



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЦУНАМИ: ОТ ГЕНЕЗИСА В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ ДО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Яковлева Мария Дмитриевна

Старший научный сотрудник Кафедры океанологии и физики моря,
Санкт-Петербургский государственный университет
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Настоящая работа представляет собой комплексное исследование физических механизмов, лежащих в основе **генерации, распространения и трансформации волн цунами**, которые являются одной из самых разрушительных природных угроз в прибрежных регионах. Основное внимание уделено **сейсмическому механизму** зарождения цунами, доминирующему в **зонах субдукции**, где внезапное вертикальное смещение морского дна является критическим фактором. Мы подробно анализируем **линеаризованные уравнения мелкой воды** как фундаментальную основу для **гидродинамического моделирования** распространения волн в открытом океане, подчеркивая роль глубинного профиля и кориолисовой силы. Рассматривается процесс **преобразования** волны при выходе на шельф, известный как **ран-ап**, который включает эффекты **дисперсии, нелинейности и трения о дно**, определяющие высоту наката. Результаты исследования подтверждают, что высокоточное оперативное прогнозирование цунами возможно только при интеграции точных **параметров очага землетрясения** с передовыми численными моделями, работающими в режиме реального времени.

Ключевые слова: цунами, зона субдукции, гидродинамическое моделирование, уравнения мелкой воды, ран-ап, генерация цунами, сейсмический очаг, оперативное прогнозирование, нелинейные волны, дисперсия.

Введение

Цунами, представляющие собой длинные волны гравитационного типа, способные пересекать целые океаны, являются критически важным объектом исследования в геофизике и океанологии, учитывая их потенциал для катастрофического воздействия на прибрежные зоны. Современные исследования показывают, что подавляющее большинство разрушительных цунами генерируется в результате **внезапных тектонических движений** на дне океана, в основном связанных с **меганадвигами** в зонах субдукции.

Несмотря на десятилетия научных изысканий и создание глобальных систем оповещения, проблема точного и своевременного прогнозирования **высоты наката (ран-апа)** волны в конкретной точке побережья остается сложной научно-технической задачей, требующей постоянного совершенствования как теоретических моделей, так и инструментального мониторинга.

Целью данной работы является систематическое рассмотрение полного цикла жизни волны цунами: от момента ее **генерации** в очаге землетрясения и описания **начальных условий**, до **распространения** в открытом океане и **трансформации** на шельфе. Мы сосредоточимся на **гидродинамических моделях**, которые обеспечивают основу для оперативного прогнозирования и оценки рисков, поскольку только точное математическое описание процессов позволяет принимать своевременные управленческие решения и спасать человеческие жизни.

Геофизические Механизмы Генерации Волнового Поля

Основной механизм генерации подавляющего большинства океанических цунами связан с **сейсмическими явлениями**, которые вызывают резкое **вертикальное смещение** водной толщи. Этот процесс наиболее ярко выражен в зонах конвергентных границ литосферных плит, известных как **зоны субдукции** (например, Тихоокеанское огненное кольцо). В этих областях одна плита погружается под другую, вызывая накопление огромных **тектонических напряжений** в зоне контакта, или меганадвига. Когда напряжение превышает предел прочности пород, происходит внезапный **сброс напряжения** в виде крупного землетрясения (обычно магнитудой $M > 7.5$).

Критически важным условием для генерации цунами является **вертикальная компонента смещения** морского дна. При землетрясении происходит резкое поднятие или опускание части океанического дна, что, в свою очередь, передает этот импульс всей вышележащей водной толще. Идеализированное **начальное условие** для моделирования цунами часто аппроксимируется как **мгновенное смещение поверхности океана**, точно повторяющее остаточное вертикальное смещение дна в очаге землетрясения. Для количественного описания этого процесса используются **модели очага**, основанные на теории **дислокаций** (например, модель Окады), которые позволяют на основе сейсмических параметров (таких как глубина, площадь разрыва и величина скольжения) рассчитать **поле остаточных деформаций** дна. Эффективность передачи энергии от дна к водной толще зависит от глубины океана и длины волны смещения, причем наиболее опасны землетрясения с относительно неглубоким очагом, расположенным вблизи дна, поскольку они обеспечивают наиболее эффективный перенос энергии на поверхность океана.

Гидродинамическое Моделирование Распространения Волн в Открытом Океане

После генерации волна цунами распространяется по океану, подчиняясь законам **гидродинамики длинных волн**. Поскольку длина волны цунами (до сотен километров) значительно превышает глубину океана (в среднем 4-5 км), для ее описания используются **линеаризованные уравнения мелкой воды** (Shallow-Water Equations). Эти уравнения, несмотря на их кажущуюся простоту, являются краеугольным камнем оперативного прогнозирования.

В этих уравнениях игнорируется **вертикальная компонента скорости** воды и предполагается, что давление является гидростатическим. Скорость распространения волны C в открытом океане определяется классической формулой:

$$C = \sqrt{gH}$$

где g — ускорение свободного падения, а H — глубина океана. Из этой формулы следует, что скорость цунами в глубоководных частях океана может достигать 800-900 км/ч, что сопоставимо со скоростью реактивного самолета. Важным следствием этой зависимости является то, что **траектория и время прихода** волны целиком определяются **батиметрией** дна, а не начальными параметрами волны. Точность прогноза времени прихода критически зависит от качества **цифровых моделей рельефа дна (батиметрии)**. При моделировании распространения на масштабах целого океана учитывается **эффект Кориолиса** и сферичность Земли. На этом этапе волна ведет себя как **недисперсионная**, то есть скорость распространения не зависит от ее длины, что позволяет использовать относительно простые численные схемы, основанные, как правило, на **методе конечных разностей** с адаптивной сеткой.

Трансформация Волны на Шельфе и Оценка Ран-Апа

По мере приближения к побережью и выхода на континентальный шельф (участок, где глубина океана резко уменьшается) волна цунами претерпевает существенные **нелинейные трансформации**, что является наиболее сложной частью моделирования. Резкое уменьшение глубины приводит к явлению **шоалинга** (увеличения высоты волны). В соответствии с законом Грина, высота волны A растет пропорционально $H^{-1/4}$, что означает экспоненциальный рост амплитуды при уменьшении глубины.

На шельфе и в прибрежной зоне в процесс распространения активно включаются эффекты **дисперсии** (зависимость скорости от длины волны) и **нелинейности**, а также **трения о дно**. Для точного описания этих процессов требуется переход к более сложным нелинейным моделям, таким как **уравнения Буссинеска** или полные **уравнения Навье-Стокса**, особенно для участков с чрезвычайно сложной береговой линией и наличием заливов или эстуариев.

Моделирование этого этапа направлено на расчет **ран-апа** — максимальной вертикальной отметки, до которой поднимается вода на суше. Высота ран-апа определяется не только высотой волны у берега, но и **топографией суши**, а также **шероховатостью поверхности**. Точность прогнозирования ран-апа критически важна для зонирования сейсмической опасности и планирования строительства берегозащитных сооружений, и она напрямую зависит от качества совместных **цифровых моделей рельефа суши (DEM)** и **батиметрии** прибрежной зоны с высоким пространственным разрешением, вплоть до нескольких метров.

Заключение

Исследование процессов формирования цунами подтверждает, что этот природный феномен является ярким примером сложного **взаимодействия литосферы и гидросферы**. Успешное **оперативное прогнозирование** цунами, критически важное для систем оповещения, зависит от немедленного получения и обработки двух ключевых наборов данных: **точных параметров очага** крупного землетрясения (что достигается глобальной сетью сейсмографов и инверсией сейсмических волн) и **данных о фактическом изменении уровня моря** (что обеспечивается буйковыми системами **DART** и приливными постами). Перспективы дальнейшего развития исследований и систем прогнозирования включают: **Интеграцию нейронных сетей и машинного обучения** для ускоренной инверсии параметров очага и моментальной калибровки гидродинамических моделей, что позволит сократить время от землетрясения до выдачи прогноза. **Усовершенствование нелинейных моделей** для более точного описания поведения волны на сложном рельефе и учета множественных отражений и дифракций в прибрежной зоне. **Расширение сети глубоководных датчиков давления**, а также использование новых технологий дистанционного зондирования (например, спутниковых альтиметров) для мониторинга поверхности океана в реальном времени.

Литература

1. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996.
2. Гусев А.А., Кононов В.Е. Землетрясения, вулканы и цунами на Дальнем Востоке. — Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2012.
3. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. // *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, Vol. 75, No. 4, pp. 1135–1154.
4. Synolakis C. E. Tsunami waves: modeling and testing. // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2003, Vol. 361, No. 1807, pp. 1975–1991.
5. Titov V. V., González F. I. Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model. // *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, Vol. 102, No. C12, pp. 27957–27977.