

**А.А. Амосов   С.Б. Сеницын**

# **ОСНОВЫ ТЕОРИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ**



**А.А. Амосов, С.Б. Сеницын**

# **ОСНОВЫ ТЕОРИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

Издание второе, переработанное и дополненное

Допущено Министерством образования Российской Федерации в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов  
«Строительство»



Издательство Ассоциации строительных вузов  
Москва 2010

**УДК 624.04**

**Рецензенты:**

кафедра сопротивления материалов Российского государственного открытого технического университета путей сообщения МПС РФ (заведующий кафедрой – доктор технических наук, профессор *А.Е. Саргсян*);  
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения *Н.Н. Шапошников*

**Амосов А.А., Сеницын С.Б.**

Основы теории сейсмостойкости сооружений / Учебное пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 136 с.

**ISBN 978-5-93093-083-2**

Приводятся основные понятия сейсмологии, полезные для специалиста, работающего в области расчета сооружений.

На базе общих уравнений динамики формулируются постановки задач расчета сооружений при сейсмических воздействиях, излагаются основные методы их решения. Особое внимание уделено применению МКЭ.

Данное учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов ВУЗов строительных специальностей.

**УДК 624.04**

**ISBN 978-5-93093-083-2**

© Амосов А.А., Сеницын С.Б., 2010  
© Издательство АСВ, 2010

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ</b> .....	8
1.1. Некоторые современные сведения о строении Земли. Причины возникновения землетрясений .....	8
1.2. Основные понятия сейсмологии .....	12
1.3. Сейсмические волны. Распространение и отражение .....	16
<b>ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ</b> .....	20
2.1. Краткий очерк развития теории сейсмостойкости.....	20
2.2. Расчетные схемы зданий и сооружений.....	22
2.3. Линейный осциллятор. Определение сейсмических сил. Спектры ускорений, скоростей и смещений. Спектральная кривая ....	25
2.3.1. Дифференциальные уравнения движения линейного осциллятора.....	25
2.3.2. Определение сейсмических сил при различных законах движения основания.....	29
2.4. Нормативный метод расчета линейного осциллятора на сейсмическое воздействие .....	34
2.4* Новая редакция СНиП II-7-81* .....	36
2.5. Определение сейсмических нагрузок для систем со многими степенями свободы.....	37
2.5.1. Дифференциальные уравнения колебаний системы со многими степенями свободы .....	37
2.5.2. Применение метода разложения по собственным формам колебаний .....	39
2.5.3. Определение сейсмических нагрузок для системы с $n$ степенями свободы (нормативный метод).....	43
2.5.4* Новая редакция СНиП II-7-81* .....	48
2.6. Определение внутренних усилий .....	48
2.7. Расчет на воздействие акселерограмм .....	49
<b>ГЛАВА 3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЗДАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ</b> .....	52
3.1. Нормативный расчет .....	52
3.1.1. Определение собственных частот и собственных форм колебаний .....	52
3.1.2. Определение сейсмических нагрузок и внутренних усилий .....	54
3.1.2* Корректировка в соответствии со СНиП II-7-81* .....	57
3.1.3. Определение расчетных значений внутренних усилий.....	58
3.2. Нормативный расчет трехэтажного здания .....	59
3.2.1. Определение частот и форм собственных колебаний .....	60
3.2.2. Определение сейсмических сил и внутренних усилий .....	63
3.2.3. Определение расчетных значений внутренних усилий.....	66
3.2.4* Корректировка в соответствии со СНиП II-7-81* .....	67

<b>ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ) ДЛЯ РАСЧЕТА СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ .....</b>	<b>69</b>
4.1. Общие положения метода .....	69
4.2. Основы метода конечных элементов .....	70
4.2.1. Уравнения движения .....	70
4.2.2. Матрица жесткости конечных элементов .....	71
4.2.3. Матрица масс конечных элементов .....	72
4.2.4. Матрица демпфирования .....	73
4.3. Свободные колебания .....	73
4.3.1. Частоты и формы собственных колебаний .....	73
4.3.2. Определение частот и форм собственных колебаний с помощью программы “RADIUS” .....	76
4.4. Расчет сооружений на сейсмические воздействия с помощью программного комплекса “RADIUS” .....	83
4.4.1. Краткая характеристика программы .....	83
4.4.2. Нормативный расчет .....	84
4.4.3. Расчет на воздействие акселерограмм .....	86
<b>ГЛАВА 5. УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ХАРАКТЕРА РАБОТЫ СООРУЖЕНИЯ И СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ .....</b>	<b>98</b>
5.1. Расчет сооружений, не приводимых к консольной схеме .....	98
5.2. Пример расчета пространственной конструкции на действие землетрясения .....	103
5.2.1. Определение частот и форм колебаний .....	104
5.2.2. Расчет на действие акселерограммы (горизонтальное воздействие) .....	106
5.2.3. Нормативный расчет (горизонтальное воздействие) .....	110
5.2.4. Расчет на действие акселерограммы (вертикальное воздействие) .....	112
5.2.5. Вертикальное воздействие, нормативный расчет .....	114
<b>ГЛАВА 6. УЧЕТ ПОДАТЛИВОСТИ ОСНОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ .....</b>	<b>116</b>
6.1. Расчетные модели упругого основания .....	116
6.2. Определение динамических характеристик основания .....	121
6.3. Учет податливости основания при определении сейсмических нагрузок .....	127
6.4. Список дополнительной литературы к главе 6 .....	130
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>131</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>133</b>

# ВВЕДЕНИЕ

**Сейсмостойкость** сооружений – это та часть общей динамики сооружений, в которой изучается поведение конструкций при сейсмических воздействиях и разрабатываются методы расчета сооружений, обеспечивающих их надежность при землетрясениях.

Понятие “с е й с м и к а” происходит от греческого слова “s e i s m o s”, означающего колебания при землетрясении. Под землетрясением следует понимать сотрясения земной поверхности и, в частности, оснований сооружений, вызванные теми или иными процессами, происходящими в толще Земли.

Изучением землетрясений занимается ветвь науки, называемая с е й с м о л о г и е й. С точки зрения сейсмостойкости сооружений наиболее интересна одна из прикладных частей этой науки – и н ж е н е р - н а я с е й с м о л о г и я, задачей которой является изучение сейсмических явлений для осуществления сейсмического строительства.

Издавна землетрясения были «бичом человечества», обрекая его на неисчислимые людские и материальные потери. Следует заметить, что мистический ужас, вызываемый землетрясениями, часто создавал у людей образ некоей божьей кары, наказания ниспосланного людям свыше за их грехи. Примечательно, что эта точка зрения нашла отражение даже в таком солидном научном учреждении как Британское королевское общество, которое в 1752 году опубликовало сообщение о том, что землетрясения происходили там, где население нуждалось в наказаниях.

Отголоски этого метафизического воззрения обнаруживаются и в настоящие времена, когда в некоторых публикациях околonaучного содержания пытались подобным образом обосновать неотвратимость происшедших землетрясений в Сплите (Югославия) или Спитаке (Армения).

Вообще говоря, мифология, связанная с попытками объяснения причин возникновения землетрясений, чрезвычайно занимательна и, во многом, поучительна. Так например, в Японии, где землетрясения часто сопровождаются извержениями вулканов, существовал миф о том, что это является проявлением дыхания чудовищного подземного дракона, обитающего в недрах земли. Другое поверье, бытовавшее у северных народов, связано с представлением о том, что земля в виде плоского диска покоится на спинах гигантских китов. Движения этих китов вызывают сотрясения земной поверхности.

Теперь достаточно заменить огнедышащего дракона расплавленной магмой ядра Земли, а китов – континентальными плитами, и мы получим поразительное соответствие этих мифов современным представлениям сейсмологии.

Землетрясения представляют собой одно из наиболее частых природных явлений. По сведениям сейсмологов общее число отмечаемых ежегодно землетрясений достигает несколько тысяч или десятков тысяч в год.

Наглядное представление о количестве регистрируемых ежегодно землетрясений дает следующая таблица.

Таблица 1

Характеристика землетрясений	Число в год	Магнитуда
1. Катастрофические землетрясения планетарного масштаба	~ 1- 2	> 8
2. Землетрясения с обширными разрушениями регионального масштаба	10–15	7–8
3. Землетрясения с разрушительными толчками	100–150	6–7
4. Землетрясения средней силы с отдельными повреждениями сооружений	до 1000	5–6
5. Слабые землетрясения без особых повреждений сооружений	7000–10000	4–5
6. Землетрясения, регистрируемые только инструментально	> 10000	< 4

Слабые землетрясения ощущаются лишь по несильному скрипу стен в деревянных конструкциях, позваниванию посуды или слабыми колебаниями люстр. Более сильные землетрясения вызывают растрескивание штукатурки, падение отдельных предметов мебели и другие явления, создающие дискомфорт. Далее по нарастающей градации отмечается все более усиливающиеся эффекты, вплоть до обвала кирпичных стен, разрушения несущих конструкций, растрескивания почвы, изменения земной поверхности и др. Это обычно при развитой инфраструктуре сопровождается пожарами, взрывами резервуаров ГСМ и другими опустошительными эффектами и приводит часто к большому количеству человеческих жертв.

Так например, при землетрясении 1556 г. в провинции Шанси (Китай) погибло около 830 тыс. человек; землетрясение в Калькутте (Индия) 11 октября 1737 г. унесло жизни свыше 300 тыс. человек; землетрясение в Калабрии (Италия) 5 декабря 1783г. – свыше 100 тыс. человек; при землетрясении в г. Бухта Сагами (Япония) 1 ноября 1923 г. погибло свыше 100 тыс. человек.

В числе разрушительных землетрясений последних десятилетий следует отметить следующие: г.Мехико (1957), Агадир (Марокко, 1960), Скопле (Югославия, 1963); Ниигата (Япония, 1964); г.Ташкент (Узбекистан, 1966), г.Каракас (Венесуэла, 1967); г.Сан–Франциско (США, 1971); г.Спитак (Армения, 1987) и др.

Вообще говоря, современное состояние науки и техники не позволяет пока ставить задачу предотвращения разрушительных землетрясений. Более того, даже прогноз землетрясений в широком смысле этого слова представляет собой трудноразрешимую задачу.

Тем не менее, уже сегодня ставится проблема разработки антисейсмических мероприятий, которая состоит из двух основных частей:

– разработка методов прогнозирования места расположения ожидаемого разрушительного землетрясения и оценка его интенсивности;

– разработка сейсмостойких сооружений, т.е. сооружений, обладающих высокими технико-экономическими показателями и способными воспринять землетрясение ожидаемой интенсивности с минимальным ущербом.

Безусловно, обе эти части тесно связаны друг с другом, но если решение задач первой части указанной проблемы относится к компетенции сейсмологии и геофизики, то решение задач второй части непосредственно связано со специализацией в области строительных наук и составляет основное содержание курса, называемого **теорией сейсмостойкости сооружений**.

Первое издание учебного пособия вышло в 2001 году и состояло из 4-х глав.

В первой главе, носящей ознакомительный характер, излагаются основные понятия сейсмологии, полезные для специалиста, работающего в области теории сейсмостойкости сооружений.

Вторая глава составляет основное теоретическое содержание данного пособия. Здесь на базе общих уравнений динамики сооружений формулируются постановки задач расчета сооружений при сейсмических воздействиях, излагаются основные методы их решения. Особое внимание уделено нормативному методу расчета.

Третья глава имеет методологический характер и содержит примеры расчета здания на сейсмические воздействия.

В четвертой главе описывается методика расчета сооружений на сейсмические воздействия, основанная на применении метода конечных элементов.

За время, прошедшее после выхода учебного пособия «Основы теории сейсмостойкости сооружений» интерес к изучению указанной дисциплины сильно возрос в связи с усилением сейсмической активности на территории России и за ее пределами. Кроме истощения тиража издания появилось две причины выпуска нового издания.

Первая – выход в свет новой редакции СНиП II-7-81\*, «Строительство в сейсмических районах». Мы эти изменения отразили в разделах, отмеченных звездочкой \*. Кроме того, были пересчитаны примеры в соответствии с новой редакцией.

Вторая причина – дополнение текста двумя разделами, показывающими собственные разработки авторов.

А.А. Амосовым написана глава «Взаимодействие сооружения с грунтовым основанием», С.Б. Сеницыным написана глава «Учет пространственной работы сооружения и сейсмического воздействия произвольного направления», материал которой реализован в программе RADIUS.

# ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

## 1.1. Некоторые современные сведения о строении Земли. Причины возникновения землетрясений

Исследования геофизиков позволили установить, что Земля представляет собой многослойное тело шаровидной формы (геоид) со средним радиусом, равным 6367,5 км. Многослойная структура земного шара представляет собой плотно примыкающие друг к другу слои, отличающиеся минералогическим составом, плотностью, механическими свойствами, температурой, давлением.

Самый верхний слой называется *к о р о й*. Кора состоит из осадочных стратифицированных (слоистых) пород, толщиной в несколько километров, лежащих на гранитном слое. В некоторых областях осадочные породы могут отсутствовать, и тогда гранитный слой выступает на дневную поверхность. Толщина гранитного слоя – от 10 км до 40 км (под горными хребтами).

В свою очередь под гранитным слоем располагается слой базальтов толщиной от 30 км под равнинами, до 20 км – под хребтами. Поверхность раздела гранитного и базальтового слоя называется в геофизике *п о в е р х н о с т ь ю К о н р а д а*. В совокупности эти два слова носят общее название *с и а л ь* (от слов *s i l i c i u m* и *a l u m i n i u m*).

Под корой располагается *в е р х н я я м а н т и я* толщиной до 1000 км, а далее – *н и ж н я я м а н т и я* толщиной до 2000 км.

Верхняя мантия содержит порообразующие элементы кремний и магний и называется *с и м а*.

Поверхность раздела слоев *сиаль* и *сима* называется *п о в е р х н о с т ь ю М о х о р о в и ч и а* (рис. 1.1).

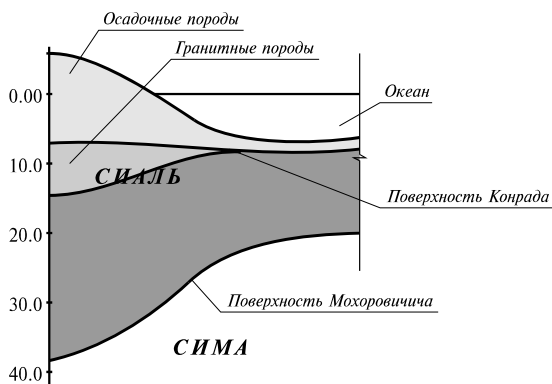


Рис. 1.1. Схематическое представление коры земного шара

Примерно на глубине 2900–3000 км резко меняются свойства вещества – возрастает плотность, а сдвиговая жесткость падает до нуля. Это характерно для жидкости, поэтому можно полагать, что материал в этой области находится в расплавленном состоянии.

С ростом глубины происходит возрастание температуры и давления. Так на глубине 1000 км температура достигает примерно 3500°C, а давление в центре Земли составляет величину порядка 3,5 млн. атм.

Вообще говоря, переменность соотношения температуры и давления в глубинах приводит к тому, что хотя основная масса расплавленного вещества располагается на уровне 2900 км, отдельные участки расплава встречаются и в коре, и, как правило, совпадают с областями интенсивного складкообразования, сопровождающегося вулканической деятельностью.

Что же касается причин возникновения высокой температуры в глубинных зонах, то здесь существуют разные версии. По одной из них повышение температуры с глубиной объясняется остаточными явлениями остывания Земли, а по другой – наличие высокой температуры объясняется присутствием большого количества радиоактивных материалов, выделяющих тепло.

На глубине примерно 5100 км предполагается существование сверхплотного ( $\sim 13 \text{ г/см}^3$ ) субъядра, находящегося в твердом состоянии.

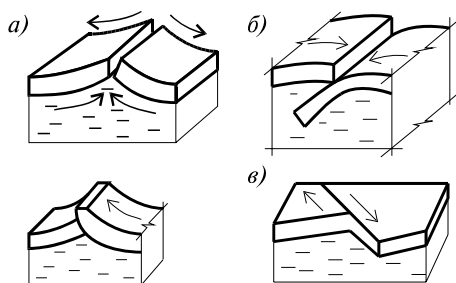
Именно на основе этих представлений сейсмологами была разработана теория распространения волн в толще земной поверхности, позволившая приближенно определять очаги землетрясений, их расстояния до рассматриваемой площадки, а также предполагаемый характер волнового воздействия на сооружение.

Подробнее о типах волн, воздействующих на сооружение, будет сказано ниже.

Одним из важных достижений геофизики и сейсмологии является открытие того факта, что верхний слой Земли – *л и т о с ф е р а* (земная кора с верхней частью мантии) рассечена на отдельные плиты, которые постоянно перемещаются относительно друг друга, как бы плавая по разжиженному слою мантии (астеносфера). Впервые теория тектоники плит была высказана в 1915г. А. Вегенором в работе “Происхождение материков и океанов”, в которой обосновывалась теория дрейфа континентов. Позже было выяснено, что разломы литосферы расчленяют её на отдельные плиты, но границы этих разломов, вообще говоря, не совпадают с очертаниями материков.

По мнению некоторых ученых границы между континентальными плитами совпадают с хребтами и глубоководными разломами – желобами. В последние десятилетия было установлено, что по дну всех океанов проходят мощные системы подводных горных хребтов, иссеченных многочисленными разломами и глубокими впадинами, которые простираются иногда на сотни километров.

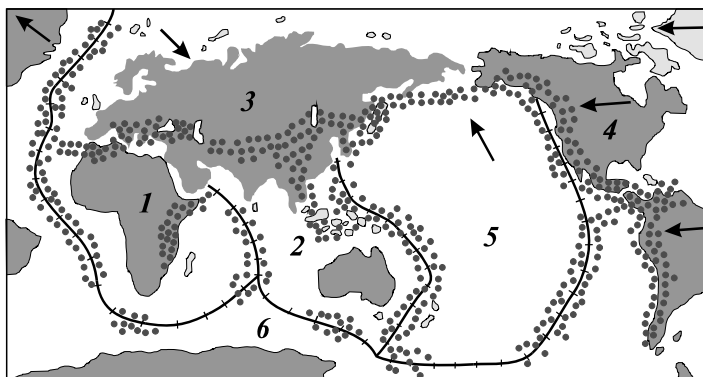
Детальное изучение границ между континентальными плитами (Н. Кэлдер) позволяет наметить три основных их типа – хребет, желоб, трансформный разлом (сдвиг) (*рис. 1.2*).



**Рис. 1.2. Типы границ между плитами:**  
*а* – хребет; *б* – желоб; *в* – трансформный разлом

Механизмы возникновения взаимодействия континентальных плит достаточно хорошо прослеживаются из приведенных рисунков. Остается добавить, что все описанные механизмы взаимодействия плит допускают излияние магмы из расщелин.

Сеть хребтов, желобов и трансформных разломов расчленяет земную кору на целый ряд отдельных плит, из которых особо следует отметить континентальные плиты (*рис. 1.3*).



Условные обозначения:

- +—+—+— — сеть желобов и трансформных разломов;
- — области землетрясений высокой интенсивности;
- ← — направление движения континентальных плит 1,2,...,6

**Рис. 1.3. Схематическое изображение континентальных плит и областей сейсмостойкости:**

1 – Африканская; 2 – Индийская; 3 – Евразийская;  
 4 – Американская; 5 – Тихоокеанская; 6 – Антарктическая

Здесь же стрелками показаны направления движения этих плит.

На этом же рисунке показаны области земной коры, где по данным сейсмологов наблюдаются землетрясения высокой интенсивности (зоны или пояса сейсмичности). Нетрудно видеть, что они практически полностью совпадают с границами континентальных плит.

Таким образом, с высокой степенью достоверности можно считать справедливой гипотезу о **т е к т о н и ч е с к о м** характере причин возникновения землетрясений.

В основе этой гипотезы лежит представление об упругом высвобождении энергии путем внезапного образования отдельных трещин, разломов и сдвигов. В результате тектонической деятельности осуществляется длительное накопление энергии в очаге разлома. В тот момент, когда напряжения в материале некоторой ограниченной области плит достигают своих предельных значений, происходит разрыв или срез материала с быстро растущими трещинами в породе. Это вызывает очень быстрый процесс высвобождения энергии, сопровождающийся возникновением и распространением сейсмических волн в окружающей среде.

Продолжительность основного землетрясения, как правило, составляет несколько десятков секунд, причем, в течение этого времени может быть зарегистрировано несколько основных толчков. Иногда основному землетрясению предшествуют слабые толчки, называемые **ф о р ш о к а м и**. Часто после сильного основного землетрясения по истечении некоторого времени наблюдаются повторные толчки – **а ф т е р ш о к и**, объясняемые вторичными землетрясениями. Как правило, интенсивность афтершоков слабее интенсивности основного землетрясения, но иногда их воздействия сопоставимы, и тогда можно говорить о последовательности, “рое”, землетрясений.

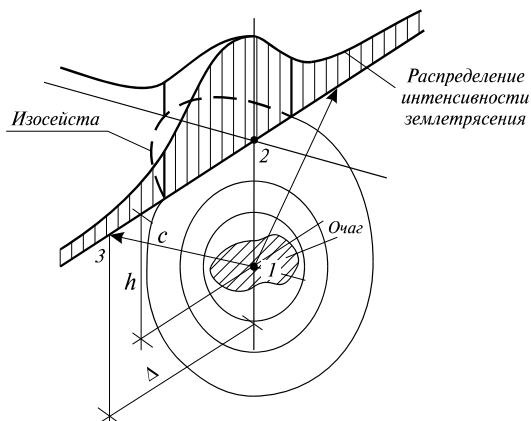
Другой причиной возникновения землетрясений может быть **у л - к а н и ч е с к а я** деятельность. По статистике вулканические землетрясения отличаются сравнительно малой областью сотрясения и незначительной силой. Хотя в истории известны и чрезвычайно сильные вулканические землетрясения. Например, землетрясение, вызванное извержением вулкана Кракатау 27.08.1883г., сопровождалось образованием приливных волн (цунами), затопивших целые острова и заметным почти во всех частях света. Районы активной вулканической деятельности, как правило, совпадают с зонами активной сейсмической деятельности, описанными ранее.

Наконец, причиной возникновения землетрясений может служить и хозяйственная деятельность человека. Это так называемые **н а в е д е н н ы е** землетрясения. Например, заполнение крупного водохранилища, откачка газа и нефти из полостей Земли и др. могут служить причиной сдвиги отдельных пластов, вызывающих сотрясение земной поверхности. Сюда же можно отнести землетрясения, происходящие вследствие карстовых явлений. Наведенные землетрясения обычно отличаются малой силой, хотя имеются примеры и разрушительных землетрясений.

## 1.2. Основные понятия сейсмологии

Сейсмология, как наука, сформировалась значительно позднее, чем того требовали запросы времени. Будучи наукой о причинах возникновения землетрясений и их регистрации, она вобрала в себя сведения из различных наук – геофизики, геомеханики, теории сплошной среды, и в том числе, теории упругости.

В результате многочисленных исследований в сейсмологии сложилась модель схемы землетрясения, показанная на *рис. 1.4*.



**Рис. 1.4. Модель схемы землетрясения:**

1 – гипоцентр (фокус); 2 – эпицентр;

$h$  – глубина очага;  $\Delta$  – эпицентральное расстояние;

$c$  – гипоцентральное расстояние  $c = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$

В соответствии с существующими воззрениями сейсмологии землетрясение, вызванное разрывами, сдвигками или трещинами в литосфере, зарождается в некоторой ограниченной её области, размеры которой могут составлять от нескольких километров до нескольких десятков или сотен километров. Эту область зарождения землетрясений, характеризуемую максимальным значением выделяемой энергии, принято называть *о ч а г о м з е м л е т р я с е н и я*. Учитывая, что размеры очага обычно на несколько порядков меньше размеров области, где ощущается воздействие данного землетрясения, для удобства и простоты очаг землетрясения можно отождествлять с некоторой точкой – точка 1 на *рис. 1.4.*, называется *г и п о - ц е н т р о м* или *ф о к у с о м* землетрясения. Проекция этой точки на дневную поверхность называется *э п и ц е н т р о м* землетрясения (точка 2). Соответствующее расстояние между этими точками  $h$  будем называть *г л у б и н о й* *о ч а г а* землетрясения.

Учебное пособие

Александр Александрович **Амосов**  
Станислав Борисович **Синицын**

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ

Издание второе, переработанное и дополненное

Компьютерная верстка: *М.С. Орешкин, Е.В. Орлов*  
Редактор: *О.А. Гладкова*  
Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.  
Подписано к печати 13.04.2010. Формат 60х90/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Усл. 8,5 п.л. Тираж 1000 экз. Заказ №

ООО «Издательство АСВ»  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511  
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru), <http://www.iasv.ru/>