

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»



Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова  
Кафедра «Геофизика и сейсмология»

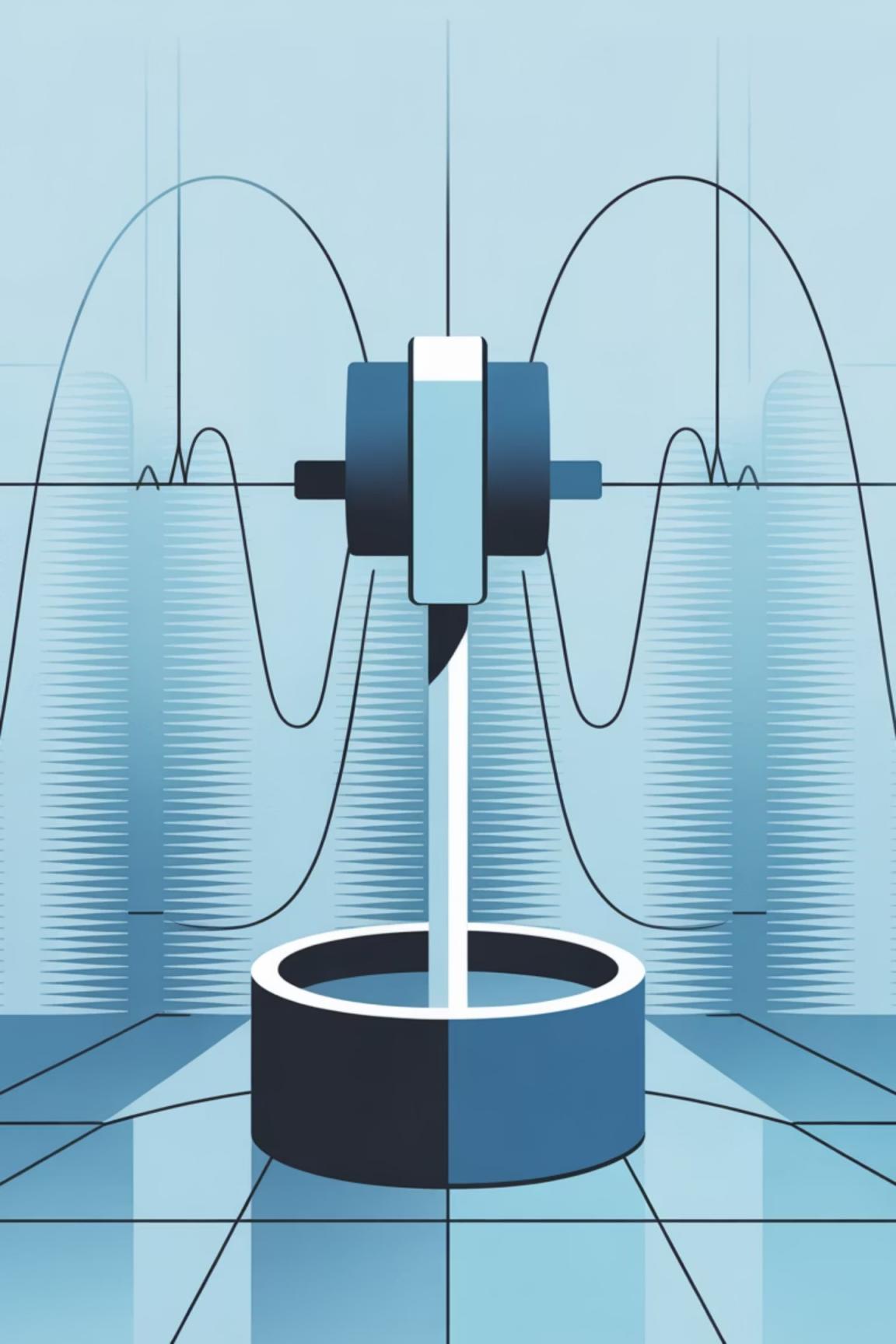
GPH7142 - Инженерная сейсмология и сейсмостойкость  
7M05302 – «Сейсмология

### Лекция– 10

На тему «Методы оценки сейсмической опасности скорости»

Преподаватель: *Ратов Боранбай Товбасарович* – доктор технических наук,  
профессор

# Фундаментальные концепции сейсмической опасности



## Детерминистический подход

Основан на анализе конкретных сейсмических источников и расчете максимально возможных воздействий. Учитывает геологическую историю региона, известные активные разломы и исторические землетрясения.

- Идентификация сейсмогенных зон
- Определение максимального магнитудного потенциала
- Расчет затухания сейсмических волн

## Вероятностный подход

Интегрирует множество возможных сценариев землетрясений с их вероятностями возникновения. Позволяет оценить сейсмический риск для заданного временного интервала.

- Статистический анализ сейсмичности
- Закон повторяемости Гутенберга-Рихтера
- Построение карт сейсмической опасности

# Скорости сейсмических волн: ключ к пониманию среды

## P-волны (продольные)

Скорость: 5-8 км/с в земной коре

Первичные волны, распространяющиеся через сжатие и растяжение среды. Самые быстрые сейсмические волны, способные проходить через твердые и жидкые среды.

## S-волны (поперечные)

Скорость: 3-4.5 км/с в земной коре

Вторичные волны, распространяющиеся перпендикулярно направлению движения. Не проходят через жидкости, что критично для определения структуры Земли.

## Поверхностные волны

Скорость: 2-4 км/с

Волны Рэлея и Лява, распространяющиеся вдоль поверхности. Наиболее разрушительные для зданий и сооружений из-за большой амплитуды колебаний.

Соотношение скоростей  $V_p/V_s$  (коэффициент Пуассона) используется для определения типа горных пород и степени их насыщения флюидами. Типичные значения для консолидированных пород составляют 1.7-1.8, для рыхлых отложений могут достигать 2.0-3.0.



# Методы измерения скоростей в инженерной сейсмологии

01

## Сейсмическое профилирование

Метод преломленных волн (МПВ) для определения скоростного разреза верхней части разреза до глубин 30-50 метров.

02

## Каротаж скважин

Прямое измерение скоростей в скважинах методами вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и акустического каротажа.

03

## Микросейсмическое зондирование

Пассивный метод, использующий естественные микросейсмы для определения резонансных частот грунтовой толщи.

04

## Поверхностные волны

MASW-метод (Multichannel Analysis of Surface Waves) для построения профиля скоростей поперечных волн  $V_s$ .

# Влияние скоростной структуры на сейсмическую опасность

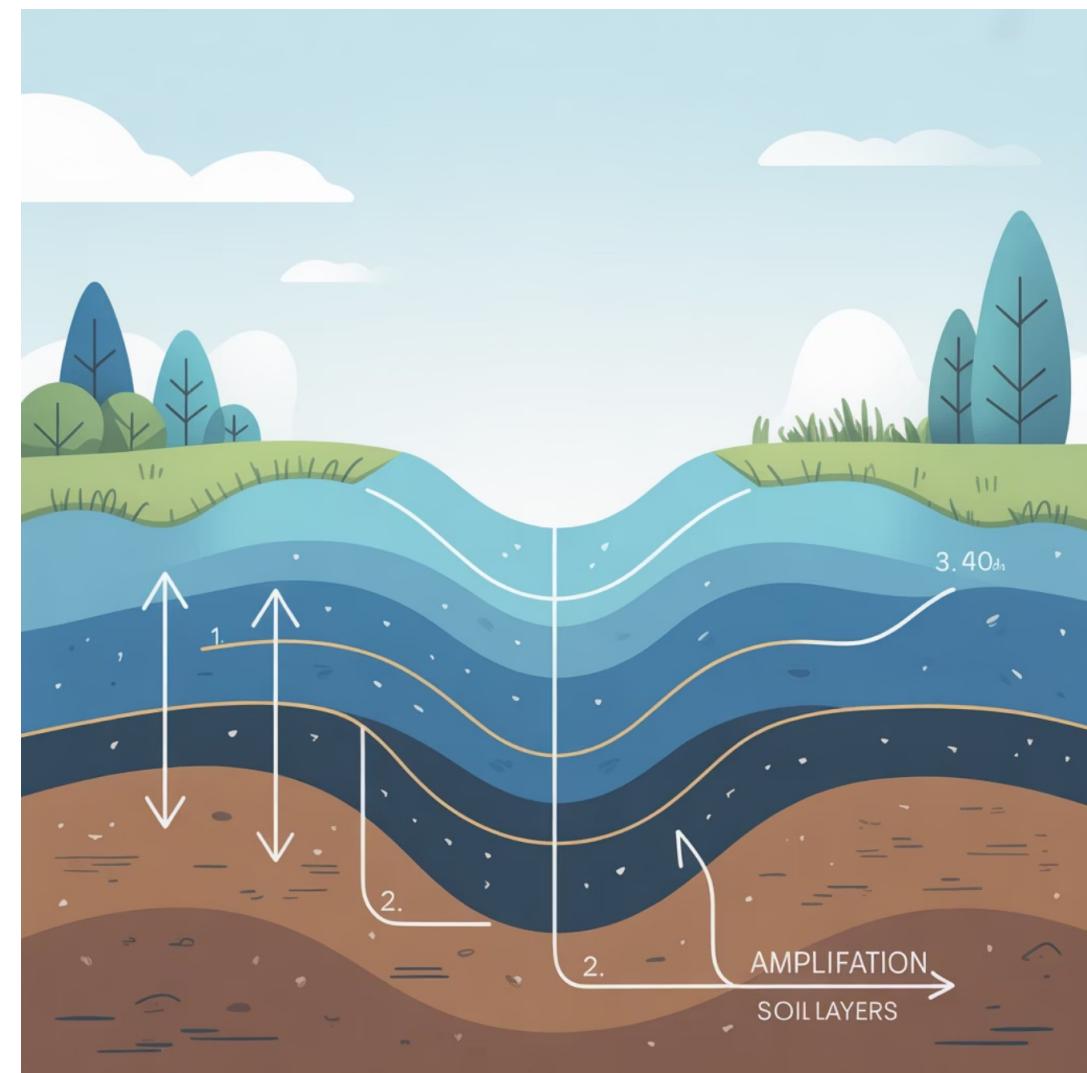
Скоростная структура геологической среды оказывает определяющее влияние на характер распространения сейсмических волн и, следовательно, на уровень сейсмического воздействия на поверхности.

## Ключевые эффекты:

- **Резонансное усиление** — когда период колебаний грунтовой толщи совпадает с периодом сейсмических волн, амплитуда колебаний может увеличиваться в 3-5 раз
- **Дисперсия волн** — различные частотные компоненты распространяются с разными скоростями, изменяя спектральный состав колебаний
- **Фокусировка энергии** — неоднородности скоростной структуры могут создавать зоны концентрации сейсмической энергии
- **Генерация поверхностных волн** — контрасты импеданса на границах слоев способствуют трансформации объемных волн в поверхностные



**Важно:** Мягкие грунты с низкими скоростями ( $V_s < 200$  м/с) могут усиливать сейсмические колебания на 50-200% по сравнению со скальными основаниями.



# Классификация грунтов по сейсмическим свойствам

1

## Категория I: Скальные грунты

$Vs \geq 800$  м/с

Магматические, метаморфические и прочные осадочные породы. Минимальное усиление сейсмических колебаний, расчетная балльность без повышения.

2

## Категория II: Полускальные грунты

$400 \leq Vs < 800$  м/с

Выветрелые скальные породы, плотные крупнообломочные и песчаные грунты. Умеренное усиление, повышение балльности на 0.5.

3

## Категория III: Мягкие грунты

$200 \leq Vs < 400$  м/с

Пески средней плотности, супеси, суглинки тугопластичной консистенции. Значительное усиление, повышение балльности на 1.0.

4

## Категория IV: Особо неблагоприятные

$Vs < 200$  м/с

Рыхлые водонасыщенные пески, мягкопластичные глинистые грунты. Максимальное усиление, повышение балльности на 1.5-2.0.

Эта классификация, закрепленная в нормативных документах (СП 14.13330), является основой для учета местных грунтовых условий при сейсмическом микрорайонировании и проектировании.

# Спектральный анализ сейсмической опасности

## Спектры ускорений

Спектр ускорений показывает максимальную реакцию осциллятора с единичной массой на сейсмическое воздействие в зависимости от его собственного периода колебаний.

### Практическое применение:

- Определение расчетных сейсмических нагрузок
- Учет динамических характеристик сооружения
- Оптимизация конструктивных решений

## Упругие vs неупругие спектры

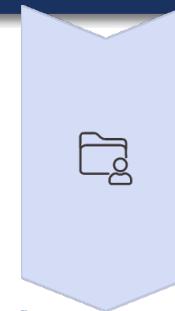
Упругие спектры предполагают линейное поведение конструкции. Неупругие (проектные) спектры учитывают способность конструкции к пластическим деформациям через коэффициент редукции R.

### Формула связи:

$$S_d = \frac{S_a}{R}$$

где  $S_d$  — проектный спектр,  $S_a$  — упругий спектр, R — коэффициент редукции (1.5-5.0).

# Современные подходы к построению карт сейсмической опасности



## Сбор и систематизация данных



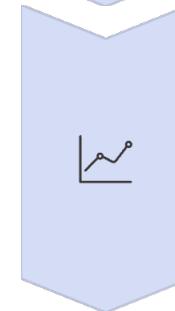
Каталоги землетрясений, геологические карты, результаты инструментальных наблюдений, палеосейсмологические данные.  
Формирование единой базы данных о сейсмичности региона за максимально длительный период.



## Выделение сейсмогенных зон



Идентификация и параметризация потенциальных источников землетрясений на основе тектонического анализа, сейсмотектонических моделей и геофизических данных о строении земной коры.



## Моделирование затухания



Использование эмпирических уравнений затухания (Ground Motion Prediction Equations - GMPE) для расчета параметров колебаний грунта на заданном расстоянии от очага землетрясения.



## Вероятностный расчет



Интегрирование по всем возможным источникам и магнитудам с учетом их вероятностей. Построение кривых превышения для различных периодов повторяемости (475, 975, 2475 лет).

# Учет локальных условий: сейсмическое микрорайонирование

## Цели и задачи

Сейсмическое микрорайонирование (СМР) уточняет общую сейсмическую опасность территории с учетом локальных инженерно-геологических и гидрогеологических условий. Масштаб работ обычно составляет 1:25000 — 1:10000 для городских территорий.

### Основные факторы учета:

- Скоростная структура грунтовой толщи
- Рельеф коренных пород и дневной поверхности
- Положение уровня грунтовых вод
- Физико-механические свойства грунтов
- Наличие карстовых полостей и оползневых зон



## Методы выполнения СМР

1. **Инструментальные методы** — регистрация слабых землетрясений и взрывов, микросейсмическое зондирование
2. **Расчетные методы** — численное моделирование распространения сейсмических волн в слоистой среде
3. **Комбинированные методы** — сочетание инструментальных наблюдений с математическим моделированием

Результатом СМР являются карты сейсмического микрорайонирования с выделением зон различной балльности, которые используются для градостроительного планирования и проектирования.

# Численное моделирование сейсмических воздействий



## Одномерные модели

Используются для расчета усиления сейсмических колебаний в горизонтально-слоистой среде. Метод эквивалентной линеаризации и нелинейный анализ во временной области.

**Программы:** SHAKE, DEEPSOIL, STRATA



## Двумерные модели

Позволяют учесть влияние рельефа дневной поверхности и коренных пород, наклонные границы слоев, латеральные неоднородности грунтовой толщи.

**Методы:** Конечные элементы, спектральные элементы



## Трехмерные модели

Наиболее точное моделирование с учетом всех пространственных особенностей геологической среды. Требуют значительных вычислительных ресурсов.

**Применение:** Крупные города, особо важные объекты

Современные вычислительные мощности позволяют проводить детальное трехмерное моделирование распространения сейсмических волн для территорий мегаполисов с учетом реальной скоростной структуры осадочного чехла и кристаллического фундамента.

# Практическое применение в сейсмостойком проектировании

## Расчет сейсмических нагрузок

Использование спектров ускорений и скоростей для определения расчетных сейсмических сил. Учет категории грунтов, периода собственных колебаний здания, коэффициента конструктивной схемы.

Интеграция результатов оценки сейсмической опасности с учетом скоростных характеристик грунтов в процесс проектирования позволяет создавать безопасные и экономически эффективные конструктивные решения для сейсмически активных регионов.

## Системы сейсмоизоляции

Применение опорных частей с низкой горизонтальной жесткостью для увеличения периода колебаний здания и выведения его из резонансной зоны спектра воздействий.

## Мониторинг и верификация

Установка систем сейсмометрического контроля для регистрации реального поведения сооружений при землетрясениях и уточнения расчетных моделей.

# Выводы и перспективы развития

## Ключевые положения

- Скорости сейсмических волн — фундаментальный параметр для оценки сейсмической опасности и локальных эффектов усиления колебаний
- Классификация грунтов по скоростям  $V_s$  обеспечивает объективную основу для учета местных условий в проектировании
- Спектральный подход позволяет связать характеристики сейсмического воздействия с динамическими свойствами сооружений
- Численное моделирование открывает возможности детального прогноза сейсмических воздействий для конкретных площадок

## Направления исследований

- Развитие методов высокоразрешающей сейсмической томографии для построения детальных скоростных моделей
- Совершенствование уравнений затухания с учетом нелинейного поведения грунтов
- Создание региональных баз данных параметров сильных движений
- Интеграция методов машинного обучения для анализа больших объемов сейсмологических данных

Комплексный подход к оценке сейсмической опасности с использованием современных методов измерения скоростей, численного моделирования и вероятностного анализа является основой обеспечения сейсмической безопасности застройки и критически важной инфраструктуры.