

Сейсмичность

Землетрясения – колебания Земли, вызванные внезапным освобождением потенциальной энергии земных недр.

Землетрясения вызываются тектоническими силами, приводящими к накоплению напряжений. Освобождение энергии сопровождается разрывом и обратимыми деформациями, которые распространяются в виде упругих колебаний.

Последние вызывают деформации земной коры: разломы, трещины, сбросы, сдвиги и т. п. и разрушение сооружений.

В России более 20 млн. человек постоянно испытывают угрозу разрушительных землетрясений.

Классификация землетрясений в зависимости от вызывающих их причин

Классификация землетрясений		
Тип землетрясения	Процент от общего числа	Диапазон магнитуд
Тектонические	Около 95%	До 9
Вулканические	До 5%	До 8
Обвальные (денудационные)	Менее 1%	Не более 5
Техногенные (антропогенные)	Менее 0.1%	Известны до 5

Разрывы, образовавшиеся при Гоби-Алтайском землетрясении 4 декабря 1957 (Монголия)

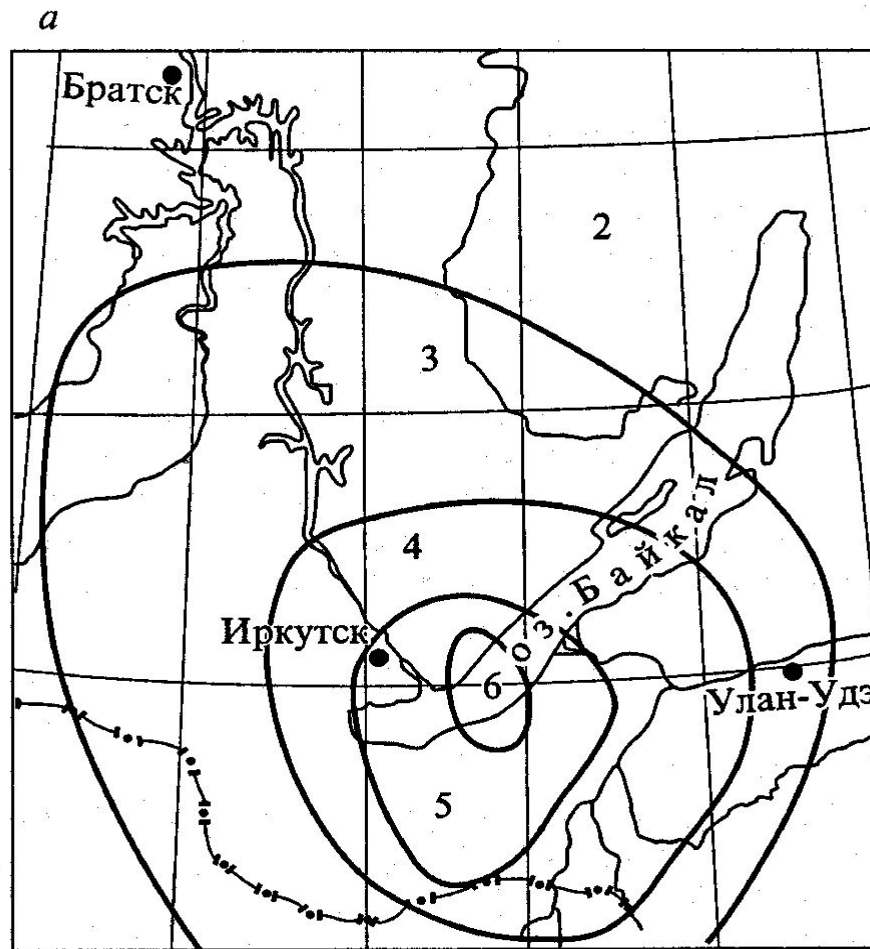


Землетрясения

- Область, где возникает процесс разрушения, называют очагом, гипоцентром, а проекция очага на поверхность – эпицентром. Область на поверхности Земли, где наблюдаются сейсмодетформации, называется плейстосейстовой областью.
- Ежегодно происходит около миллиона землетрясений и только 1 землетрясение с магнитудой $M > 8$ баллов.
- Поверхностные (мелкофокусные) – на глубине до 70 км
- Среднефокусные – на глубине от 70 до 300 км
- Глубокофокусные – глубже 300 км.
- До сих пор не было зарегистрировано ни одного землетрясения с очагом глубже 720 км.

Схема изосейст землетрясения в Байкальской рифтовой зоне (1981г.)

Цифры – интенсивность землетрясения в баллах



б

Сейсмические волны

- В результате землетрясения от очага распространяются волны:
- - продольные (объёмные сжатия-растяжения, во всех средах), Р-волны
- - поперечные (сдвиговые, изменение формы, только в твердых), S-волны
- - поверхностные: волны Релея и Лява, L-волны
- В скальных грунтах отношение скорости продольных волн к скорости поперечных составляет 1,73
- Параметры волн: скорость распространения – V м/с, длина волны – λ м, амплитуда колебаний – A мм, период колебаний – T с, частота – f 1/с(герц).

$$\lambda = VT, T = 1/f$$

Распространение землетрясений

- Землетрясения связаны с участками земной коры, в которых проявляются новейшие дифференцированные тектонические движения.
- Два главных сейсмических пояса мира — Средиземноморский, простирающийся от берегов Португалии до Малайского архипелага (коллизия Евроазиатской плиты с Индийской, Аравийской и Африканской плитами), и Тихоокеанский, кольцом охватывающий берега Тихого океана и связанный с системой глубокофокусных желобов (обусловлен субдукцией).
- В пределах материков эпиплатформенные орогены типа Тянь-Шаня и рифты Восточной Африки, Красного моря, Байкальской системы и др.
- В пределах океанов сейсмической активностью отличаются срединноокеанические хребты.

Разрушительные землетрясения

- 17 тыс. лет назад мощное землетрясение оторвало от нынешней Турции остров Самос.
- 11 тыс. лет назад землетрясение прорвало Босфор и в Черное море хлынула вода, затопив прибрежные села и города.
- 1455 год. Италия, Неаполь. Общее число жертв – 40 тысяч человек.
- 1556 год. В китайской провинции Шэньси землетрясением вызвано множество оползней и обвалов. Погибло 830 тысяч человек.
- 1737 год – Калькутта (Индия) - 300 тыс. погибших.
- 1755 год. Разрушен Лиссабон. Число жертв – около 60 тысяч.
- 1908 год. Сильное землетрясение в районе Мессинского пролива (Италия) разрушило город Мессину и унесло 120 тысяч жизней
- 1920 год – землетрясение в Китае (провинция Ганьсу) вызвало оползни. Погибло около 200 тысяч человек.
- 1923 год. Район Токио оказался в зоне землетрясения. Огромный ущерб нанесли пожары и цунами. Количество жертв 143 тысяч человек
- 1948 год – Ашхабад (Туркмения); до 100 тыс. погибших
- 1975 год. В провинции Ляонин (Китай) при сильном землетрясении (предсказанное) число жертв составило всего несколько десятков человек. Данный случай исключительный.
- 1976 год. Землетрясением был разрушен город Таншан и ряд поселков. Погибло около 650 тысяч человек.
- 1988 год. Спитак (Армения) - 25 тыс. погибших.
- 1990 год. Западный Иран - 40-50 тыс. погибших
- 1995 год. Север о. Сахалин. $M = 7,7$. По шкале MSK - 9 баллов. Разрушен г. Нефтегорск, 2 тыс. погибших
- 2003 год. Горный Алтай. Один удар за другим. 8,4, снова 8 баллов.

Оценка силы землетрясений

- Показатели силы землетрясений:
- в очаге – энергия землетрясения $E_{дж}$, энергетический класс $K = \log E$, магнитуда M
- на поверхности – интенсивность проявления землетрясения в баллах I_0 , шкала MSK
- Период повторяемости
- Количество землетрясений на $1000 \text{ км}^2/\text{год}$
- Важной характеристикой для оценки устойчивости сооружений является сейсмическое ускорение $a = A - 4\pi^2/T^2$

Магнитуда землетрясений

(Ч.Рихтер, «Элементарная сейсмология», 1958)

- Магнитуда землетрясений величина относительная. Шкала магнитуд определяет землетрясение стандартного масштаба и оценивает другие землетрясения по их максимальным амплитудам относительно этого стандартного масштаба при идентичных условиях наблюдения.
 - $M = \lg[A(\Delta)/A_0(\Delta)] = \lg A(\Delta) - \lg A_0(\Delta)$
- где Δ – эпицентральный расстояние, A_0 и A – максимальные амплитуды записи на определенном сейсмографе для стандартного и измеряемого землетрясения соответственно.
- Стандартное землетрясение, отвечающее значению $M = \lg 1 = 0$ в формуле Рихтера, это землетрясение, при котором максимальная амплитуда записи на сейсмографе Вуда-Андерсона равна 1мм на расстоянии $\Delta = 100$ км.

Энергетическая классификация землетрясений

Магнитуда (M или m) землетрясений –

введена Б. Гуттенбергом и Ч. Рихтером.

Для расчета M используется эмпирический закон изменения максимальной амплитуды сейсмической волны (A) или скорости колебания (A/T) с эпицентральной расстоянием (Δ), т.е. расстоянием до эпицентра.

Калибровочная функция:

$\sigma(\Delta) : M = \lg A + \sigma A(\Delta)$ или $M = \lg A/T + \sigma A/T(\Delta)$, где T – период волны.

Максимально известное значение M приближается к 9.

За год на земном шаре в среднем происходит землетрясений:

1 - с Магнитудой ≥ 8 ;

10 - с Магнитудой = 7 – 7,9;

100 - с Магнитудой = 6 – 6,9;

1000 - с Магнитудой = 5 -5,9;

10 000 – с Магнитудой = 4 – 4,9

Для перехода от M землетрясения к энергии (E) сейсмических волн обычно пользуются соотношением:

$\lg E = 11,8 + 1,5 M$ (Гуттенберг, Рихтер, 1961)

$\log E = K = 1,5M + 4,6$ (для Дальнего Востока)

Связь между магнитудой, энергией землетрясения и классом

- В России для классификации землетрясений на близких расстояниях (до 1000 км) широко применяют **шкалу энергетических классов (К)**.
- Под классом понимается логарифм энергии (в Дж) сейсмических волн, прошедших через окружающую очаг референц-сферу радиусом 10 км (в таком понимании класс представляет собой разновидность магнитуды).
- **$K = 15 E = 10^{15}$ Дж, или 10^{22} эрг.**
- **Значения К определяются с помощью специальной номограммы по сумме амплитуд волн Р и S.**
- Связь между энергетическим классом и магнитудой выражается зависимостью:
 $\lg E = 11,8 + 1,5 M$ (Гуттенберг, Рихтер, 1961)
 $\log E = K = 1,5M + 4,6$ (для Дальнего Востока)
- При увеличении магнитуды на 2 сейсмическая энергия землетрясения возрастает в 1000 раз
- Соотношение между балльностью I_0 и магнитудой в зависимости от глубины h очаговой зоны определяется формулой:
- **$I_0 = 1,5M - 3,5lgh + 3,$**

- Ежегодно в среднем на Земле через землетрясения освобождается порядка **1019 Дж** потенциальной тектонической энергии, которая, в конечном счете, идет на разрушение горных пород и их нагрев. Это соответствует **0,01 %** тепловой энергии, излучаемой Землей в космическое пространство.
- На главный пояс сейсмичности Земли, который узкой полосой обрамляет Тихий океан и связан с системой глубокофокусных желобов (в том числе Курило-Камчатским) приходится **около 80 % мировой сейсмической энергии.**
- Предельно высокая сейсмичность в этой области вызвана подвигом холодной океанической литосферы под материки, окружающие океан и окраинные моря.

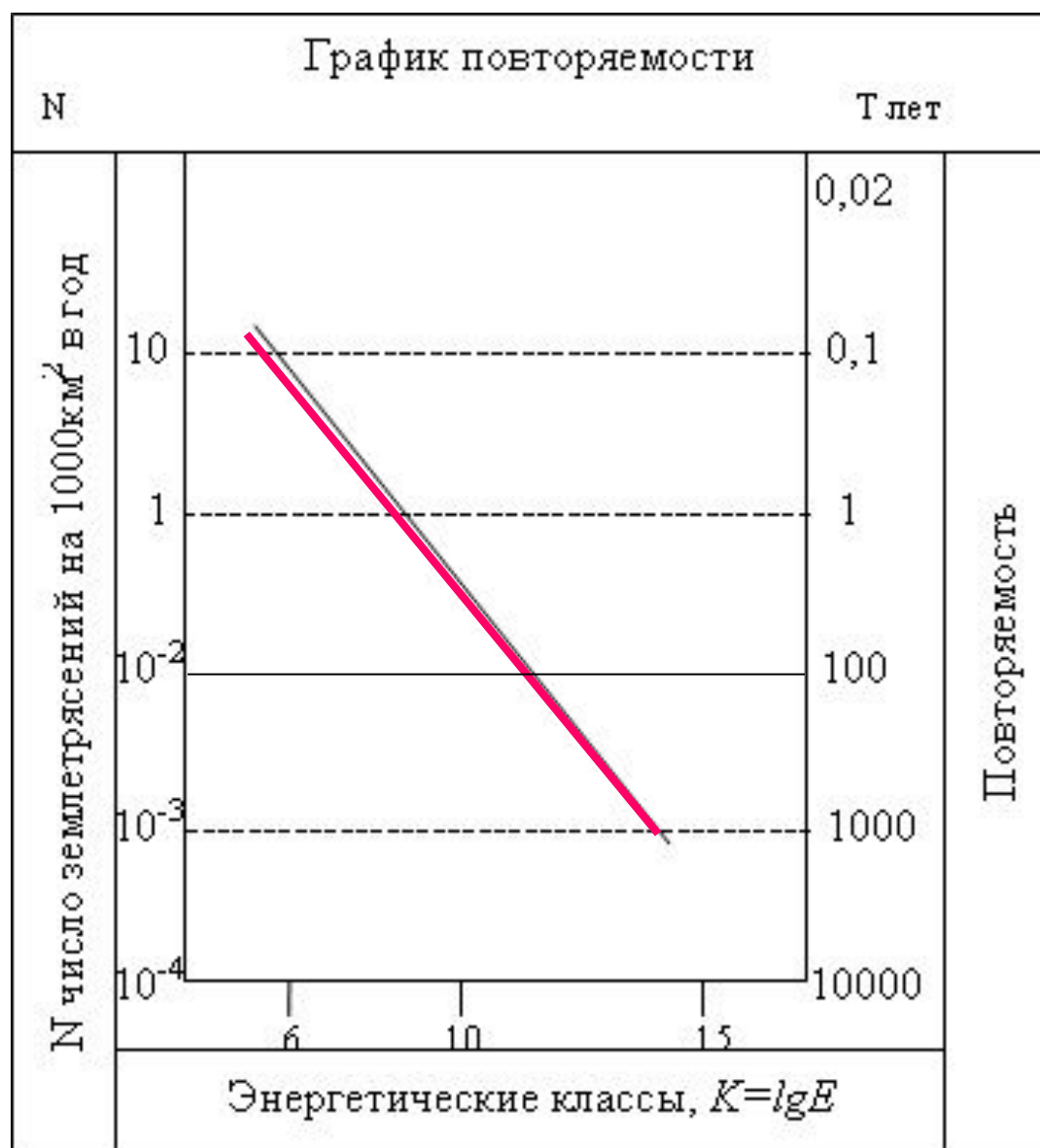
Сопоставление сейсмического ускорения a с интенсивностью землетрясений I в баллах

- | Балл | Сейсмическое ускорение a | K_c |
|------|----------------------------|-------|
| • 4 | $< 0.01g$ | |
| • 5 | $0.025g$ | |
| • 6 | $0.025-0.05g$ | |
| • 7 | $0.05-0.1g$ | |
| • 8 | $0.1-0.2g$ | |
| • 9 | $0.2-0.4g$ | |
| • 10 | $>0.4g$ | |
- Сейсмическое ускорение $a = \mathbf{A4\pi^2/T^2}$ мм/с²,
где \mathbf{A} – амплитуда колебаний, мм, \mathbf{T} – период колебаний, с.

Коэффициентом сейсмичности называется отношение величины сейсмического ускорения к ускорению свободного падения:

$$K_c = a/g$$

График повторяемости



Шкалы интенсивности землетрясений

Сопоставление наиболее часто используемых сейсмических шкал
(по Н.В. Шебалину)

Шкала Росси-Фореля

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Шкалы типа Меркалли - Канкани – Зиберга
шкала MSK- 64 Медведева – Шпонхойера - Карника

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

Шкала Японского Метеорологического Агентства

0	1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---	---

Шкала интенсивности землетрясений

Баллы	Краткая характеристика (по С.В. Медведеву)
I	Колебания почвы отмечаются приборами.
II	Ощущаются в отдельных случаях людьми, находящимися в спокойном состоянии.
III	Колебания отмечаются немногими людьми
IV	Колебания отмечаются многими людьми. Возможно дребезжание стекол.
V	Качание висячих предметов, многие спящие просыпаются.
VI	Легкие повреждения в зданиях.
VII	Трещины в штукатурке и откалывание отдельных кусков, тонкие трещины в стенах
VIII	Большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб.
IX	В некоторых здания обвалы – обрушение стен, перекрытий, кровли.
X	Обвалы во многих зданиях. Трещины в грунтах шириной до 1 м.
XI	Многочисленные трещины на поверхности земли, большие обвалы в горах.
XII	Значительные изменения рельефа.

Признаки определения балльности

- 1. Виды повреждения сооружений
- 2. Сейсмодеформации на поверхности Земли
- 3. Ощущения людей

Сейсмическое районирование

Сейсмическое районирование проводится на основе оценки и картирования ожидаемого поверхностного эффекта землетрясений в заданном регионе и состоит в деления территории на районы с различной степенью интенсивности ожидаемых землетрясений.

Выполняется

общее сейсмическое районирование (ОСР).

детальное сейсмическое районирование (ДСР).

сейсмическое микрорайонирование (СМР).

Основное различие между ОСР, ДСР и СМР заключается не в масштабе картирования, а в объектах исследования: при ОСР и ДСР изучаются источники сейсмических колебаний, а при СМР – реакция среды на эти колебания.

Общее сейсмическое районирование

Карта общего сейсмического районирования (ОСР) составляется для всей территории страны в масштабе 1:5 000 000. Для ее составления используются исторические данные и инструментальные наблюдения за землетрясениями, геолого-тектонические и геофизические карты, данные о движении блоков земной коры.

На картах ОСР выделены территории, на которых степень сейсмической опасности для объектов разных сроков службы и категорий ответственности выражена расчетной интенсивностью I_0 сейсмических сотрясений в баллах шкалы MSK – 64, ожидаемых на данной площади с заданной вероятностью p (%) в течение определенного интервала времени t , причем расчетная интенсивность сотрясений отнесена к средним грунтовым условиям (II категории по СНИП).

К средним относятся необводненные песчано-глинистые и гравелистые грунты.

Карты ОСР-97

- Карта ОСР-97-А отражает 10%-ную вероятность возникновения в течение 50 лет в любом пункте зоны сотрясения, интенсивность которого равна значению балла, указанному на карте для данной зоны, либо превышает это значение. Это соответствует повторяемости такого сотрясения 1 раз в 500 лет.
- – Карта ОСР-97-В отражает 5%-ную вероятность возникновения в течение 50 лет в любом пункте зоны сотрясения, интенсивность которого равна значению балла, указанному на карте для данной зоны, либо превышает это значение. Это соответствует повторяемости такого сотрясения 1 раз в 1000 лет.
- – Карта ОСР-97-С отражает 1%-ную вероятность возникновения в течение 50 лет в любом пункте зоны сотрясения, интенсивность которого равна значению балла, указанному на карте для данной зоны, либо превышает это значение. Это соответствует повторяемости такого сотрясения 1 раз в 5000 лет.

Рекомендуемые объекты строительства

- **Карта А (10%).** Массовое строительство жилых, общественных и производственных зданий (сооружений).
- **Карта В (5%),** Объекты повышенной ответственности:
 - – здания и сооружения, эксплуатация которых необходима при землетрясении или при ликвидации его последствий (системы энерго- и водоснабжения, пожарные депо, сооружения связи и т.п.);
 - – здания с одновременным пребыванием в них большого числа людей (вокзалы, аэропорты, театры, цирки, концертные залы, крытые рынки, спортивные сооружения);
 - – больницы, школы, дошкольные учреждения; здания высотой более 16 этажей;
 - – другие здания и сооружения, отказы которых могут привести к тяжелым экономическим, социальным, экологическим последствиям.
- **Карта С (1%).** Особо ответственные объекты - атомные станции, плотины и т.д.

Сейсмическое микрорайонирование

Карта сейсмического микрорайонирования составляется в масштабе 1:5 000 – 1:25 000 для оценки степени сейсмической опасности застраиваемых территорий. Основная задача – определение приращения балльности в зависимости от грунтово-гидрогеологических условий.

Факторы, влияющие на проявление сейсмичности на поверхности:

Породы	приращение балльности
граниты	0
известняки, песчаники	0,2-1,3
гипсы, мергели, сланцы	0,6-1,4
галечники, гравий	1-1,6
пески, лессы	1,2-1,8
глинистые грунты	1,2-2,1
насыпные грунты	2,3-3
обводненные рыхлые отложения	1,7-2,8
заболоченные участки	3,3-3,9
Глубина залегания грунтовых вод	
0-1 м	1
1-5 м	0,5
>10 м	0

Сейсмическое микрорайонирование

Приращение балльности зависит от строения разреза (тонкий рыхлый слой на крепких породах и т.п.), от рельефа (на вершинах гор амплитуда колебаний больше, чем у подножья), от наличия геологических процессов (подготовленные оползни, обвалы).

Приращение сейсмической интенсивности ΔB :

$$\Delta B = 1,67 \lg V_0 \rho_0 / V_i \rho_i + e^{-0,04h^2} \quad (\text{С.В.Медведев, 1962})$$

$V_0 \rho_0$ – скорость распространения продольных волн и плотность (**сейсмическая жесткость**) пород, к которым отнесена балльность на карте ОСР,

$V_i \rho_i$ - то же для изучаемых пород,

h – глубина залегания грунтовых вод, м

ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

- Прогноз землетрясений включает:
пространственный — определение места землетрясения; *количественный* — расчет максимальной силы сотрясений земной поверхности, *временной* — установления времени землетрясения.
- Место – по тектоническим и геолого-структурным картам и картам ОСР,
- Сила – по картам ОСР,
- Время – по графику повторяемости, по предвестникам, по инструментальным наблюдениям за развитием деформаций в выработках, по поведению животных.

Предвестники землетрясения

К долгосрочным предвестникам относятся:

- деформации земной поверхности на большой площади;
- переориентация осей напряжений в очагах «фоновых» землетрясений, повышение или понижение микросейсмичности, возникновение предваряющих глубокофокусных толчков, изменение частотного состава сейсмических волн;
- изменения электрического сопротивления пород, вариаций теллурических токов и геомагнитного поля;

К краткосрочным предвестникам землетрясений относятся:

- вариации наклонов земной поверхности;
- флуктуации высокочастотных акустических и электромагнитных полей в приземном слое атмосферы;
- изменение уровней, температуры, химического и газового состава подземных вод

Эти изменения могут наблюдаться за несколько дней, часов и даже минут до землетрясения.

Гидрогеодеформационный мониторинг

- В 1982 году была обнаружена новая разновидность естественного поля - гидрогеодеформационное (ГГД) поле Земли (Гидрогеологический эффект Вартаняна - Куликова).
- Гидрогеологический метод, разработанный на основе этого открытия, обеспечивает слежение в режиме реального времени за происходящими изменениями напряженно-деформированного состояния земной коры, за геодинимическими процессами, предваряющими сильные землетрясения
- В качестве унифицированных показателей при ведении ГГД мониторинга применяются:
 - - уровень подземных вод;
 - - электропроводность (химический состав) и температура подземных вод;
 - - атмосферное давление, как внешний фактор, влияющий на уровенный режим подземных вод.

Предотвращение последствий возможных землетрясений

- 1. Прогноз времени землетрясений
- 2. Предварительная разрядка напряжений, например, путем закачки воды в скважины или взрывами
- 3. Сейсмостойкое строительство

Наведенная сейсмичность

- Наведенная сейсмичность объединяет в себе два вида сейсмических явлений (Природные опасности..., 2000):
- Инициирование – это воздействие на очаг уже подготовленного землетрясения, ускорение события, его «запуск» (trigger).
- Возбуждение – это воздействие на определенные зоны земной коры, следствием чего является возникновение землетрясений, которые без такого воздействия не произошли бы (induce).
- Воздействия могут быть как природные, так и антропогенные (или техногенные).
- К природным факторам наведенной сейсмичности относятся такие факторы, как приливные деформации, связанные с фазами Луны и Солнца, изменение скорости вращения Земли, солнечная активность, вызывающая изменение климата, погодные явления, с которыми связано изменение атмосферного давления, температуры и т.п., инициирование землетрясений землетрясениями, погодные явления.
- К антропогенным или техногенным факторам наведенной сейсмичности относятся возведение и эксплуатация крупных водохранилищ, извлечение со снижением пластового давления подземных вод, нефти и газа, закачивание под большим давлением промстоков и вод при добыче нефти, мощные промышленные и атомные взрывы, разгрузка при проходке горных выработок (горные удары) и даже запуски тяжелых космических ракет.

Наведенная сейсмичность

- До сих пор нет единой физической и математической теории или модели, которые бы удовлетворительно объясняли механизм наведенной сейсмичности.
- В случае заполнения крупных водохранилищ на проблему генезиса и механизма возбужденной сейсмичности имеются разные точки зрения:
- влияние веса воды,
- изменение напряжений в элементах земной коры, вызванные водной нагрузкой и скоростью изменения уровня водохранилища,
- возрастание поровотрещинного давления, которое нейтрализует геостатическую нагрузку, уменьшает трение в горных породах, изменяет их прочность и т. д.
- В случае разработки нефтяных и газовых месторождений причиной возбуждения тектонического землетрясения может стать:
- извлечение и закачка флюида (жидкости),
- изменение пластового давления и пластовой температуры,
- оседание поверхности и т. д.

Особенности наведенной сейсмичности

- Землетрясения как правило мелкофокусные - основная масса очагов сосредоточена в верхнем 10 – 15 км слое земной коры
- Интенсивность и магнитуда не превышают фоновую сейсмичность
- Меньшие площади проявления
- Более продолжительное время действия
- Иное распределение форшоков и афтершоков
- Смещение во времени - через 2 – 4 года после заполнения резервуара, а иногда через 15 лет
- Отношение V_p/V_s меньше
- Необходимыми условиями для наведенной сейсмичности являются высокий уровень предварительной напряженности и водопроницаемые породы

Примеры наведенной сейсмичности

- Известные сильные, наведенные землетрясения в Индии (на водохранилище Койна), в Африке (водохранилище Кагриба).
- Одним из классических примеров наведенных землетрясений, вызванных повышением порового давления и закачкой жидкости в пласт, являются знаменитые денверские землетрясения, которые произошли при закачке воды в скважину Денвер (штат Колорадо, США). В результате закачки жидкости в скважину глубиной 3.7 км за три года наблюдений было зарегистрировано 710 толчков. Причем магнитуды некоторых толчков достигали значений $M = 5.0$. Сейсмическая активность проявлялась вдоль плоскости, которая проходит под скважиной на глубине около 10 км.
- Примером наведенных землетрясений являются сильные Газлийские землетрясения в 1976 и 1984 годах. Возможной причиной Газлийских землетрясений является резкое изменение напряжений вследствие смещения по разлому, залегающему ниже газовой залежи (Иванов, Тржцинский, [2001](#)).
- Интенсивное нарастание сейсмической активности было замечено и при атомных взрывах на полигонах США и на Семипалатинском атомном полигоне в Казахстане (Иванов, Тржцинский, [2001](#)).

Наведенная сейсмичность при создании водохранилищ

- Отмечена наведенная сейсмичность:
- Плотины высотой $H > 140\text{м}$ 21%
- Плотины высотой $H > 100\text{м}$ 10%
- Плотины высотой $H > 10\text{м}$ 0,63%