

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИИ: МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ЦУНАМИ

Введение

Цунами (яп. 津波, цунами — «большая волна в гавани») — это одно из наиболее опасных природных явлений, представляющее собой систему морских волн, возникающих в результате мощного воздействия на водную толщу. Понимание механизма образования цунами является критически важным для геологов, геофизиков и специалистов в области защиты от природных катастроф. В этой лекции мы рассмотрим физические процессы, лежащие в основе образования и распространения цунами, а также основные типы источников, генерирующих эти опасные волны.

I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦУНАМИ

1.1 Физическое определение

Цунами — это **длинные гравитационные волны**, распространяющиеся в водной толще от поверхности до дна. Ключевым отличием цунами от обычных ветровых волн является то, что эти волны затрагивают **всю толщу воды** от морского дна до поверхности, тогда как ветровые волны воздействуют только на поверхностный слой.

Основное уравнение для расчета скорости распространения цунами в открытом океане описывается приближением мелкой воды (shallow water approximation):

$$c = \sqrt{g \cdot H}$$

где:

- c — скорость распространения волны (м/с)
- g — ускорение свободного падения (9,81 м/с²)
- H — глубина океана (м)

1.2 Характеристики цунами в открытом океане

Скорость распространения: При средней глубине океана 4 км скорость распространения цунами достигает:

- 200 м/с, или 720 км/ч
- В открытом океане скорость может варьироваться от 600 до 900 км/ч

Высота волны: В открытом океане амплитуда цунами обычно невелика:

- Высота волны редко превышает 50 см
- Волна практически незаметна для судов

- Люди на борту кораблей часто не замечают прохождение цунами

Длина волны: Расстояние между гребнями цунами может быть огромным:

- От десятка до нескольких сотен километров
- Период волны варьируется от минут до часов

Энергия: Цунами обладает колоссальным запасом потенциальной и кинетической энергии, позволяющей волне преодолевать тысячи километров практически без затухания.

1.3 Трансформация волны при приближении к берегу

При выходе волны на мелководье происходят качественные изменения:

- **Замедление:** Нижняя часть волны начинает контактировать с морским дном и испытывает трение, скорость снижается до 30-50 км/ч
- **Сокращение длины:** Длина волны резко уменьшается
- **Увеличение высоты:** Верхняя часть волны, движущаяся быстрее, «накатывается» на замедлившуюся нижнюю часть, вся колоссальная энергия сжимается и устремляется вверх
- **Максимальная высота:** У берега высота цунами может достигать 10-40 метров и более, в особых географических условиях (клинообразные бухты, крутые берега) — сотен метров

Высоту волны на прибрежном мелководье можно оценить по эмпирической формуле:

$$H_{\text{мелк.}} = 1,3 \cdot H_{\text{глуб.}} \cdot \left(\frac{B_{\text{глуб.}}}{B_{\text{мелк.}}} \right)^{1/4}$$

где:

- $H_{\text{мелк.}}$ — высота волны в прибрежной отмели
- $H_{\text{глуб.}}$ — первоначальная высота волны в глубоком месте
- $B_{\text{глуб.}}$ — глубина воды в глубоком месте
- $B_{\text{мелк.}}$ — глубина воды в прибрежной отмели

II. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЦУНАМИ

2.1 Подводные землетрясения (85% всех цунами)

Механизм образования:

Подводные землетрясения являются основным источником цунами. Механизм их образования связан с движением тектонических плит Земли.

Строение тектонической системы:

- Земная кора состоит из огромных литосферных плит, которые постоянно смещаются
- Скорость смещения составляет в среднем 7 см в год
- Плиты движутся благодаря конвективным течениям в мантии Земли

Процесс накопления и высвобождения энергии:

1. **Фаза накопления напряжения:** В зонах субдукции (конвергентные границы плит) одна океаническая плита медленно подползает под другую плиту (континентальную или океаническую). Из-за трения плиты оказываются запертыми, и напряжение между ними накапливается десятилетиями или даже столетиями.
2. **Критическая точка:** Когда напряжение достигает предела прочности пород, происходит внезапное разъединение — двигающаяся плита смещается относительно неподвижной.
3. **Вертикальное движение дна:** При землетрясении происходит взаимное смещение дна:
 - Один участок морского дна резко **поднимается**
 - Другой участок одновременно **опускается**
 - Смещение может составлять несколько метров на площади тысячи квадратных километров
4. **Возмущение водной толщи:** Вертикальное смещение дна, подобно гигантскому поршню, мгновенно вытесняет или поглощает огромный столб воды. Поверхность воды приходит в колебательное движение по вертикали, стремясь вернуться к исходному уровню моря, и порождает серию волн.

Условия для образования цунамигенного землетрясения:

Не каждое подводное землетрясение сопровождается цунами. Для образования разрушительного цунами должны совпасть несколько условий:

1. **Магнитуда:** Цунами образуются при землетрясении любой силы, но большой силы достигают те, которые возникают при магнитуде:
 - Минимальная: 6,5
 - Для действительно разрушительных волн: выше 7
2. **Глубина очага:** Очаг землетрясения должен находиться неглубоко, менее чем в 70 км под поверхностью Земли. Наиболее цунамигенны подводные толчки с глубиной менее 10-20 км.
3. **Характер движения:** Цунами порождается именно **вертикальным смещением** морского дна на большой площади. Горизонтальные сдвиги плит, как правило, к образованию цунами не приводят.
4. **Механизм фокусировки:** Подводный толчок должен войти в резонанс с волновыми колебаниями водного столба.

Наиболее опасные зоны — зоны субдукции:

Наиболее мощные цунами генерируются в **зонах субдукции**, где давление и геологические условия способствуют образованию мощнейших землетрясений. Более 80% всех цунами возникают на периферии Тихого океана, где расположено множество активных зон субдукции.

2.2 Оползни (7% цунами)

Механизм образования:

Огромная масса скальной породы, льда или грунта, обрушившаяся в воду с берега или сорвавшаяся под водой, способна вызвать мощную волну. Зачастую землетрясение вызывает оползень, и сам оползень генерирует волну.

Характеристики оползневых цунами:

- Часто возникают локально, в определённых географических условиях
- Могут достигать рекордных высот в узких бухтах и заливах
- Менее опасны для дальних берегов, так как имеют локальный характер

Исторический пример — бухта Литуйя (Аляска, 1958):

9 июля 1958 года в результате землетрясения на Аляске в бухте Литуйя произошёл один из самых мощных оползней. Масса льда и земных пород объёмом около 30 млн м³ обрушилась с высоты 1100 м, образовав волну, достигшую на противоположном берегу высоты более **524 метра** — рекорд среди всех известных волн цунами.

Подводные оползни:

Намного чаще происходят подводные оползни в дельтах рек и континентальных шельфах:

- Особенно опасны в Индонезии с её огромным шельфовым осадконакоплением
- Регулярно вызывают локальные волны высотой более 20 метров
- Часто приводят к значительным жертвам

2.3 Вулканические извержения (5% цунами)

Механизм образования:

Крупные подводные извержения обладают таким же эффектом, что и землетрясения, но с дополнительными факторами:

1. **Волны от взрыва:** При сильных вулканических взрывах образуются мощные ударные волны
2. **Заполнение полостей:** Вода заполняет полости от извергнутого материала или даже кальдеру вулкана, вследствие чего возникает длинная волна
3. **Движение пород:** Выброс больших объёмов раскалённой лавы и вулканических пород вызывает смещение воды

Классический исторический пример — извержение Кракатау (1883):

Огромные цунами от вулкана Кракатау наблюдались в гаванях всего мира. Волны:

- Высотой до 30 метров
- Распространялись на расстояния в тысячи километров

- Уничтожили в общей сложности 5000 кораблей
- Унесли жизни 36 000 человек

Это один из самых смертоносных примеров вулканического цунами в истории.

2.4 Метеорологические цунами (метеоцунами)

Определение: Метеоцунами, или метеорологическое цунами — это цунамподобная морская волна метеорологического происхождения.

Механизм образования:

Метеоцунами возникают, когда быстрые изменения атмосферного давления вызывают смещение поверхностных вод. Движущиеся системы низкого давления могут создавать согласованное движение водных масс, похожее на цунами.

География: Часто встречается в:

- Средиземном море (побережья Италии, Испании и Хорватии)
- Тихом океане (побережья России, Китая, Японии и США)
- На Дальнем Востоке России (порты южной части о-ва Сахалин и Курильских островов)

Частота: В период 2000-2014 года около 3% цунами имело зарегистрированное метеорологическое происхождение, хотя истинная распространённость может быть до 10%.

2.5 Другие редкие источники

Падение крупных метеоритов:

- Могут создавать чрезвычайно высокие волны
- Круговая волна от точечного источника быстро теряет энергию
- Опасны лишь при падении в пределах 10-20 км от береговой линии

Человеческая деятельность:

- Подводные ядерные взрывы (в XX веке)
- Возможные взрывы нескольких водородных бомб теоретически могли бы создать волны, но такие волны не классифицируются как цунами в силу отсутствия сдвига всей толщи воды
- Все подводные испытания атомного оружия запрещены международными договорами

III. ФИЗИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЦУНАМИ

3.1 Стадия инициации

В момент возникновения цунами в точке источника (эпицентр землетрясения, вулкана или оползня) происходит:

1. **Вертикальное смещение воды:** Мгновенное поднятие или опускание больших водных масс

2. **Возбуждение колебаний:** Поверхность воды приходит в колебательное движение
3. **Возникновение волновых фронтов:** Образуется система волн, распространяющихся во все стороны от источника

3.2 Распространение в открытом океане (дальнее поле)

В открытом океане цунами распространяется с постоянной скоростью согласно уравнению мелкой воды. Характеристики:

- **Сохранение энергии:** Благодаря огромной глубине энергия рассеивается незначительно
- **Низкая амплитуда:** Волна остаётся малой (менее 1 метра)
- **Длительный период:** Расстояние между гребнями может составлять сотни километров, период — часы
- **Серия волн:** Цунами обычно проявляется как серия волн, между приходами которых может проходить более часа
- **Практическая незаметность:** Для судов в открытом море волна практически незаметна и опасности не представляет

3.3 Трансформация при приближении к мелководью (ближнее поле)

При приближении к побережью происходят кардинальные изменения параметров волны:

Процесс торможения нижней части волны:

1. **Начало взаимодействия с дном:** Нижняя часть волны начинает испытывать трение о морское дно
2. **Замедление нижней части:** Скорость нижней части падает до 30-50 км/ч
3. **Сохранение скорости верхней части:** Верхняя часть волны в верхних слоях воды продолжает двигаться с большей скоростью
4. **Возникновение градиента скоростей:** Между верхней и нижней частями волны создаётся резкое различие в скорости движения

Концентрация энергии:

1. **Сокращение длины волны:** Расстояние между гребнями уменьшается с сотен километров до нескольких километров
2. **Сжатие энергии:** Вся колоссальная энергия, распределённая по всей толще воды, сжимается в меньшем объёме
3. **Увеличение высоты:** Амплитуда волны растёт кратно — может возрасти в 10 и более раз

Формирование волнового фронта:

По мере приближения к берегу образуется почти вертикальный водяной вал высотой до 10-40 метров, иногда более сотни метров. Эта волна несёт разрушительную силу и огромное количество энергии на берег.

3.4 Дополнительные физические эффекты

Отступление воды перед волной (forerunner effect):

В некоторых случаях первым признаком приближающегося цунами является внезапное быстрое отступление воды от берега:

- Вода может отступить на сотни метров или даже километры
- Оголяется морское дно
- Люди, не знакомые с этим явлением, могут остаться на обнажённом дне из любопытства
- Затем вода возвращается в виде мощной волны

Механизм отступления: Первая часть цунами — это впадина (через), а не гребень. Когда впадина достигает берега, вода быстро отступает.

Волны, отражённые от берега:

1. **Отражение от берега:** При столкновении с берегом часть энергии волны отражается обратно в море
2. **Интерференция волн:** Отражённые волны могут интерферировать с входящими волнами, создавая более сложную картину воздействия
3. **Усиление в определённых местах:** В некоторых местах (заливы, узкие проливы) волны могут усиливаться

Фокусировка энергии:

Максимальная высота волн достигается в:

- Клинообразных бухтах
- Местах с крутыми берегами
- Участках побережья с благоприятной геометрией для фокусировки энергии

На открытых берегах и в местах с закрытыми бухтами волны обычно менее высокие.

IV. ПРИЗНАКИ ПРИБЛИЖАЮЩЕГОСЯ ЦУНАМИ

Знание признаков приближающегося цунами критически важно для спасения жизней. Основные признаки:

4.1 Сейсмические признаки

Ощутимое землетрясение:

- Эпицентр землетрясения обычно находится в океане
- На берегу землетрясение часто ощущается слабо или совсем не ощущается
- В цунамиопасных регионах при ощущении землетрясения необходимо немедленно удалиться от берега

4.2 Гидрологические признаки

Внезапный отход воды от берега:

- Вода быстро отступает на значительное расстояние
- Могут быть видны морское дно, рифы, скалы, обычно покрытые водой
- Это наиболее надёжный признак приближающегося цунами

Необычные течения и шум:

- Громадные взбросы у кромок ледяного припая и рифов (в полярных регионах)
- Образование толчеи и необычных течений
- Характерный шум, похожий на звук приближающегося поезда

Поведение морских животных:

- Необычный дрейф льда и плавающих предметов (в полярных регионах)
- Образование трещин в припае (в полярных регионах)
- Рыбы и морские животные часто показывают необычное поведение перед цунами

4.3 Правило безопасности

В цунамиопасных регионах существует простое правило: **если вы видите внезапный отход воды от берега, это признак близкого приближения волны; в этом случае необходимо как можно скорее удалиться от берега на максимальное расстояние, предпочтительно на возвышенное место.**

V. ПРИМЕРЫ ИСТОРИЧЕСКИХ ЦУНАМИ

5.1 Цунами на Курильских островах (1952)

Дата: 5 ноября 1952

Место: Северо-Курильск

Причина: Мощное землетрясение магнитудой 8,3-9,0 в Тихом океане в 130 км от берегов Камчатки

Характеристики:

- Три волны высотой 15-18 метров (по разным источникам)
- Уничтожили город Северо-Курильск
- Нанесли ущерб другим прибрежным поселениям
- Погибло более 2000 человек

5.2 Индийского океана 2004 года

Дата: 26 декабря 2004

Место: Юго-Восточная Азия

Причина: Мощнейшее землетрясение магнитудой 9,3 — второе по мощности из всех зарегистрированных

Масштаб катастрофы:

- Пострадали страны Азии и Африки
- Индонезия: 180 000 погибших
- Шри-Ланка: 31-39 000 погибших
- Таиланд: более 5 000 погибших
- Сомали (Африка): значительные жертвы
- **Общее число погибших: более 235 000 человек**
- Одно из самых смертоносных цунами в истории человечества

5.3 Цунами в Японии (2011)

Дата: 11 марта 2011

Место: Япония

Причина: Сильнейшее землетрясение магнитудой 9,0 с эпицентром в 373 км северо-восточнее Токио

Характеристики:

- Гипоцентр находился на глубине 32 км к востоку от острова Хонсю
- Простирался на расстояние около 500 км
- Волны превышали 7 метров в высоту
- Вызвало аварию на АЭС Фукусима I

Жертвы (по состоянию на 2 июля 2011):

- 15 524 погибших
- 7 130 пропавших без вести
- 5 393 ранено

VI. СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ПРОГНОЗА ЦУНАМИ

6.1 Сейсмический мониторинг

Принцип: Системы предупреждения строятся главным образом на обработке сейсмической информации.

Критерии оповещения:

- Если землетрясение имеет магнитуду более 7,0 и центр расположен под водой, подаётся предупреждение о цунами
- В зависимости от региона и заселённости берегов условия выработки сигнала тревоги могут различаться

6.2 Система DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)

Технология: Система предупреждения на основе придонных датчиков гидростатического давления со спутниковой связью, разработанная в США.

Функции:

- Обнаруживает волны цунами в открытом океане
- Позволяет достаточно точно определить время прибытия волны в различные населённые пункты
- Даёт ценное время на эвакуацию

6.3 Предупреждение «по факту»

Способ более надёжный, так как практически отсутствуют ложные тревоги, но часто может быть выработано слишком поздно.

Полезно для телецунами — глобальных цунами, оказывающих влияние на весь океан и приходящих на другие границы океана спустя несколько часов. Пример: индонезийское цунами декабря 2004 года для стран Африки.

6.4 Роль образования и информирования

Критически важный фактор: Своевременное распространение информации среди населения.

Примеры различных подходов:

- **Япония:** Множество образовательных программ по природным катастрофам, население хорошо осведомлено об опасности
- **Индонезия (2004):** Население в основном не знакомо с цунами, что стало основной причиной большого количества жертв

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механизм образования цунами связан с мощным возмущением водной толщи, вызванным подвижками земной коры, извержениями вулканов, оползнями или другими геологическими процессами. Ключевыми факторами являются вертикальное смещение морского дна на большой площади, достаточная магнитуда события и соответствующие геологические условия. При распространении в открытом океане цунами представляет собой относительно малую, но быстро движущуюся волну; при приближении к мелководью волна трансформируется в разрушительный вал высотой в десятки метров. Понимание физики цунами критически важно для эффективной защиты прибрежных территорий и спасения жизней.

[1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29]

✱

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Цунами>
2. <https://www.emsd.ru/conf2019lib/pdf/tsunami/korolev2.pdf>
3. https://www.reddit.com/r/askscience/comments/aal64w/why_does_the_water_retract_from_the_shoreline/
4. <https://sci.rambler.ru/science/54958669-anatomiya-volny-ubiytsy-kak-rozhdayutsya-tsunami-i-gde-ih-zhdat/>
5. http://ocean.phys.msu.ru/courses/phys_tsu/lecture11/Physics_of_tsunamis_2019_11.pdf
6. https://www.reddit.com/r/explainlikeimfive/comments/1bb60w2/eli5_why_does_the_ocean_recede_prior_to_a_tsunami/
7. https://ocean.phys.msu.ru/courses/phys_tsu/Левин, Носов, Физика цунами и родственных явлений в океане 2005.pdf
8. <http://vestnik.mrsu.ru/content/pdf/18-2/02.pdf>
9. <http://journals.uran.ua/eejet/article/download/99312/95619>
10. <https://dynvibro.ru/dynvibro/article/download/9404/8570>
11. <https://www.aaresearch.science/jour/article/download/288/169>
12. <https://www.rjgt.ru/jour/article/download/61/24>
13. <https://science-engineering.ru/pdf/2018/4/1190.pdf>
14. <https://science-engineering.ru/pdf/2018/3/1188.pdf>
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Waves_and_shallow_water
16. https://ru.wikipedia.org/wiki/Зона_субдукции
17. http://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/r_161_0388.pdf
18. <http://fpd.informsistema.ru/effects/catalog/est/byld/description/82/index.html>
19. <https://new-science.ru/kak-voznikajut-zemletryaseniya-v-zone-subdukcii/>
20. http://www.argolis-yacht.ru/School/Proctor/Proctor_8.htm
21. <https://neftegaz.ru/tech-library/geology/148055-subduktsiya-zona-subdukcii/>
22. https://www.reddit.com/r/VisitingHawaii/comments/168rer/come_waves_break_so_far_away_in_some_parts_of/
23. <https://vestnik-mgou.ru/Articles/Doc/12879>
24. <https://www.gt-crust.ru/jour/article/download/984/483>
25. <https://vestnik-mgou.ru/Articles/Doc/11338>
26. http://vestnik.mstu.edu.ru/v19_1_2n65/7_Volkov_222_226.pdf
27. <https://www.techinsider.ru/editorial/698613-kak-poyavlyayetsya-cunami/>
28. <http://oceanfromspace.scanex.ru/index.php/ocean/waves/surface-wave/tsunami>
29. <https://19.mchs.gov.ru/deyatelnost/poleznaya-informaciya/rekomendacii-naseleniyu/chs-prirodnogo-haraktera/cunami>