение объема пород, связанное с теми или иными упругими и неупругими деформациями.                                                                                             |
| <b>Дисперсия волн</b>                             | Распространение волн различной длины с разной скоростью, в результате чего искусственно удлинняется запись на сейсмограмме.                                                         |
| <b>Длина волны</b>                                | Расстояние между соседними гребнями или впадинами волны.                                                                                                                            |
| <b>Землетрясение</b>                              | Колебания Земли, вызываемые прохождением сейсмических волн, излученных из какого-либо источника упругой энергии.                                                                    |
| <b>Зона Беньоффа</b>                              | Зона очагов глубокофокусных землетрясений в Тихом океане.                                                                                                                           |
| <b>Изосейсты</b>                                  | Замкнутые линии с одинаковой интенсивностью землетрясения и разделяющие поврежденные области с различным уровнем интенсивности.                                                     |
| <b>Интенсивность землетрясения</b>                | Оценка уровня сотрясения поверхности Земли (грунта) свершившегося землетрясения, определяемая реакцией людей, степенью разрушения зданий и характером изменений земной поверхности. |
| <b>Категория грунта по сейсмическим свойствам</b> | Разделение площадки строительства в зависимости от прочностных, плотностных, влажностных, акустических и геометрических характеристик подстилающих грунтовых слоев.                 |
| <b>Кора Земли</b>                                 | Внешняя каменная оболочка Земли.                                                                                                                                                    |
| <b>Коэффициент динамичности</b>                   | Отношение максимального ускорения линейного осциллятора, вызываемое землетрясением, к максимальному ускорению грунта.                                                               |
| <b>Коэффициент критического затухания</b>         | Уровень затухания, при которой свободное движение маятника теряет колебательный характер.                                                                                           |
| <b>Кривые затухания</b>                           | Графическое изображение уменьшения эффекта землетрясения (ускорения грунта) в зависимости от эпицентрального расстояния.                                                            |

### **Левосторонний сдвиг**

Разрыв со смещением по простираанию, в котором дальний от наблюдателя блок двигался влево, если смотреть по направлению, перпендикулярному к линии разрыва.

### **Литосфера**

Внешняя жесткая оболочка Земли над астеносферой. Включает в себя кору, континенты и плиты.

### **Магнитуда землетрясения**

Мера величины (мощности) землетрясения. Определяется как десятичный логарифм амплитуды наибольшего колебания грунта, с внесением поправки, учитывающей расстояние от эпицентра. Различают четыре вида магнитуды: рихтеровскую (локальную) магнитуду  $M_L$ , магнитуду по объемным продольным волнам  $m_b$ , магнитуду по поверхностным волнам  $M_S$  и магнитуды по сейсмическому моменту  $M_W$ .

### **Мантия Земли**

Наибольшая по объему часть Земли, расположенная между корой и ядром на глубинах от 40 до 2900 км.

### **Микросейсмы**

Слабые, почти непрерывно распространяющиеся сейсмические волны, образующие сейсмический фон, или «шумы», Земли. Их можно обнаружить только с помощью сейсмографов.

### **Модуль сдвига**

Характеристика упругости горных пород при чистом сдвиге.

### **Надвиги и взбросы**

Разрывы со смещением по падению, при которых горные породы, залегающие над плоскостью разрыва, двигались вверх относительно подстилающих пород, так что более древние слои оказались выше более молодых.

### **Оползень**

Скольжение по склонам гор массивов пород под действием силы тяжести, вызываемое различными причинами, в том числе землетрясениями.

### **Основные принципы сейсмостойкости**

Определенное объемно-планировочное решение и распределение жесткостей и масс в сооружении, а также принципы конструирования несущих элементов, которые должны быть соблюдены при проектировании и строительстве зданий и сооружений в сейсмических районах.



**Первое вступление**

Смещение записи на сейсмограмме в момент прихода продольной Р волны. Сейсмографы устроены так, что движение пера вверх обычно указывает на сжатие горных пород, движение вниз - на разрежение (растяжение).

**Период волны**

Интервал времени, при котором частицы среды совершают одно колебание.

**Плита, литосферная  
плита**

Крупный, относительно жесткий сегмент литосферы Земли, перемещающийся относительно друг друга над более глубокими слоями оболочки Земли. К числу крупных плит относятся: Антарктидская, Анатолийская, Арабская, Африканская, Евразийская, Иранская, Индо-Австралийская, Кокоса, Наска, Северо-Американская, Южно-Американская, Тихоокеанская, Филиппинская плиты.

**Плоскость разрыва**

Плоскость, вдоль которой происходило смещение по разрыву.

**Плотность**

Масса вещества в единице объема измеряется обычно в  $\text{г/см}^3$ .

**Поверхностные  
сейсмические волны**

Волны (Лява и Рэлея), которые распространяются только по поверхности Земли, их скорости меньше скорости объемных поперечных S волн.

**Поверхностный слой**

Неоднородная (однородная) среда с различными физико-механическими и мощностными характеристиками, расположенными от поверхности Земли (подошвы фундамента здания) до основных коренных пород данной площадки строительства.

**Повторяемость  
землетрясения**

Число землетрясений за определенный период времени (в год) с одинаковой магнитудой.

**Поперечные волны**

“Вторичные” (запаздывающие по отношению к продольным волнам Р) сейсмические волны S, при распространении которых частицы среды (оставаясь на месте) совершают колебания в перпендикулярном к направлению движения волны. Они называются также волнами сдвига и не проходят через жидкость.

**Правосторонний сдвиг** Разрыв со смещением по простиранию, в котором дальний от наблюдателя блок двигался вправо, если смотреть по направлению, перпендикулярному к линии разрыва.

**Предвестники землетрясения** Предшествующие необычные явления и изменения геофизических параметров Земли перед землетрясением.

**Преломление и отражение волн** Отклонение проходящей волны от направления ее первоначального распространения при пересечении границ среды с разными упругими характеристиками.

**Преобладающий период** Наибольший период свободных колебаний поверхностного слоя грунтовой толщи.

**Прогноз землетрясений** Предсказание времени, места и магнитуды землетрясений.

**Продольные волны** "Первичные" (приходящие первыми) сейсмические волны Р, при распространении которых частицы среды совершают колебания в параллельном к направлению движения волны. Они называются также волнами сжатия и разряжения.

**Раздел Мохоровичича** Граница между корой и мантией, в которой значение скоростей сейсмических волн резко возрастают. Глубина - от 5 км (под дном океанов) до 45 км (под горными массивами). Для территории Армении она находится на глубинах 40-45км.

**Разжижение грунта** Потеря несущей способности несвязанного грунта от динамического (сейсмического) воздействия. Порода ведет себя как плотная жидкость.

**Разрыв** Трещина или зона трещин, возникающая на поверхности Земли во время сильного землетрясения.

**Рой землетрясений** Серия землетрясений, происходящих в одном и том же районе; ни одно из землетрясений роя не выделяется среди других по величине.



### **Сброс**

Разрыв со смещением по падению, когда горные породы, залегающие над плоскостью разрыва, двигались по этой плоскости вниз.

### **Сейсмическая волна**

Упругая волна, распространяющаяся в Земле, создаваемая очагом землетрясения или взрывом.

### **Сейсмический момент**

Произведение модуля сдвига горных пород на площадь вспарывания и величину относительной подвижки вспаренных блоков. Мера величины землетрясения.

### **Сейсмический риск**

Возможные человеческие, материальные и все иные потери и ущербы, обусловленные ожидаемым сильным землетрясением.

### **Сейсмическая нагрузка**

Величина инерционной силы, действующей на каком-либо уровне сооружения, вызванное землетрясением.

### **Сейсмическое микрорайонирование**

Уточнение величины сейсмической опасности данной строительной площадки на основе ее локального тектонического положения и инженерно-геологической структуры (геологических условий).

### **Сейсмическое районирование**

Оценка уровня потенциальной сейсмической опасности различных территорий сейсмоактивного региона.

### **Сейсмичность**

Распределение землетрясений во времени и в пространстве.

### **Сейсмограмма**

Графическое изображение перемещений грунта во времени, записанное сейсмографом.

### **Сейсмограф**

Прибор для записи движений земной поверхности, вызываемых сейсмическими волнами, как функции времени.

### **Сейсмограф Вуда-Андерсона**

Сейсмограф, по сейсмограмме которого Рихтер разработал шкалу магнитуд. Основные параметры сейсмографа: период свободных колебаний маятника — 0.8сек, коэффициент критического затухания — 0.8, коэффициент увеличения 2800 раз.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Сейсмология</b>           | Наука о землетрясениях, их очагах и распространении волн в недрах Земли.                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Сейсмометр</b>            | Датчик сейсмографа, обычно представляющий собой маятник на специальной подвеске.                                                                                                                                                                                         |
| <b>Сейсмоскоп</b>            | Простой сейсмограф, записывающий на пластинке без марок времени.                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Сейсмостойкость</b>       | Сопrotивляемость здания или сооружения воздействию землетрясения с несущественными повреждениями.                                                                                                                                                                        |
| <b>Спектр реакции</b>        | Графическое изображение величины максимального ускорения линейного осциллятора (простого сооружения), вызываемое землетрясением, от периода его свободных колебаний.                                                                                                     |
| <b>Спрединг</b>              | Расширение океанского дна в результате оттеснения литосферных плит в противоположные стороны (0,5-10см/год).                                                                                                                                                             |
| <b>Субдукция</b>             | Тектонический процесс, при котором одна литосферная плита заталкивается под другую более мощную (зона Беньоффа).                                                                                                                                                         |
| <b>Тектоника плит</b>        | Теория движения и взаимодействия литосферных плит. С ее помощью пытаются объяснить землетрясения, вулканическую деятельность и горообразование как следствие крупных горизонтальных перемещений поверхностных частей Земли.                                              |
| <b>Теория упругой отдачи</b> | Теория происхождения землетрясений, согласно которой крылья разлома остаются прижатыми друг к другу, тогда как в окружающих горных породах медленно накапливается энергия упругой деформации; затем происходит резкое смещение по разлому с высвобождением этой энергии. |
| <b>Трансформный разлом</b>   | Разлом, вдоль которой плиты проскальзывают одна относительно другой.                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Фокальное расстояние</b>  | Расстояние от гипоцентра землетрясения до пункта наблюдения на поверхности Земли.                                                                                                                                                                                        |



|                                           |                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Форшоки</b>                            | Относительно слабые сейсмические толчки, предшествующие основному землетрясению.                                                              |
| <b>Цунами</b>                             | Длинная океаническая волна, вызываемая подвижкой в дне океана при землетрясении.                                                              |
| <b>Энергия землетрясения</b>              | Вся энергия, высвобожденная во время землетрясения (в эргах).                                                                                 |
| <b>Энергетический класс землетрясения</b> | Десятичный логарифм от общей энергии землетрясения, выраженный в джоулях.                                                                     |
| <b>Эпицентр землетрясения</b>             | Точка на поверхности Земли, расположенная непосредственно над фокусом (гипоцентром) землетрясения.                                            |
| <b>Ядро Земли</b>                         | Центральная часть Земли глубже 2900 км. Внешняя часть ядра находится в расплавленном состоянии, а внутренняя в жидком, возможно, и в твердом. |

1. *Айзенберг Я.М.* Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 года. Некоторые уроки и выводы. "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений", 1999, N1, с.6-9.
2. *Айзенберг Я.М.* Сейсмическое зонирование для строительных норм "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений", 2000, N6, с.40-43.
3. *Айзенберг Я.М., Хачиян Э.Е., Габричидзе Г.К., Гудков Б.П., Золотков А.С., Измайлов Ю.В., Ицков И.Э., Оруджев М.Ф., Уломов В.И., Хакимов Ш.А.* Международные строительные нормы СНГ. Строительство в сейсмических районах (проект) 2002г. "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений", 2002, N3, с.27-54.
4. *Аллен К.Р.* Геологические критерии оценки сейсмичности. Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981, с.32-65.
5. *Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. Т.1, М.: Мир, 1983, 520с.
6. *Алексин П.А., Грайзер В.М., Плетнев К.Г., Штейнберг В.В., Зайнутдинов К.С.* Колебания грунта при сильных газлийских землетрясениях 1976г. Реферативная информация "Сейсмическое строительство". ЦИНИС, 1976, серия XIV, вып.11, с.5-11.
7. *Антикаев Ф.Ф.* Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах. М.: Наука, 1969, 104с.
8. *Армения: беда, милосердие, возрождение.* М.: Прометей, 1989, 174с.
9. *Армения, декабрь 88.* Ереван: "Айастан", 1990, 558с.
10. *Арнольд К., Рейтерман Р.* Архитектурное проектирование сейсмостойких зданий. М.: Стройиздат, 1987, 196с.
11. *Бабаян Т.О., Минасян Ф.С., Пирузян С.А.* Определение сейсмических свойств грунтов города Ленинакана. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, 1974, N36, с.56-65.
12. *Бабешко В.А., Бабешко О.М.* Об одном новом подходе к проблеме прогноза сейсмичности. "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений", 2005, N4, с.69-74.
13. *Баласаян С.Ю., Назаретян С.Н., Амирбекян В.С.* Сейсмическая защита и ее организация. Гюмри, Эльдорадо, 2004, 436с.
14. *Болт Б.А.* Землетрясения: общедоступный очерк. М.: Мир, 1981, 256с.



15. *Боммер Дж.* Сохранилась единственная запись основного толчка в ближней зоне. "Природа", 1989, N12.
16. *Брун Дж.Н.* Физика сильных движений, вызванных землетрясениями. В кн.: "Сейсмический риск и инженерные решения". М.: Недра, 1981, с.129-161.
17. *Габриелян А.А.* Сейсмотектоника Армянского нагорья и сопредельных районов. Международный семинар, Спитак-88, 23-26 мая 1989г, Ереван, АН АрмССР, 62с.
18. *Габричидзе Г.К., Мухадзе Т.Н., Тимченко И.Ю.* Последствия эпицентрального землетрясения 2002 года в Тбилиси. "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений", 2004, N1, с.56-59.
19. *Гай Д.Н.* Унесу боль твою... М.: Юридическая литература, 1989, 272с.
20. *Гениев Г.А.* О критериях подобия в задаче о перемещениях поверхности грунтового массива, вызванных горизонтальными и вертикальными сейсмическими воздействиями. "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений", 1999, N5, с.26-28.
21. *Гир Дж., Шах Х.* Зыбкая твердь. М.: Мир, 1988, 224с.
22. *Григорян С.С.* О механике возникновения землетрясений и содержании эмпирических закономерностей сейсмологии. Доклады АН СССР, 1988, т.299, N5, с.1094-1101.
23. *Григорян С.В., Джрбациян Р.Т., Карапетян А.И., Караханян А.С.* Некоторые геологические проявления Спитакского землетрясения. Международный семинар, Спитак-88, 23-26 мая 1989г, Ереван, АН АрмССР, 62с.
24. *Дарбинян С.С.* Методы определения интенсивности землетрясений. Ереван, 2003, 115с.
25. *Джеффрис Г., Свирлс Б.* Методы математической физики. М.: Мир, т.3, 1970.
26. *Добровольский И.П.* Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1984, 88с.
27. *Доклад* майора Воскобойникова генералу Головину от 25 ноября 1840 года. Акты, собранные Кавказской археологической комиссией, т.IX, Тифлис, 1884, с.580-584.
28. *Джонстон Арч С., Кантер Лиза Р.* Землетрясения в стабильной континентальной коре. В мире науки и техники (перевод с английского) апрель 1990, N4, с.68-76.
29. *Друмя А.В., Щебалин Н.В.* Землетрясения: где, когда, почему? Кишинев: Штиинца, 1985, 196с.

30. *Егоркина Г.В., Соколова Н.А., Егорова Л.М., Двоскина Т.Д., Милициярова Т.Я.* Строение земной коры северо-западной части Армении. Советская геология, 1973, N3, с.80-91.
31. *Жунусов Т.Ж., Ашинбаев М.У., Ицков И.Е.* Проект новой редакции норм Республики Казахстан "Строительство в сейсмических районах". "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений", 2005, N4, с.38-43.
32. *Завриев К.С., Назаров А.Г., Айзенберг Я.М., Дарбинян С.С., Карцивадзе Г.Н., Рассказовский В.Т., Хачиян Э.Е., Шагинян С.А.* Основы теории сейсмостойкости зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1970, 224с.
33. *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.
34. *Каталог* землетрясений ( $M \geq 5.5$ ) на территории Республики Армения и сопредельных районов. Ереван, НССЗ, 1998.
35. *Карапетян А.И., Карапетян Б.К., Симонян Г.П., Хачиян Э.Е.* Новая карта сейсмического районирования территории Республики Армения. Изв. НАН РА, Науки о Земле, XLYIII, 1995, N1, с.26-32.
36. *Карапетян Б.К., Карапетян Н.К.* Предпосылки прогнозирования землетрясений и сейсмостойкое строительство в Армянской ССР. Ереван: Айастан, 1981, 170с.
37. *Карапетян Н.К.* Сейсмогеодинамика и механизм возникновения землетрясений Армянского нагорья. Ереван: Издательство АН Армянской ССР, 1990, 264с.
38. *Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир, 1985, 264с.
39. *Корчинский И.Л., Жунусов Т.Ж., Малевская О.Я.* Количественная оценка параметров ожидаемых землетрясений. Алма-Ата, 1985, 80с.
40. *Клячко М.А.* Землетрясения и мы. Санкт-Петербург. РИФ "Интеграф", 1999, 234с.
41. *Ломницц Ц., Сингх С.К.* Землетрясение и их прогноз. В кн.: "Сейсмический риск и инженерные решения". М.: Недра, 1981, с.7-31.
42. *Ломтадзе В.Д.* Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. Л.: Недра, 1972.
43. *Маркарян Т.Г., Давидян Л.А.* Оценка интенсивности ноябрьского землетрясения 18.07.97, в населенных пунктах Тавушской области по макросейсмическим данным. Сборник научных трудов конференции, посвящ. 90-летию дня рождения академика А.Г.Назарова (1-4 июля 1998, г.Гюмри), с.69-73.



44. *Мартиросян 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, N4, с.67-73.
45. *Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. М.: Стройиздат, 1962, 284с.
46. *Медведев С.В., Шебалин Н.В.* С землетрясением можно спорить. М.: Наука, 1967, 130с.
47. *Международный семинар Спитак-88.* 22-26 мая 1989г. Тезисы докладов АН АрмССР, Ереван, 62с.
48. *Многоаспектное изучение бедствий* и планированное управление ими в Армении. Миссия ЮНДРО в Армению 11-30 сентября, 1989. Организация объединенных наций, Нью-Йорк, 1990 (рукопись).
49. *Мовсес Хоренаци.* История Армении. Ереван, 1990, 291с.
50. *Могн К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988, 382с.
51. *Мурадян Н.Г.* Спитак эпицентр землетрясений. Ереван, 1998, 368с.
52. *Мячкин В.Н., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* Основы физики очага и предвестники землетрясений. Физика очага землетрясений. М.: Наука, 1975, с.6-29.
53. *Назаров А.Г.* Метод инженерного анализа сейсмических сил. Изд. АН Арм.ССР, Ереван, 1959, 286с.
54. *Назаров А.Г.* К проблеме прогноза землетрясений. ДАН АрмССР, т.53, 1971, N1.
55. *Напетваридзе Ш.Г.* Некоторые задачи инженерной сейсмологии. Тбилиси: Мецниереба, 1973, 162с.
56. *Никонов А.А.* Земля землетрясений. Природа, 1989, N12, с.39-46.
- 56а. *Никонов А.А., Никонова К.Н.* Сильнейшее землетрясение закавказья 30 сентября 1139г. Вопросы инженерной сейсмологии, вып.27, М.: Наука, 1986, с.152-183.
57. *Новый каталог* сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975г. (под ред.Н.В.Кондорской, Н.В.Шебалина). М.: Наука, 1977, 535с.
58. *Ньюмарк Н., Розенблюэт Э.* Основы сейсмостойкого строительства. М.: Стройиздат, 1980, 344с.
59. *Окомото М.* Сейсмостойкость инженерных сооружений. М., 1980, 342с.
60. *Поляков С.В.* Последствия сильных землетрясений. М.: Стройиздат, 1978, 312с.
61. *Поставцев С.Н., Айзенберг Я.М., Кофф Г.Л., Мелентев А.М., Уломов В.И.* Сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство. Москва ГУП ЦПП, 1998, 260с.
62. *Пьер Руссо.* Землетрясения. Изд.Прогресс. М.: 1966, 248с.

63. *Райс Дж.* Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982, 217с.
64. *Результаты комплексного* изучения Зангезурского землетрясения. АН Арм.ССР, ИГИС. Ереван, Изд. АН Арм.ССР, 1974, 262с.
65. *Рикитаке Т.* Предсказание землетрясений. Издательство М.: Мир, 1979, 388с.
66. *Ризниченко Ю.В.* Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985, 408с.
67. *Рихтер Ч.Ф.* Элементарная сейсмология. М.: Издательство иностранной литературы, 1963, 670с.
68. *Робертс Э.* Когда сотрясается земля. М.: Мир, 1966, 176с.
69. *Рустанович Д.Н.* Колебания поверхности Земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. М.: Наука, 1974, 100с.
70. *Саваренский Е.Ф.* Сейсмические волны. М.: Недра, 1972, 294с.
71. *Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П.* Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Гостехиздат, 1955.
72. *Садовский М.А., Нерсесов И.Л.* Вопросы прогноза землетрясений. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1978, N9, с.13-29.
73. *Сейсмический риск* и инженерные решения. М.: Недра, 1981, 376с.
74. *Семенов А.Н.* Изменение отношения времен пробега поперечных и продольных волн перед сильными землетрясениями. Изв. АН СССР, Физика Земли, т.72, 1969, N4.
75. *СНРА II-6.02.2006.* Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. Ереван, 2006, 120с.
- 75а. *СНиП II-7-81.* Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. М., 1982.
76. *Соболев Г.А.* Основы прогнозирования землетрясений. М.: Наука, 1993, 313с.
77. *Степанян В.А.* Землетрясения в Армянском нагорье и прилегающих окрестностях (на арм. яз.). Ереван, 1964, 248с.
78. *Тазиев Г.* Когда земля дрожит. М.: Мир, 1968, 252с.
79. *Тёркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика М.: Мир, т.1-2, 1985, 730с.
80. *Тимощенко С.П., Гере Дж.* Механика материалов. М.: Мир, 1976, 670с.
81. *Тимощенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1979, 560с.
82. *Трагедия Спитак*а не должна повториться. (к 10-летию Спитакского землетрясения). Отв. ред. академик НАН РА Э.Е.Хачиян. Ереван: Воскан Ереванци, 1998, 246с.
83. *Трифонов В.Г., Караханян А.С.* Геодинамика и история цивилизации. М.: Наука, 2004, 666с.



84. *Трифонов В.Г., Караханян А.С., Кожурин А.И.* Активные разломы и сейсмичность. "Природа", 1989, N12, с.32-38.
85. *Уломов В.И.* Вероятностно-детерминированная оценка сейсмических воздействий на основе карт ОСР-97 и сценарных землетрясений. "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений", 2005, N4, с.60-68.
86. *Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплекс карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Москва ОИФЗ РАН, 1999, 57с.
87. *Фаччиоли Э., Резендиц Д.* Динамика грунтов: поведение грунта при сейсмических воздействиях, включая разжижение. В книге "Сейсмический риск и инженерные решения", М.: Недра, 1981, с.66-128.
88. *Физика очага землетрясения.* М.: Наука, 1985.
89. *Халтурин В.И., Геодакян Э.Г., Мхитарян Л.А., Саргсян И.М., Шомахмедов А.М.* Усиление макросейсмического эффекта в г.Ленинакане. Изв. НАН РА, Науки о Земле, 1990, XVIII, N1, с.47-55.
90. *Хачиян Э.Е.* Некоторые прикладные задачи теории сейсмостойкости сооружений. АИСМ, Ереван, 1963, 128с.
91. *Хачиян Э.Е.* Сейсмические воздействия на высотные здания и сооружения. Ереван: Айастан, 1973, 328с.
92. *Хачиян Э.Е., Амбарцумян В.А.* Динамические модели сооружений в теории сейсмостойкости. М.: Наука, 1981, 204с.
93. *Хачиян Э.Е., Закарян В.А., Погосян О.К.* Результаты инженерно-сейсмометрического анализа Ереванского землетрясения 16-го июня 1973 года. ДАН Арм.ССР, т. 58, 1974, N1, с.32-37.
94. *Хачиян Э.Е., Мелкумян М.Г.* Запись Спитакского землетрясения 7 денабря 1988 года инженерно-сейсмическими станциями города Ереван. Уроки землетрясения, Ереван, 1989, 34с.
95. *Хачиян Э.Е., Манукян Л.А.* Вращательные движения грунта и крутильные колебания сооружений. В книге "Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях". М.: Наука, 1987, с.93-108.
96. *Хачиян Э.Е., Амбарцумян В.А., Саркисян А.Г.* Взаимодействие сейсмических волн с сооружением. В кн.: "Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях". М.: Наука, 1987, с.109-120.
97. *Хачиян Э.Е.* Исследование динамических характеристик неоднородных грунтовых оснований. Известия НАН РА, Науки о Земле, 1995, XLVIII, N2-3, с.112-119.
98. *Хачиян Э.Е.* Об одной физической предпосылке для упрощенной оценке параметров колебания грунтов и их воздействия на

- сооружения при сильных землетрясениях. Сборник научных трудов конференции, посвящ. 90-летию дня рождения академика А.Г.Назарова (1-4 июля 1998, г.Гюмри), с.157-163.
99. *Хачиян Э.Е.* Некоторые аспекты нормирования сейсмостойкого строительства. *Строительная механика и расчет сооружений*, 1991, N4, с.61-67.
100. *Хачиян Э.Е.* Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 года, основные характеристики. В кн.: "Трагедия Спитака не должна повториться". Ереван: Воскан Ереванци, 1998, с.7-29.
101. *Хачиян Э.Е.* Об основных концепциях по разработке единых международных норм по сейсмостойкому строительству. "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений". М., 2000, N2, с.14-18.
102. *Хачиян Э.Е.* Об одном подходе к определению величины энергии землетрясения по макросейсмическим параметрам очага землетрясения. ДНАН РА, т.101, 2001, N1, с.66-75.
103. *Хачиян Э.Е., Оганесян Г.В.* Анализ записей ускорений на аллювиальных грунтах и зданиях при землетрясениях в Сан-Фернандо и Лома Приете. "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений". М., 2004, N4, с.61-65.
104. *Хачиян Э.Е., Саргсян А.З.* О потенциальной энергии деформации среды в период подготовки сильного землетрясения. Изв. НАН РА, Науки о Земле, 2005, LVIII, N3, с.37-45.
105. *Хачиян Э.Е., Погосян В.В.* Экспериментальные исследования динамических характеристик церковного сооружения и грунтов основания. "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений". М., 2006, N1, с.43-46.
106. *Ходжсон Дж.* Землетрясения и строение земли. М.: Мир, 1966, 194с.
107. *Цытович Н.А.* Механика грунтов. М.: Госиздат., 1985, 388с.
108. *Штейберг В.В., Сакс М.В., Антикаев Ф.Ф. и др.* Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.34, М.: Наука, 1993, 94с.
109. *Эйби Дж.* Землетрясение. М.: Недра, 1982, 264с.
110. *ЮНЕСКО*, Курьер, июнь 1976. Землетрясение. 34с.
111. *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, N1, ЮНЕСКО, ЕАСС, М.: Сервиспрогресс, с.30-37.
112. *Agbabian M.S.* Construction Codes and Standards in the Armenian Soviet Socialist Republic. "Earthquake Spectra". August, 1989, Armenia Earthquake Reconnaissance Report, pp.93-100.



113. *Aghabian M.S.* Technical Issues of the Spitak-88 Earthquake. Spitak-88, Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp.369-372.
114. *Ahmad A.R., Khachian E.Y.* The use of various data set to Evaluate Seismic Hazard in Tartous region (Syria). 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology. The Saloniki, Greece, 14-20 April, 2004, vol.11, pp.639-642.
115. *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.
116. *Ambraseys N.N. and Bommer J.J.* Database of European Earthquake Associated with Strong-motion Records. European Earthquake Eng. V, N2, 1991, p.18-37.
117. *Annali di Geofisica.* The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992-1999, volume 42, N6, December, 1999.
118. *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.
119. *Balassanian S., Cisternas A. and Melkumyan M. (eds.):* Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction. 2000, Kluwer Academic Publishers-Dordrecht (Boston), London, 448p.
120. *Basic concepts of Seismic Codes.* Vol.1. The International Association for Earthquake Engineering. Tokyo, 1980, 103p.
121. *Berberian M.* Contribution of the seismotectonics of Iran (Part II) Report N39, Geological Survey of Iran, Tehran, 1976.
122. *Bolt B.A.* Earthquakes. A.Primer, W.H.Freeman and San Francisco, 1978, 241p.
123. *Bommer J.J.* A Field Study of Spitak-88 Earthquake. Spitak-88, Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp.161-176.
124. *Borcherdt R., Glassmoyer G., Andrews M. and Granswick E.* Effect of Site Condition on ground motion and Damage. Earthquake Spectra, August 1989, pp.23-42.
125. *Bozorgnia Y., Niazi M.* Distance Scaling of Vertical and Horizontal Response Spectra of the 1989 Loma Prieta Earthquake. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.22, 1993, pp.695-707.
126. *Butcher G., Hopkins D., Jury R., Massey W., McKay G., McVerr G.* The September 1985 Mexico Earthquakes: Final Report of the New Zealand Reconnaissance Team. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, vol.21, N1, March, 1988, pp.3-30.

127. **Campbell R.W.** An Empirical Analysis of Peak Horizontal Acceleration for the Loma Prieta, California Earthquake of October 18 1989. Bulletin of the Seismological Society of America, vol.81, 1991, N5, pp.1838-1858.
- 127a. **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.
128. **CSMIP** Strong-Motion Records From the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta), California Earthquake of 17 October, 1989, California Department of Conservation, Report OSMS 89-06, 1989, 196p.
129. **Decanini L.D., Gavarini C., Pedegral J.M.** Notas y observaciones sobre El Terremoto De El Salvador del 10 octubre 1986. Repubblica Italiana, Repubblica Argentina, 106p.
130. **Der-Kiureghian A.** Strong-Motion Records. Earthquake Spectra. August, 1989. Special Supplement "Armenia Earthquake Reconnaissance Report" pp. 43-53.
131. **Der-Kiureghian A.** Observation from Instrumental Records and Damage Statistics of the Spitak Earthquake. In Proc. 1-st World Congress of Armenian Engineers, Scientists and Industrialists, AESA, California, 1989, pp.73-86.
132. **Earthquake Disaster** Prevention. Republic of Turkey, 1998, 32p.
133. **Earthquakes and Volcanoes.** Parkfield. The Prediction... and the Promise. Vol.20, N2, 1988, 90 p.
134. **EERI** "Armenia Earthquake Reconnaissance Report" Earthquake Spectra, Special Supplement, Editors Loring A. **Wyllie**, John R. **Filson**, August, 1989, p.175.
135. **EERI.** Newsletter. Vol.31, N9, 1997.
136. **Eisenberg Y.M.** Spectra and Damages of the Spitak-88 Earthquake. Spitak-88, Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp.291-301.
137. **Eurocode 8 Design** Provision for Earthquake Resistance of Structure. ENV 1998-1-1, 1994, 71p.
138. **European Macroseismic** Scale. 1992. Editor G.Grunthal, Luxemborg, 1993, 78p.
139. **Fajfar P., Vidic T., Fischinger M.** Seismic Demand in Medium-and Long-Period structures. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1989, vol.18, pp.1133-1144.
140. **Filson J., Borchardt R., Langer C., Simpson D.** 1. Seismology. Armenian Earthquake Reconnaissance Report. Earthquake Spectra, Special Supplement, August, 1989, pp.1-12.



141. *Fukushima Y. and Tanaka.* A New Attenuation for Peak Ground Acceleration, Velocity and Displacement Based on Multiple Regression Analysis of Japanes Strong Motion. Bull. seis. soc. Am. 80, 1990, pp.757-783.
142. *Gere I.M., Shah H.C.* Terra Non Firma, Understanding and Preparing for Earthquakes. W.H.Freeman and Company, New York, 1984.
143. *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 Geofysica", vol.XXXVIII, N1, March 1995, pp.85-147.
144. *Hadjian A.H.* Dependency of Soil-Structure Interaction damping on Structure Slenderness. 6<sup>th</sup> US National Conference on Earthquake Engineering, 11p.
145. *Hadjian A.H.* The Spitak, Armenian Earthquake of 7 december 1988 – why so much destruction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 12 (1993) 1-24.
146. *Hanks T.C. and Kanamori H.* A moment-magnitude scale. I.Geophys.Res. 84, 1979, pp.2348-2350.
147. *Housner G.W.* Engineering Estimates of Ground Shaking and Maximum Earthquake Magnitude. Proc. 4<sup>th</sup> World Conf. Earthquake Engineering, Santiago, 1969.
148. *Huang, Chen.* Near-field characteristics and Engineering Implications of the Chi-Chi Earthquake. Earthquake Engineering and Engineering Seismology, vol.2, N1.
149. *Idriss I.M.* Response of Soft Soil Sites During Earthquakes. In Proceedings of the Bolton Seed Memorial Symposium. Vol.2, 1989, pp.273-289.
150. *Iranian Code* for Seismic Resistant Design of Buildings. Building and Hausing Research Center, 1999, Tehran, Iran.
151. *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.
152. *Ishihara K.* General Comments on Soil Conditions. Manuscript 1989, Yerevan.
153. *Joyrner W.B. and Boore D.M.* Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake Bull. seis. soc. Am. 71, 1981, p.2011-2038.
154. *Karapetian A.I., Khachian E.E.* Some Peculiarities of the Spitak Earthquake 7.12.88 and its Impact on Building Structures. Proc. of the International on Seismology and Earthquake Engineering. Tehran, I.R.Iran, 1991.

155. *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.
156. *Kamb B., Silver L.T., Abrams M.J., Carter B.A., Jordan T.H. and Minster J.B.* Pattern of Faulting and Nature of Fault Movement in the San Fernando Earthquake. The San-Fernando Earthquake of February 9, 1971: Geological Survey Professional Paper 733, U.S. Dept. of Interior and U.S. Dept. of Commerce Joint Publication, 1971.
157. *Khachian E.E.* Spitak Earthquake 1988 (Intensity and Effects on Structures) ARMNIISA Report, Yerevan 1989, 11p.
158. *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.
159. *Khachian E.E.* Antiseismic Desigh and Constructions. Spitak-88, Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp.471-482.
160. *Khachian E.E.* On the Draft of Antiseismic Standards in the Republic of Armenia. Proceedings of the Tenth World Conference of Earthquake Engineering. 19-24 July 1992 Madrid, Spain, pp.5629-5632.
161. *Khachian E.E.* The Investigation of Dynamic Properties of Heterogeneous Soil Foundations. A Report on Research Supported by Engineering Research Center of AUA. Yerevan, July 1995, 26p.
162. *Khachian E.E.* On Basic Concepts for Development of United International Earthquake Resistant Construction Code. Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction. Editors S.Balassanian, A.Cisternas and M.Melkumyan, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2000, pp.333-343.
163. *Khachian E.E., Manukian L.A.* Rotation of the Ground and Torsional assillations of Constructions. 8<sup>th</sup> Symposium on Earthquake Engineering, Roorkee, December 29-31, vol.1, India 1986, pp.459-466.
164. *Khachian E.Y., Ahmad R.A.* A new Method for Calculating the Dominant Periods of Multilayers of Soil. The Izvestia of National Academy of Sciences of Republic of Armenia, LIX, N1, 2006, c.41-50.
165. *Kiremidjian A.S.* Preliminary Seismic Hazard Estimation of Armenia. In Proc. 1<sup>st</sup> World Congress of Armenian Engineers, Scientists and Industrialists. AESA, California, 1990, pp.123-129.
166. *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.
167. **Lee V.W. and Trifunac M.D.** Torsional accelerograms Soil Dynamic and Earthquake Engineering. Vol.4, 1985, pp.132-139.
  168. **Lessons Learned** from the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989. U.S.Geological Survey Circular, 1045, 48p.
  169. **Liquefaction of Soil During Earthquakes.** National Academy press, Washington, D.C. 1985, 240p.
  170. **Madera G.** Fundamental period and amplification of Peak Acceleration in Layered Systems. Research report R70-37, Chapter 2 June 1970. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, pp.27-77.
  171. **Maley R.P., Cloud W.K., Morrill B.Y., Scott N.H., Hudson D.E., Trifunac M.D.** Strong-Motion Accelerograph Records. Strong-Motion Instrumental Data on the San-Fernando Earthquake of February 9, 1971, California Institute of Technology and U.S. Department of Commerce, 1971, 260p.
  172. **Moinfar A.A., Nadezhad A.** The Manjil, Iran Earthquake of 20 June 1990. Building and Housing Research Center Publication. N119, 1990.
  173. **Mouroux P.** Seismic Hazard and Microzonation Studies in Armenia-Conditions for Their Effective and Practical Use. Spitak-88, Proceeding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, pp.323-346.
  174. **MSEER** Bulletin, v.13, N3, 1999, v.15, N4, 2001. University of Buffalo.
  175. **Nagata S., Molas G. and Yamzaki F.** Ground Acceleration Records of 1993 Kushiro-Oki Earthquake. Bulletin of Earthquake Resistant structure Research Center, N26, march 1993, pp.19-30. University of Tokio.
  176. **National Institute** for Land and Infrastructure Management (Japan). News Letter, N6, September, 2003.
  177. **NEHRP** Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures. Part 1: 1997 Edition. Building Seismic Safety Council (USA). 342p.
  178. **Newmark N.M. and Rosenblueth E.** Fundamentals of Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.Y.
  179. **Niazi M., Bozorgnia Y.** The 1990 Manjil, Iran, Earthquake: Geology and Seismology Overview, PGA Attenuation and Observed Damage. Bulletin of Seismological Society of Armenia, vol.82, N2, April 1992, pp.774-799.
  180. **Norme France.** NF P06-013, AFNOR, Paris, 1995, 218p.
  181. **Oganesian G., Khachian E.** Quantitative Estimations of Alluvium Ground and Buildings Accelerations Records During Loma Prieta and

- San-Fernando Earthquakes. American University of Armenia, Engineering Research Center, Yerevan, 1997, 23p.
182. **Okamoto S.** Introduction to Earthquake Engineering. University of Tokyo Press, 1973.
183. **O'Rourke T.** Geotechnical Aspects. "Earthquake Spectra", August, 1989, Armenia Earthquake Reconnaissance Report, pp.54-69.
184. **Philip H., Rogozin E., Cisternas A., Bousquet C., Borisov B and Karakhanian A.** The Armenian Earthquake of 1988 December 7: Faulting and Folding Neotectonics and Palaeoseismicity. Geophys., I.Int. 1992, 110, pp.141-158.
185. **Pierre-Yves Bard, Mehdi Zare and Mohsen Ghafory-Ashtiany.** The Iran Accelerometric Data Bank: A Revision and Data Correction. Journal of Seismology and Earthquake Engineering. Tehran, Iran, vol.1, N1, 1998, pp.1-22.
186. **Pitilakis K.D., Anastasiadis A.I.** Soil and Site Characterization for Seismic Response Analysis. Proceedings of the Eleventh European Conference on Earthquake Engineering. Invited Lectures A.A.Balketa /Rotterdam/ Brookfield/ 1999, pp.65-90.
187. **Pomonis A.** The Spitak Earthquake: Residential Building Typology and Seismic Behavior Disasters, vol.14, N2, 1990, pp.89-114.
188. **Proceeding** from the Symposium on Seismic Hazard, Ground Motion, Soil-Liquefaction and Engineering Practice in Eastern North America October 20-22, 1987. Technical Report NCEER-87-0025, December 1987, Buffalo, 520p.
189. **Reducing Earthquake Hazard:** Lessons Learned from Earthquakes. EERI, Publication N86-02, November 1986.
190. **Regulations** for Seismic Design. A World List-1996. Supplement-2000. IAEE, Tokyo, Japan.
191. **Richter Ch.F.** Elementary Seismology. W.H.Freeman and Co., San Francisco, 1958, 768p.
192. **Rikitake T.** Earthquake Prediction. Elsevier Scientific Publishing. Co Amsterdam, 1976, 357p.
193. **Seed H.B., Murarka R., Lysmer J. and Idriss I.M.** Relationships Between Maximum Acceleration, Maximum Velocity, Distance from Source and Local Conditions for Moderately Strong Earthquakes. Bulletin of Seismological Society of America, 66(4), pp.1323-1342, 1976.
194. **Seismic Performance** of Steel Bridges During the 1994 Northridge Earthquake. Report number: UCB/Ce-Steel-94/01, University of California at Berkeley, April 1994, 290p.



195. *Seismic Risk and Engineering Decisions*, by C.Lomnitz and E.Rosenblueth (Editors). Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York 1976.
196. *Shakhramanian M.A., Nigmatov G.M., Koff G.L.* Seismic Risk Assessment and Management. Moscow, 2004, 184p.
197. *Sharp R.V.* Surface Faulting: Apreli minary view. Earthquake Spectra, Special Supplement, August, 1989, pp.12-33.
198. *SPITAK-88*, Procceding of International Seminar on Spitak-88 Earthquake, Sponsored by UNESCO, Yerevan, May 23-26, 1989, 503p.
199. *Strong Motion Earthquake Accelerograms*. Volume 1—Uncorrected Accelerograms. Pasadena, California, July 1969, 164p.
200. *Strong Motion Earthquake Accelerograms*. Volume 1—Uncorrected Accelerograms. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, Pasadena, California, July 1971, 266p.
201. *Strong Motion Earthquake Accelerograms*. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, University "Kiril and Metodij" Skopje-Yugoslavia, Skopje, March, 1980, 185p.
202. *Strong Motion Earthquake Records* in Japan, 1986, volume 31. The National Research for Disaster Prevention Science and Technology Agency, March 1988, Japan, p.210.
203. *Strong Motion Instrumental Data* on the San Fernando Earthquake of February 9, 1971 (D.E.Hudson, Editor). California Institute of Technology, September, 1971, 260p.
204. *Sufang Zhang and Eberhard Luz.* The Seismic Response Analis of a Highrise Building in Armenia. Proceeding 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering. Bakleta, Rotterdam, 1995, pp.1411-1416.
205. *Suyehiro S., Okada T., Kobayashi H., Hirosawa 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.
206. *Swiss Re.* Earthquake Risk Assessment. Printed in Switzerland TS/e 2500, 1980, 56p.
207. *Tentative Seismic Isolation* Design Requirements. Base Isolation Subcommittee of the Seismology Committee Structural Engineering Association of Northern California, September 1986, 30p.
208. *The Global Seismic Hazard Assessment* Program (GSHAP) 1992-1999. Summary Volume. "Annaly di Geofisica:, vol.42, N6, December 1999. (Edited by Domenico Giardini) pp.957-1280.
209. *The Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) Earthquake*. January 17, 1995 Preliminary Reconnaissance Report. Oakland, California. EERI, 95-04 February 1995, 116p.

210. **Tiedemann H.** Catalogue of Earthquakes and Volcanic Eruptions. Zurich, 1991. Appendix 22, 94p.
211. **Trifunac M.D.** A Note on Rotational Components of Earthquake Motions on Ground Surface for Incident Body Waves, Soil Dynamic and Earthquake Engineering N1, 1982, pp.11-19.
212. **United States of America.** Uniform Building Code, vol.2, Chapter 16, Division IV-Earthquake Design, California, 1997, 69p.
213. **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, N4, pp.974-1002, August, 1994.
214. **Yamazaki F.** Comparative Study of Attenuation Characteristics of Ground Acceleration in Europe, North America and Japan. Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research center. N26, March, 1993. Inst. of ind. Science Univ. of Tokyo, p.39-56.
215. **Yamazaki F., Meguro K., Katayama A.** Quick Look Report on the Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake, July 12, 1993. INCEDE, NEWSLETTER, Special Issue, July 1993.
216. **Yegian M.K., Ghahraman V.G.** The Armenian Earthquake of December 1988, Northeastern University, Boston, Massachusetts, October, 1992, 216p.
217. **Zelenovich V., Paskalev T.** Yugoslav Code for Aseismic design and Analysis of Engineering Structures in Seismic regions. Proceedings of the 8th European Conference of Earthquake Engineering. Vol. 1, Lisboa, 1986.
218. **Ավանեսյան Ա., Սախապյան Է., Նազարեթյան Ս.** Հայաստանի երկրաբանական եզակի հուշարձանները (հայերեն, անգլերեն և ռուսերեն լեզուներով): Երևան, 2000, 160 էջ:
219. **Քարսեղյան Լ.Ս.** Պատմական վկայություններ հայկական լեռնաշխարհի երկրաշարժերի մասին: Հայաստանի ԳԱԱ հրատարակչություն, 1995, 68 էջ:
220. **Թովմասյան Ա.Կ., Հարությունյան Ռ.Ս., Թովմասյան Գ.Կ., Սամարյան Գ.Դ.** Երկրաշարժը և նրանից պաշտպանվելու վարքականոցները: Երևան, 2003, 35 էջ:
221. **Խաչիյան Է.Ե.** Անհամասեռ գրունտային հիմնատակի դինամիկական հատկությունների հետազոտություններ: Հաշվետվություն Հայաստանի Ամերիկյան համալսարանի ինժեներական գիտական կենտրոնի կողմից աջակցվող 1994-1996թ. կատարված աշխատանքի վերաբերյալ: Երևան, հունիս, 1996թ., ՀԱՀ, 14 էջ:
222. **Խաչիյան Է.Ե.** Ուժեղ երկրաշարժերի ժամանակ գետնի տատանումների գերակշռող պարբերությունների մասին: «Ծարտարապետություն, քաղաքաշինություն և շինարարություն», գիտա-տեխնիկական հոդվածների ժողովածու, մաս II, Երևանի ճարտարապետաշինարարական ինստիտուտ, Երևան 1997, 16-19 էջ:



223. *Խաչիյան Է.Ե.* Ինժեներային երկրաշարժագիտության մակերևութային շերտի խնդրի մասին: Հայաստանի շինարարների տեղեկագիր N9 (26) 1998թ. (հատուկ թողարկում), 9-13 էջ:
224. *Խաչիյան Է.Ե.* Երկրաշարժերի կանխագուշակման և երկրաշարժաանվտանգության ապահովման հիմնահարցերը: Հայաստանի շինարարների ասոցիացիա, Երևան 1998, 44 էջ:
225. *Խաչիյան Է.Ե.* Կիրառական երկրաշարժագիտություն: Երևան, «Գիտություն», 2002, 312 էջ:
226. *Կարապետյան Բ.Կ., Տեր-Պետրոսյան Պ.Յ.* Երկրաշարժ. ինչպես պատրաստ լինել դրան: Երևան, «Նաիրի», 1998, 46 էջ:
227. *ՀՀՇՆ II-6.02.2006* Սեյսմակայուն շինարարություն. նախագծման նորմեր, Հայաստանի Հանրապետության քաղաքաշինության նախարարություն, Երևան, 2006 (հայերեն և ռուսերեն լեզուներով), 120 էջ:
228. *Մանուկյան Մ.* Երկրաշարժ, ՀԿԿ կենտկոմի հրատարակչություն, Երևան, 1989, 80 էջ:
229. *Սկրտչյան Կ.Յ., Խաչիյան Է.Ե.* Երկրաշարժ. հուշագիր բնակչության համար: Երևան, «Հայաստան», 1995, 25 էջ:
230. *Նազարով Ա.Գ.* Երկրաշարժերը և պաշտպանությունը նրանցից: Երևան, Հայկական ՍՍՀ ԳԱ հրատարակչություն, 1981, 72 էջ:
231. *Շահումյալյան Լ.Վ., Կարապետյան Բ.Կ.* Երկրաշարժերը և սեյսմակայուն շինարարությունը: Երևան, Հայկական ՍՍՀ ԳԱ հրատարակչություն, 1955, 64 էջ:
232. *Պյեռ Ռուսոտ.* Երկրաշարժեր: Երևան, «Հայաստան», 1969, 324 էջ:
233. *Սեյսմիկ պաշտպանությունը և նրա կազմակերպումը:* Ուսումնական ձեռնարկ պրոֆ. Ս.Բալասանյանի խմբագրությամբ: Գյումրի, «Էլդորադո», 2002, 262 էջ:
234. *Ստեփանյան Վ.Ա.* Երկրաշարժերը Հայկական լեռնաշխարհում և նրա մերձակայքում: Երևան, «Հայաստան», 1964, 248 էջ:

# E. E. KHACHIAN APPLIED SEISMOLOGY

## TABLE OF CONTENT

### FOREWORD

### PART I PRINCIPAL EARTHQUAKE REGULARITIES

|      |                                                                                  |     |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.1  | What are earthquakes?                                                            | 7   |
| 1.2  | Hazardous earthquake-accompanying phenomena                                      | 14  |
| 1.3  | Causes of earthquakes, lithosphere plates, seismically active belts of the earth | 21  |
| 1.4  | Earthquake origination mechanism                                                 | 33  |
| 1.5  | Earthquake records                                                               | 38  |
| 1.6  | Seismic waves and definition of earthquake focal parameters                      | 59  |
| 1.7  | Wave equation                                                                    | 66  |
| 1.8  | Equations of dynamic theory of elastic                                           | 71  |
| 1.9  | Seismic wave propagation velocities                                              | 76  |
| 1.10 | Features of plane seismic waves                                                  | 82  |
| 1.11 | Reflection and refraction of seismic waves                                       | 96  |
| 1.12 | Surface seismic waves                                                            | 100 |
| 1.13 | Earthquake intensity                                                             | 105 |
| 1.14 | Earthquake magnitude and energy, Richter's scale                                 | 114 |
| 1.15 | Seismic moment of an earthquake                                                  | 121 |
| 1.16 | Earthquake mechanics                                                             | 125 |
| 1.17 | Earthquake energy                                                                | 132 |
| 1.18 | Potential energy of strain in the medium during earthquake preparation           | 136 |
| 1.19 | Some statistical data and empirical relationships between earthquake parameters  | 153 |
| 1.20 | Earthquake prediction                                                            | 156 |
| 1.21 | Preparedness to earthquakes, prognosis behavior of structure                     | 173 |

### PART II GROUND MOTION IN STRONG EARTHQUAKES

|     |                                                                                                |     |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1 | General                                                                                        | 183 |
| 2.2 | Strong ground motion features                                                                  | 184 |
| 2.3 | Predominant periods of strong ground motions                                                   | 191 |
| 2.4 | Determination of predominant periods by microvibration records                                 | 201 |
| 2.5 | Methods of predominant period calculation for inhomogeneous surface layers                     | 212 |
| 2.6 | Examples of predominant period calculation                                                     | 216 |
| 2.7 | A simplified method to determine the main period of free vibrations of a multilayer foundation | 227 |



|                                                                    |                                                                                                        |       |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2.8                                                                | Higher order periods of a non-homogeneous foundation                                                   | 235   |
| 2.9                                                                | Methods of approximated determination of the first predominant period for a non-homogeneous foundation | 239   |
| 2.10                                                               | Certain considerations on earthquake ground motion character                                           | 243   |
| 2.11                                                               | Method to calculate a seismogram by earthquake model as an instantaneous break of integrity            | 245   |
| 2.12                                                               | Classification of local soil conditions by seismic properties                                          | 262   |
| 2.13                                                               | Problem of amplified or reduced earthquake effect on the surface of the Earth                          | 273   |
| 2.14                                                               | On the seismic microzonation                                                                           | 281   |
| 2.15                                                               | Horizontal and vertical ground motions                                                                 | 291   |
| 2.16                                                               | Rotational ground motions in earthquakes                                                               | 313   |
| 2.17                                                               | Earthquake effects in epicenter zone and in deep layers                                                | 326   |
| 2.18                                                               | About soil behaviour in earthquakes                                                                    | 338   |
| <b>PART III EARTHQUAKES IN ARMENIA.<br/>THE SPITAK EARTHQUAKE.</b> |                                                                                                        |       |
| 3.1                                                                | Brief review on strong earthquakes in the Armenian Upland                                              | 349   |
| 3.2                                                                | Strong earthquakes within the area of the Republic of Armenia                                          | 352   |
| 3.3                                                                | The December 7, 1988 Spitak earthquake                                                                 | 359   |
| 3.3.1                                                              | General characteristics of the earthquake                                                              | 359   |
| 3.3.2                                                              | <i>Foreshock and aftershocks of the earthquake</i>                                                     | 366   |
| 3.3.3                                                              | <i>Geotechnical effects of the earthquake</i>                                                          | 370   |
| 3.3.4                                                              | <i>Records of ground vibration</i>                                                                     | 375   |
| 3.3.5                                                              | <i>Investigation of effects from local soil conditions</i>                                             | 383   |
| 3.3.6                                                              | <i>Destructive effects of the earthquake</i>                                                           | 389   |
| 3.3.7                                                              | <i>Social and economic effects of the earthquake</i>                                                   | 412   |
| 3.3.8                                                              | <i>International solidarity and emergency aid rendered to the disaster area</i>                        | 414   |
| <b>APPENDICES</b>                                                  |                                                                                                        |       |
| 1                                                                  | Main dates in the chronology of seismology development                                                 | 421   |
| 2                                                                  | Most important earthquakes on the Earth and their consequences                                         | 426   |
| 3                                                                  | MSK-64 earthquake intensity scale                                                                      | 448   |
| 4                                                                  | EMS - European Macroseismic Scale (the updated version)                                                | 453   |
| 5                                                                  | The distribution of global, national, and regional networks of digital broadband seismograph stations  | XXVI  |
| 6                                                                  | National Observation Network of the NSSP RA                                                            | XXVII |
| 7                                                                  | Damage scale according to CHPA II-6.02.2006 ra code                                                    | 459   |
| 8                                                                  | Rules all must be aware of                                                                             | 460   |
| 9                                                                  | Glossary of main terms used in the book                                                                | 463   |
| <b>REFERENCES</b>                                                  |                                                                                                        | 471   |

## Предисловие

### Часть I. Основные закономерности землетрясений

|      |                                                                                            |     |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.1  | Что такое землетрясение?                                                                   | 7   |
| 1.2  | Опасные явления, сопровождающие землетрясения                                              | 14  |
| 1.3  | Причины землетрясений, литосферные плиты, сейсмоактивные пояса земли                       | 21  |
| 1.4  | Механизм возникновения землетрясения                                                       | 33  |
| 1.5  | Регистрация землетрясения                                                                  | 38  |
| 1.6  | Сейсмические волны и определение параметров очага землетрясения                            | 59  |
| 1.7  | Волновое уравнение                                                                         | 66  |
| 1.8  | Уравнения динамической теории упругости                                                    | 71  |
| 1.9  | Скорости распространения сейсмических волн                                                 | 76  |
| 1.10 | Особенности плоских сейсмических волн                                                      | 82  |
| 1.11 | Отражение и преломление сейсмических волн                                                  | 96  |
| 1.12 | Поверхностные сейсмические волны                                                           | 100 |
| 1.13 | Интенсивность землетрясения                                                                | 105 |
| 1.14 | Магнитуда землетрясения, шкала Рихтера                                                     | 114 |
| 1.15 | Сейсмический момент землетрясения                                                          | 121 |
| 1.16 | Механика землетрясения                                                                     | 125 |
| 1.17 | Энергия землетрясения                                                                      | 132 |
| 1.18 | Потенциальная энергия деформации среды в период подготовки землетрясения                   | 136 |
| 1.19 | Некоторые статистические данные и эмпирические зависимости между параметрами землетрясения | 153 |
| 1.20 | Прогнозирование землетрясений                                                              | 156 |
| 1.21 | Подготовка к землетрясениям, прогнозирование поведения сооружения                          | 173 |

### Часть II. Движения грунта при сильных землетрясениях

|     |                                                                           |     |
|-----|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1 | Общие положения                                                           | 183 |
| 2.2 | Особенности сильных движений грунта                                       | 184 |
| 2.3 | Преобладающие периоды сильных движений грунта                             | 191 |
| 2.4 | Определение преобладающих периодов по записям микроколебаний              | 201 |
| 2.5 | Методы вычисления преобладающих периодов неоднородных поверхностных слоев | 212 |



|      |                                                                                                      |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.6  | Примеры определения преобладающих периодов                                                           | 216 |
| 2.7  | Упрощенный способ определения значения основного периода свободных колебаний многослойного основания | 227 |
| 2.8  | Периоды высших порядков неоднородного основания                                                      | 235 |
| 2.9  | Приближенные способы определения первого преобладающего периода неоднородного основания              | 239 |
| 2.10 | Некоторые соображения о характере движения грунта при землетрясениях                                 | 243 |
| 2.11 | Способ вычисления сейсмограммы по модели землетрясения как мгновенного разрыва сплошности            | 245 |
| 2.12 | Классификация грунтовых условий местности по сейсмическим свойствам                                  | 262 |
| 2.13 | Задача усиления или уменьшения эффекта землетрясения на поверхности Земли                            | 273 |
| 2.14 | О сейсмическом микрорайонировании                                                                    | 281 |
| 2.15 | Горизонтальные и вертикальные движения грунта                                                        | 291 |
| 2.16 | Вращательные движения грунта при землетрясениях                                                      | 313 |
| 2.17 | Проявление землетрясения в эпицентральной зоне и в глубинных слоях                                   | 326 |
| 2.18 | О поведении грунтов при землетрясениях                                                               | 338 |

### **Часть III. Землетрясения на территории Армении.**

#### **Спитакское землетрясение**

|       |                                                                                        |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1   | Краткий очерк о сильных землетрясениях, имевших место на территории Армянского нагорья | 349 |
| 3.2   | Сильные землетрясения, имевшие место на территории Республики Армения                  | 352 |
| 3.3   | Спитакское землетрясение 7-ого декабря 1988 года                                       | 359 |
| 3.3.1 | Общая характеристика землетрясения                                                     | 359 |
| 3.3.2 | Форшок и афтершоки землетрясения                                                       | 366 |
| 3.3.3 | Геотехнические последствия землетрясения                                               | 370 |
| 3.3.4 | Регистрация колебания грунта                                                           | 375 |
| 3.3.5 | Исследование влияния местных грунтовых условий                                         | 383 |
| 3.3.6 | Разрушительные последствия землетрясения                                               | 389 |
| 3.3.7 | Социально-экономические последствия землетрясения                                      | 412 |
| 3.3.8 | Международная солидарность и неотложная помощь зоне бедствия                           | 414 |

### **ПРИЛОЖЕНИЯ**

|   |                                                   |     |
|---|---------------------------------------------------|-----|
| 1 | Памятные даты развития сейсмологии                | 421 |
| 2 | Важнейшие землетрясения на Земле и их последствия | 426 |

|   |                                                                                                   |       |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 3 | Шкала интенсивности землетрясения MSK-64                                                          | 448   |
| 4 | Европейская Макросейсмическая Шкала – EMS                                                         | 453   |
| 5 | Распределение широких сетей глобальных, национальных и региональных станций числовых сейсмографов | XXVI  |
| 6 | Национальная сеть наблюдений НССЗ РА                                                              | XXVII |
| 7 | Шкала повреждений по нормам СНРА II-6.02.2006 РА                                                  | 459   |
| 8 | Эти правила должны знать все                                                                      | 460   |
| 9 | Словарь основных терминов, использованных в книге                                                 | 463   |

## ЛИТЕРАТУРА

471

Содержание на английском языке

487



**ХАЧИЯН ЭДУАРД ЕФРЕМОВИЧ**

## **ПРИКЛАДНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ**

Редактор издательства С. Даниелян  
Компьютерный набор: А. Саркисян

### **Часть III. Землетрясения на территории Армении. Синтаксис землетрясений**

|       |                                                                                        |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1   | Краткий очерк о сильных землетрясениях, имевших место на территории Армянского царства | 340 |
| 3.2   | Сильные землетрясения, имевшие место на территории Республики Армения                  | 342 |
| 3.3   | Синтаксис землетрясений 7-го декабря 1988 года                                         | 344 |
| 3.3.1 | Общая характеристика сейсмоструктуры                                                   | 349 |
| 3.3.2 | Формы и проявления землетрясений                                                       | 366 |
| 3.3.3 | Геотектоническая дислокация землетрясений                                              | 370 |
| 3.3.4 | Регистры и наблюдения грунта                                                           | 474 |
| 3.3.5 | Исследования аномальных движений грунта                                                | 487 |
| 3.3.6 | Ватрушечные исследования землетрясений                                                 | 492 |
| 3.3.7 | Сейсмическо-экономический ущерб                                                        | 493 |
| 3.3.8 | Масштабирование                                                                        | 494 |

Изд. заказ № 219

Сдано в производство 28.06.2008.

Формат 60 x 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная № 1.

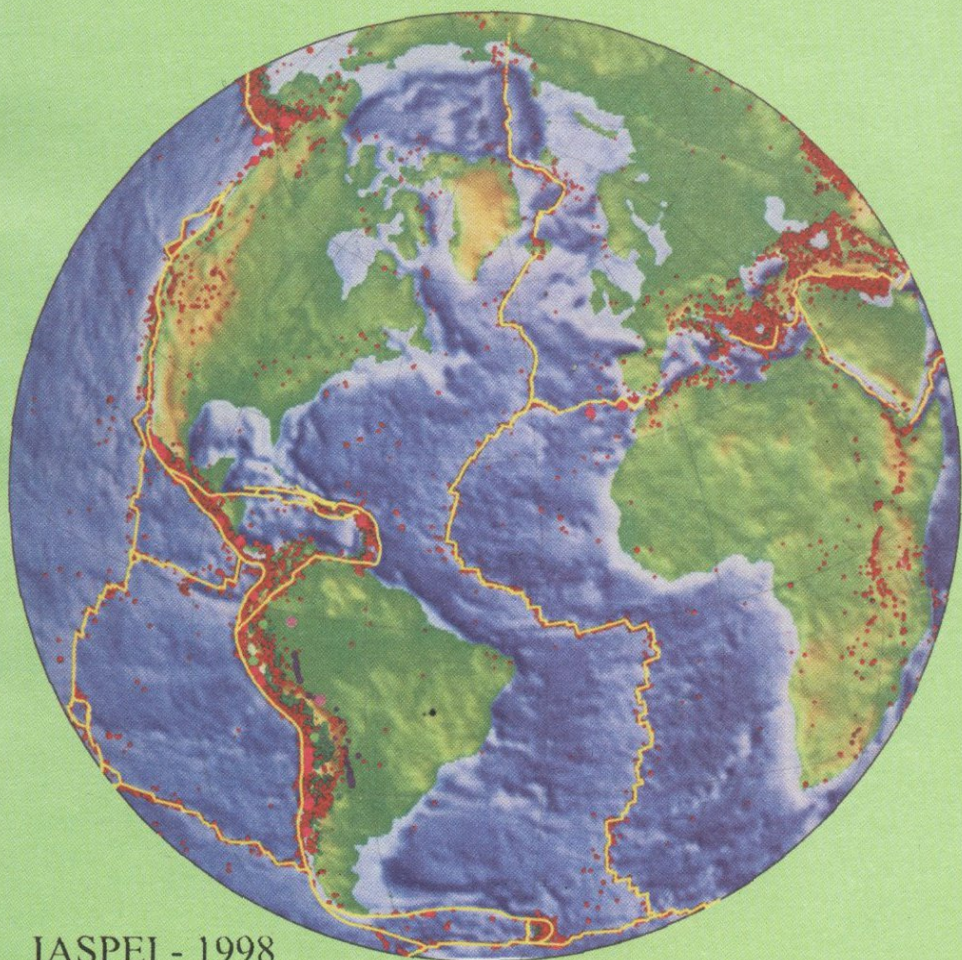
Печ. л. 32.4. Тираж 400 экз.

Цена договорная.

### **ПРИЛОЖЕНИЯ**

|   |                                         |     |
|---|-----------------------------------------|-----|
| 1 | Начальные даты регистрации сейсмических | 424 |
| 2 | Важнейшие землетрясения                 | 428 |

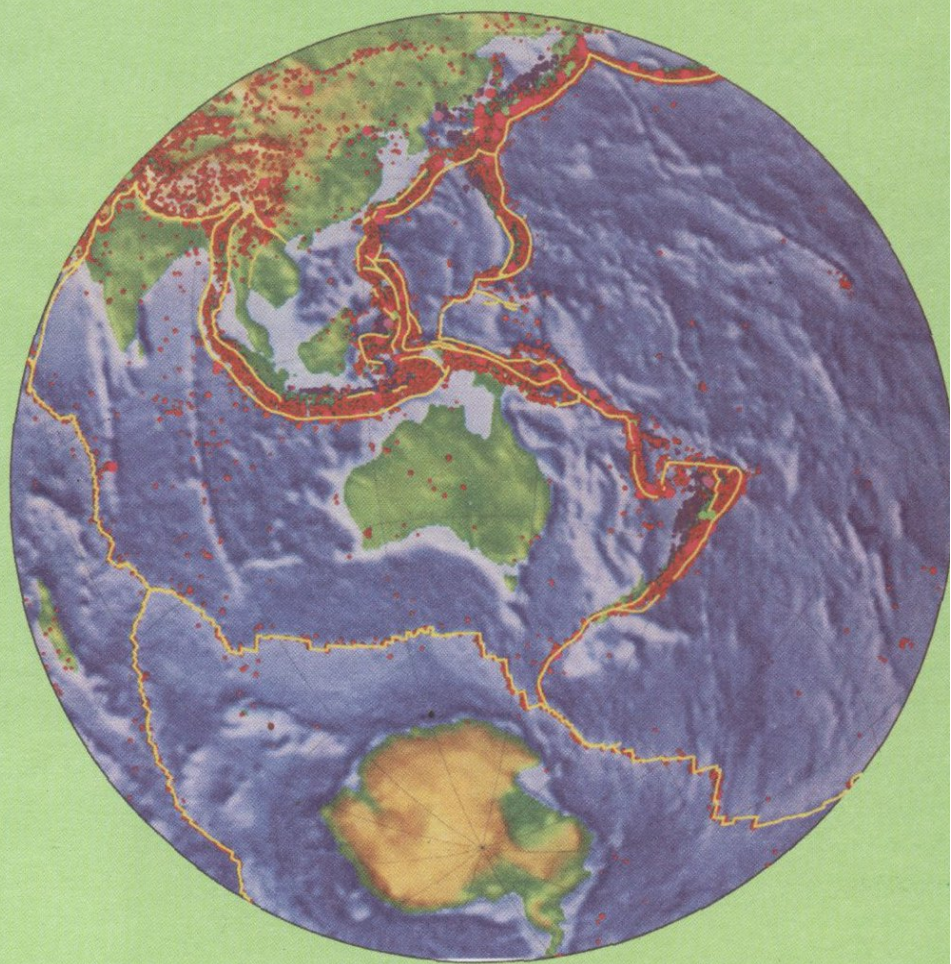
Типография ООО "Эдит-Принт".



## IASPEI - 1998

Seismicity of the Earth, 1964-1995, magnitudes greater than 5.1.







5673

**ХАЧИЯН ЭДУАРД ЕФИ**

доктор технических наук, профессор, академик НАН Армении, лауреат Премии Президента РА, заведующий кафедрой строительной механики ЕрГУАС, главный научный сотрудник Института геологических наук НАН РА. Признанный специалист в области инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства, строительной механики и теории колебаний. Широко известны в странах СНГ и за рубежом его исследования по использованию аксе-

лерограмм сильных землетрясений в нелинейных, упруго-пластических, пространственных и волновых задач сейсмического воздействия на различные здания и сооружения, а также для разработки основных положений норм сейсмостойкого строительства. Автор более чем 230 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 и ассоциаций.

