

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– 5

На тему «Инженерный анализ последствий землетрясений»

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

# Природа сейсмических воздействий

## Механизм землетрясений

Землетрясения представляют собой внезапное высвобождение энергии в земной коре, вызванное движением тектонических плит. Этот процесс генерирует сейсмические волны, распространяющиеся через земную толщу и достигающие поверхности. Понимание механизма возникновения землетрясений критически важно для прогнозирования их воздействия на строительные конструкции.

Существует три основных типа тектонических границ: конвергентные (ближающиеся), дивергентные (расходящиеся) и трансформные (сдвиговые). Наиболее разрушительные землетрясения обычно происходят на конвергентных границах, где одна плита подныривает под другую в процессе субдукции.

## Типы сейсмических волн

- **P-волны** (продольные): самые быстрые волны, распространяются через твердые породы и жидкости
- **S-волны** (поперечные): медленнее P-волн, проходят только через твердые материалы
- **Поверхностные волны**: Love и Rayleigh волны, самые разрушительные для зданий

Каждый тип волн оказывает специфическое воздействие на строительные конструкции, что необходимо учитывать при сейсмостойком проектировании.

# Параметры оценки сейсмичности

## Магнитуда

Шкала Рихтера и моментная магнитуда ( $M_w$ ) измеряют энергию, высвобожденную в очаге землетрясения. Каждое увеличение на единицу соответствует 31,6-кратному увеличению энергии.

- $M < 3.0$ : микроземлетрясения
- $M 3.0-5.0$ : слабые толчки
- $M 5.0-7.0$ : умеренные до сильных
- $M > 7.0$ : крупные землетрясения

## Интенсивность

Шкалы MSK-64 и EMS-98 описывают воздействие на людей, здания и природную среду. В отличие от магнитуды, интенсивность варьируется в зависимости от расстояния до эпицентра и местных грунтовых условий.

- I-IV: не ощущается или слабо
- V-VI: повреждения слабых зданий
- VII-VIII: серьезные повреждения
- IX-XII: массовые разрушения

## Ускорение грунта

Пиковое ускорение грунта (PGA) измеряется как доля от ускорения свободного падения ( $g$ ). Это ключевой параметр для расчета сейсмических нагрузок на конструкции.

- $PGA < 0.05g$ : минимальные повреждения
- $PGA 0.05-0.15g$ : легкие повреждения
- $PGA 0.15-0.30g$ : средние повреждения
- $PGA > 0.30g$ : тяжелые разрушения

Правильная оценка этих параметров позволяет инженерам определить сейсмическую опасность региона и разработать соответствующие проектные решения. Современные нормативы требуют учета всех трех параметров при проектировании зданий в сейсмоопасных зонах.

# Типология повреждений зданий

01

## Повреждения несущих конструкций

Трешины в колоннах, балках и стенах; разрушение узлов соединений; потеря несущей способности

03

## Повреждения ограждающих конструкций

Выпадение заполнения; повреждение фасадных панелей; разрушение перегородок

Классификация повреждений по степени тяжести согласно европейским стандартам включает пять категорий: от незначительных (Grade 1) до полного обрушения (Grade 5). Каждая категория характеризуется специфическими признаками, требованиями к ремонту и оценкой остаточной несущей способности.

Особое внимание уделяется выявлению скрытых повреждений, которые могут не проявляться визуально, но существенно снижают безопасность конструкции. К таким повреждениям относятся внутренние трещины в бетоне, остаточные деформации арматуры и ослабление соединений.

02

## Деформации каркаса

Остаточные горизонтальные смещения этажей; наклон здания; эффект «мягкого этажа»

04

## Повреждения фундаментов

Неравномерные осадки; трещины в фундаментных конструкциях; разжижение грунта

**Критически важно:** Послеаварийное обследование должно проводиться квалифицированными специалистами с использованием инструментальных методов диагностики.

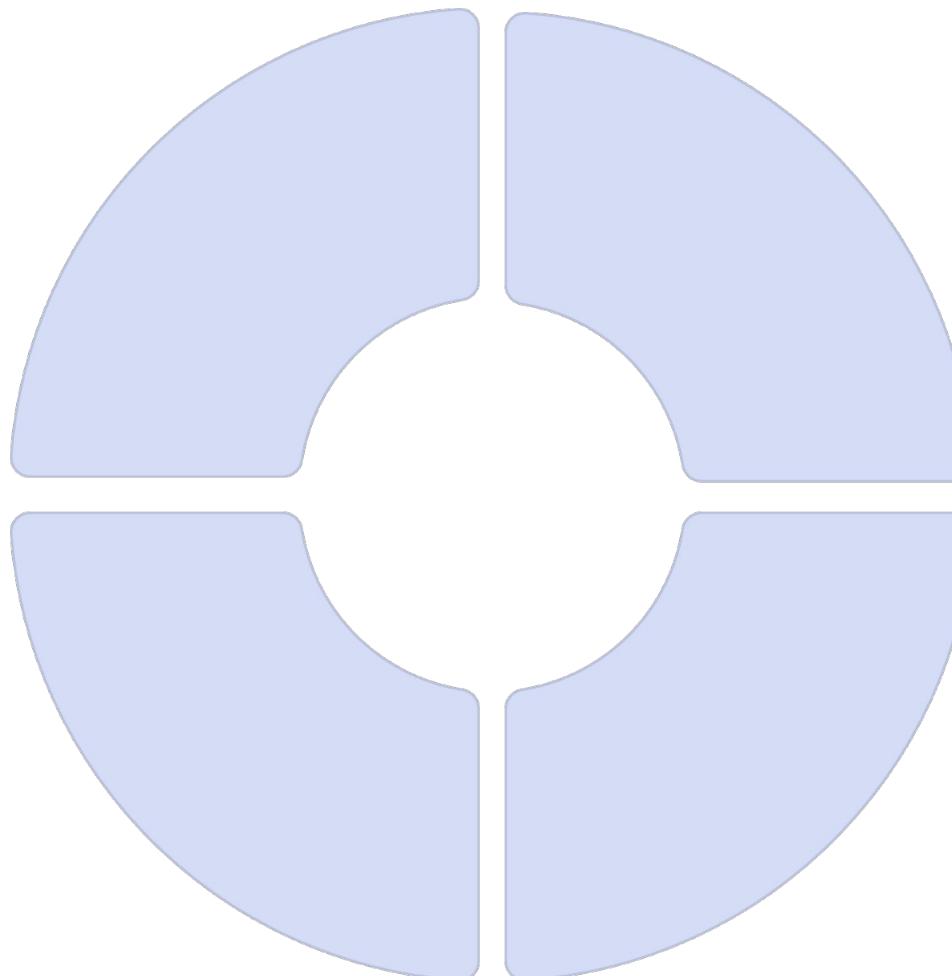
# Факторы, влияющие на степень разрушений

## Характеристики воздействия

- Магнитуда и интенсивность
- Длительность колебаний
- Частотный состав
- Направленность воздействия

## Проектные решения

- Планировочная схема
- Регулярность конструкций
- Соотношение размеров
- Детали соединений



## Грунтовые условия

- Тип и плотность грунта
- Эффект резонанса
- Риск разжижения
- Топография участка

## Конструктивная система

- Тип конструкции
- Жесткость и пластичность
- Динамические характеристики
- Качество строительства

Взаимодействие этих факторов определяет сейсмическое поведение здания. Например, мягкие грунты могут усиливать сейсмические колебания в 3-5 раз по сравнению с скальными основаниями. Резонансные эффекты возникают, когда период собственных колебаний здания совпадает с преобладающим периодом грунтовых колебаний, что приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний и возможным катастрофическим повреждениям.

# Методы инженерного обследования

## Визуальное обследование



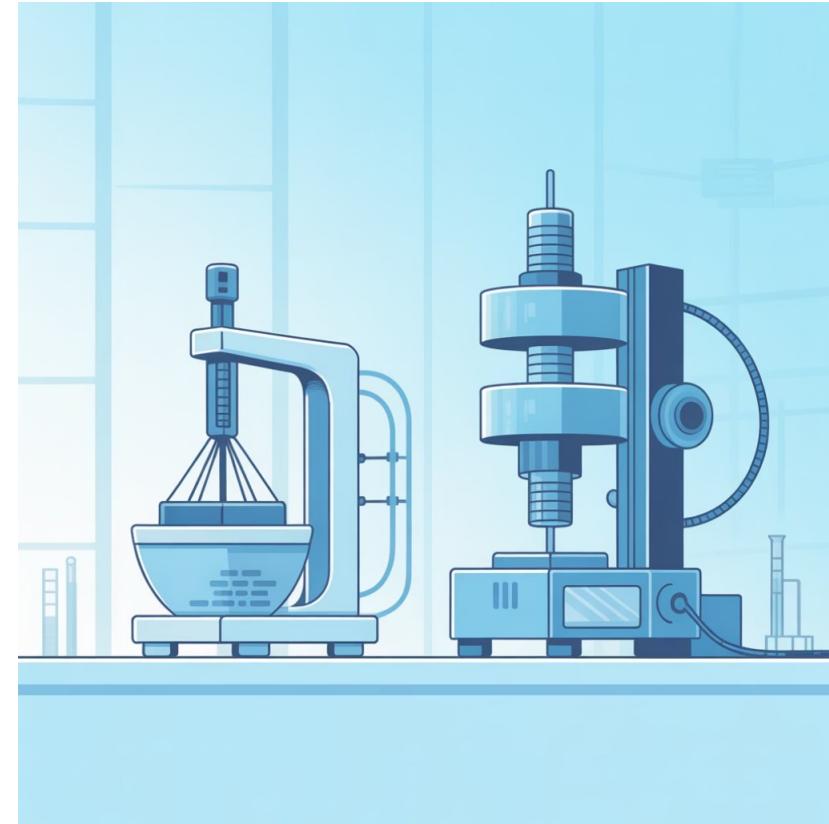
Первичная оценка повреждений включает детальный осмотр всех конструктивных элементов, фиксацию трещин, деформаций и разрушений. Инженеры используют стандартизованные формы для документирования повреждений и составления предварительного заключения о безопасности здания.



### Срочная оценка

0-48 часов после события

## Инструментальные методы



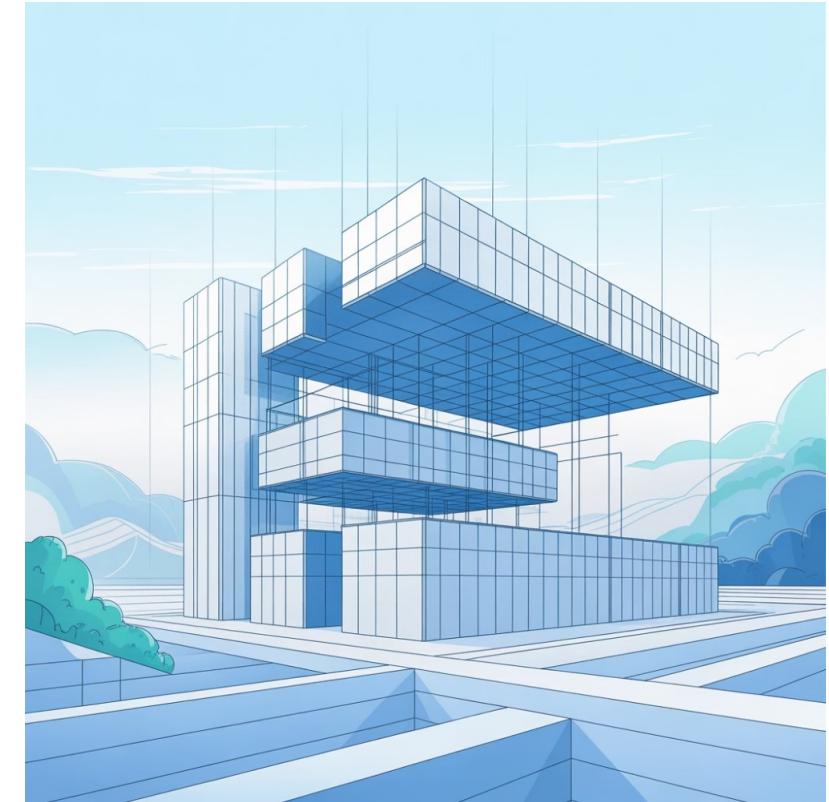
Неразрушающий контроль включает ультразвуковое тестирование, георадар, инфракрасную термографию и динамические испытания. Эти методы позволяют оценить внутреннее состояние конструкций без их разрушения и выявить скрытые дефекты.



### Детальное обследование

1-2 недели после землетрясения

## Расчетный анализ



Численное моделирование с использованием метода конечных элементов позволяет оценить остаточную несущую способность поврежденных конструкций и спрогнозировать их поведение при повторных сейсмических воздействиях.



### Проектирование усиления

Разработка решений по восстановлению

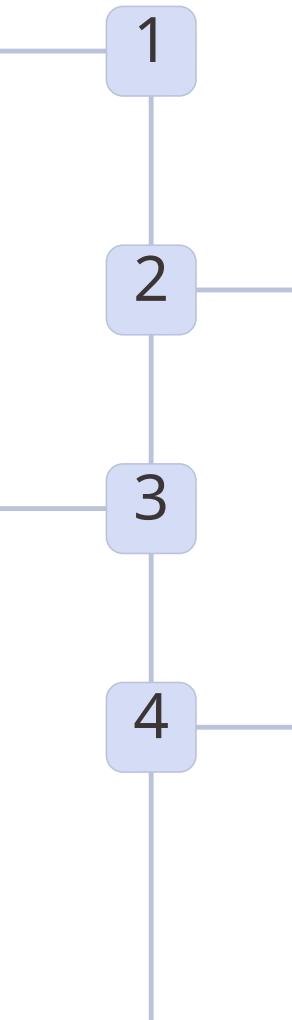
# Анализ реальных случаев разрушений

## Землетрясение в Нортриdge (1994)

М=6.7, Калифорния. Выявило уязвимость стальных каркасов с жесткими узлами. Привело к пересмотру норм проектирования стальных конструкций и разработке новых типов соединений.

## Землетрясение в Чили (2010)

М=8.8. Показало эффективность современных норм сейсмостойкого проектирования. Несмотря на огромную магнитуду, количество обрушений было относительно невелико.



## Землетрясение в Кобе (1995)

М=6.9, Япония. Продемонстрировало важность сейсмоизоляции и необходимость модернизации старых зданий. Более 100 000 зданий были повреждены или разрушены.

## Землетрясение в Кентербери (2011)

М=6.3, Новая Зеландия. Разрушение центра Крайстчерча привело к разработке новых подходов к оценке сейсмической уязвимости каменной кладки.

Анализ последствий этих землетрясений позволил идентифицировать типичные уязвимости различных конструктивных систем и разработать улучшенные методы проектирования. Каждое крупное землетрясение становится источником ценных данных для совершенствования строительных норм и практики проектирования сейсмостойких зданий.

# Современные технологии сейсмозащиты

## Сеймоизоляция

Специальные опорные части между фундаментом и надземной частью здания значительно снижают передачу сейсмических колебаний на конструкции. Эффективность достигает 70-80% снижения ускорений.

## Демпфирующие устройства

Системы активного и пассивного демпфирования поглощают сейсмическую энергию, снижая амплитуду колебаний здания. Включают вязкие, фрикционные и металлические демпферы.

## Конструктивные решения

Специальное армирование критических зон, использование высокопрочных материалов и продуманные детали соединений обеспечивают пластичность и предотвращают хрупкое разрушение.

## Принципы сейсмостойкого проектирования

**Регулярность планировки:** симметричное расположение несущих элементов и масс

- Избыточность:** наличие альтернативных путей передачи нагрузок
- Пластичность:** способность к значительным деформациям без разрушения
- Связность:** надежные соединения всех элементов конструкции

## Расчетная философия

Современный подход основан на многоуровневой защите: при слабых землетрясениях здание не должно иметь повреждений, при умеренных допускаются ремонтируемые повреждения, при сильных предотвращается обрушение и сохраняются жизни людей.

# Усиление существующих зданий



## Железобетонные рубашки

Увеличение сечений колонн и балок путем добавления нового бетона и арматуры. Повышает прочность и жесткость конструкций на 40-60%.



## Композитные материалы

Обертывание элементов углеволокном (CFRP) или стеклопластиком. Увеличивает пластичность и предотвращает хрупкое разрушение при минимальном изменении размеров.



## Стальные связи

Установка дополнительных стальных диагональных элементов в каркас здания. Эффективно повышает жесткость и прочность при относительно низкой стоимости.



## Новые стены жесткости

Добавление железобетонных или стальных стен между существующими колоннами. Существенно улучшает сейсмическое поведение каркасных зданий.



Выбор метода усиления зависит от типа конструкции, степени дефицита сейсмостойкости, технических ограничений и экономических факторов. Часто применяется комбинация различных методов для достижения требуемого уровня сейсмической безопасности. Важно учитывать, что усиление должно быть комплексным и охватывать все критические элементы конструктивной системы.

# Нормативная база и расчетные требования

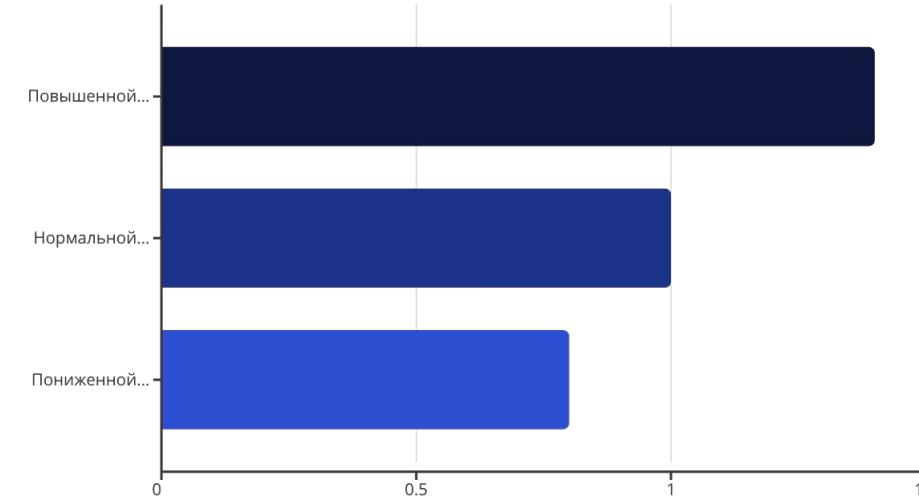
## Основные нормативные документы

В России сейсмостойкое проектирование регламентируется СП 14.13330 «Строительство в сейсмических районах», который устанавливает требования к расчету и конструированию зданий в зависимости от сейсмичности площадки строительства (6, 7, 8, 9 баллов).

Международный стандарт Еврокод 8 (EN 1998) определяет подход на основе спектрального анализа и коэффициента поведения конструкции, отражающего ее способность к пластическому деформированию. Американские нормы ASCE 7 и IBC применяют концепцию категорий сейсмостойкости и детализированные требования к конструктивным системам.

## Карты сейсмического районирования

Общее сейсмическое районирование (ОСР) России определяет базовые параметры сейсмической опасности для всей территории страны. Детальное сейсмическое микрорайонирование (СМР) учитывает влияние местных грунтовых условий и топографии на интенсивность колебаний.



### □ Важное замечание

Коэффициент надежности по ответственности корректирует расчетные сейсмические нагрузки в зависимости от класса ответственности здания.

01

### Определение сейсмичности

Анализ карт ОСР и проведение СМР

02

### Выбор расчетной модели

Спектральный или динамический анализ

03

### Расчет конструкций

Определение усилий и деформаций

04

### Проверка критериев

Прочность, жесткость, пластичность

05

### Конструктивные меры

Детализация узлов и соединений

# Выводы и перспективы развития

## Ключевые положения

- Инженерный анализ последствий землетрясений является основой для совершенствования методов сейсмостойкого проектирования
- Комплексный подход, включающий визуальное обследование, инструментальную диагностику и численное моделирование, обеспечивает достоверную оценку повреждений
- Изучение реальных случаев разрушений позволяет выявить слабые места конструктивных систем и разработать эффективные решения по их устранению
- Современные технологии сейсмозащиты значительно повышают безопасность зданий в сейсмоопасных регионах

## Направления развития

- **Искусственный интеллект:** применение машинного обучения для автоматической оценки повреждений по фотографиям и видео
- **BIM-технологии:** интеграция данных о сейсмостойкости в информационные модели зданий на всех этапах жизненного цикла
- **Умные конструкции:** разработка адаптивных систем с датчиками и актуаторами для активного контроля сейсмического отклика
- **Новые материалы:** использование материалов с памятью формы, самозалечивающегося бетона и высокоеффективных композитов

Будущее сейсмостойкого строительства связано с интеграцией передовых технологий проектирования, новых материалов и систем мониторинга. Развитие вычислительных мощностей позволяет проводить все более точное моделирование сейсмического поведения сложных конструкций. Междисциплинарное сотрудничество инженеров, сейсмологов, геотехников и специалистов по материалам обеспечивает комплексный подход к повышению сейсмической безопасности зданий и сооружений.

«Землетрясения не убивают людей — убивают здания. Наша задача как инженеров — проектировать и строить сооружения, которые сохранят жизни при любых сейсмических воздействиях.»

