

## **Цунами: опасность и предупреждение**

УДК 550.345

## МЕГА-ЦУНАМИ МИРОВОГО ОКЕАНА: ИДЕНТИФИКАЦИЯ В КАТАЛОГАХ, МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, ВОЗМОЖНОСТИ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА

*Гусяков В.К.*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск  
gvk@sscc.ru*

### **Введение**

Разрушительные цунами 2004 г. в Индонезии и 2011 г. в Японии привлекли внимание ученых и специалистов к проблеме оценки опасности предельно сильных мега-событий тектонического происхождения. Оба они относятся к классу так называемых трансокеанских цунами, которые в той или иной мере затрагивают весь океанический бассейн. Для таких событий характерны большие высоты заплеска (более 20 м), наблюдающиеся на значительном протяжении (сотни километров) ближайшего побережья, но важнейшей особенностью является их способность пересекать весь океанический бассейн и производить разрушения на его противоположных берегах, чего никогда не происходит при обычных цунами.

В течение второй половины XX века цунами находились на пятом месте в ряду природных катастроф по числу жертв, после землетрясений, наводнений, тайфунов и вулканических извержений. Их доля в общем числе жертв природных катастроф в XX столетии, унесших более 4 миллионов жизней, была относительно невелика и составляла чуть более 1%. В XXI столетии Индонезийская катастрофа 26 декабря 2004 г., унесшая 228 000 жизней, сразу вывела цунами в статистике жертв природных катастроф на первое место, на котором они, по-видимому, будут находиться до следующего сильного землетрясения в одном из современных мегаполисов.

### **Трансокеанские цунами**

Формальное условие выделения трансокеанских цунами в исторических каталогах состоит в проверке наличия высот заплеска более 5 м на расстоянии свыше 5000 км от очага цунами [7]. Физический смысл этого критерия заключается в способности цунами производить разрушения на противоположных берегах океанического бассейна. Оказывается, что среди более чем 2250 цунамигенных событий, происшедших в Мировом океане с 2000 г. до н.э. по настоящее время, таких событий насчитывается всего 15–16, т.е. менее 1% от общего числа. Однако эти события ответственны за более чем половину от общего числа жертв цунами и за значительную долю произведенного материального ущерба.

Оставшиеся 99% – это локальные и региональные цунами. Создаваемые ими высоты заплеска на ближайшем побережье могут быть весьма значительны и достигать десятков и даже сотен метров, с рекордной высотой в 525 м, измеренной в бухте Литуйя (Аляска) после берегового обвала, вызванного землетрясением магнитудой около 8, происшедшим в этом районе 10 июля 1958 г. [8]. Однако протяженность зоны опасного воздействия таких цунами, как правило, невелика и составляет от нескольких сотен метров (в случае локальных цунами обвального происхождения) до первых сотен километров (в случаях сильных цунами сеймотектонического происхождения).

В противоположность этому, разрушительные эффекты от сильнейших трансокеанских цунами могут проявляться на значительно больших участках побережья, протяженностью до 1000 км и более. Анализ распределения высот цунами Тохоку 11 марта 2011 г., измеренных международной исследовательской группой по изучению его последствий, показывает, что заплески с высотами более 30 м наблюдались на протяжении 210 км побережья, с высотами более 20 м на протяжении 350 км и более 10 м на протяжении 550 км. Зона опасных (более 3 м) заплесков охватила практически все восточное побережье Японии, протяженностью более 2000 км.

Список 14 трансокеанских цунами, известных в настоящее время, приведен в Таблице 1, положение их очагов показано на Рис.1.

Таблица 1. Список исторически известных трансокеанских цунами и их основные параметры:  $M$  – магнитуда порождающего землетрясения (в доинструментальный период – макросейсмическая),  $N$  – число имеющихся измерений высот волн в базе данных [7],  $I$  – интенсивность цунами по шкале Соловьева-Имамуры,  $H_{mNF}$  – максимальная высота цунами в ближней зоне,  $H_{mFF}$  – максимальная высота цунами в дальней зоне (более 5000 км от очага),  $F_{NF}$  – число жертв в ближней зоне,  $F_{FF}$  – число жертв в дальней зоне

Дата и местоположение	$M$	$N$	$I$	$H_{mNF}$ , м	$H_{mFF}$ , м	$F_{NF}$	$F_{FF}$
26 января 1700, Каскадия	9.0	7	3.5	10	2–4	неизв.	0
17 октября 1737, Камчатка	9.0	6	4	63	12–15	неизв.	неизв.
1 ноября 1755, Лиссабон	8.5	51	4	30	7	~10,000	неизв.
7 ноября 1837, Чили	8.5	20	3.5	8	6	0	62
13 августа 1868, Чили	9.0	99	3.5	15	5.5	612	7
9 мая 1877, Чили	9.0	111	4	24	12	512	50
15 июня 1896, Япония	7.6	62	4	38.2	9.0	27,122	0
1 апреля 1946, Алеуты	8.6	542	4	42.2	20.0	5	162
4 ноября 1952, Камчатка	9.0	314	4	18	9.1	>10,000	0
9 марта 1957, Алеуты	9.1	304	3.5	22.8	16.1	0	0
22 мая 1960, Чили	9.6	537	4	15.2	10.7	~1,000	283
28 марта 1964, Аляска	9.3	292	4	68	4.9	106	18
26 декабря 2004, Суматра	9.0	1015	4.1	50.9	9.6	175,827	52,071
11 марта 2011, Тохоку	9.0	5578	4.2	55.9	3.0	15,884	2

При анализе списка из Таблицы 1 обращает на себя внимание тот факт, что 12 из 14 трансокеанских цунами возникли в результате землетрясений с магнитудой 9.0 и выше. Это имеет место, по крайней мере, для всех событий, начиная с середины XX века, когда появилась возможность инструментально измерять их магнитуду в длиннопериодной области. Для событий доинструментального периода (ранее 1904 г.) в Таблице 1 приведены макросейсмические оценки магнитуды, точность которых в лучшем случае составляет 0.5 балла, так что приведенное значение магнитуды 8.5, которую они имеют в сейсмологических каталогах, не противоречит отнесению события к классу мега-землетрясений.

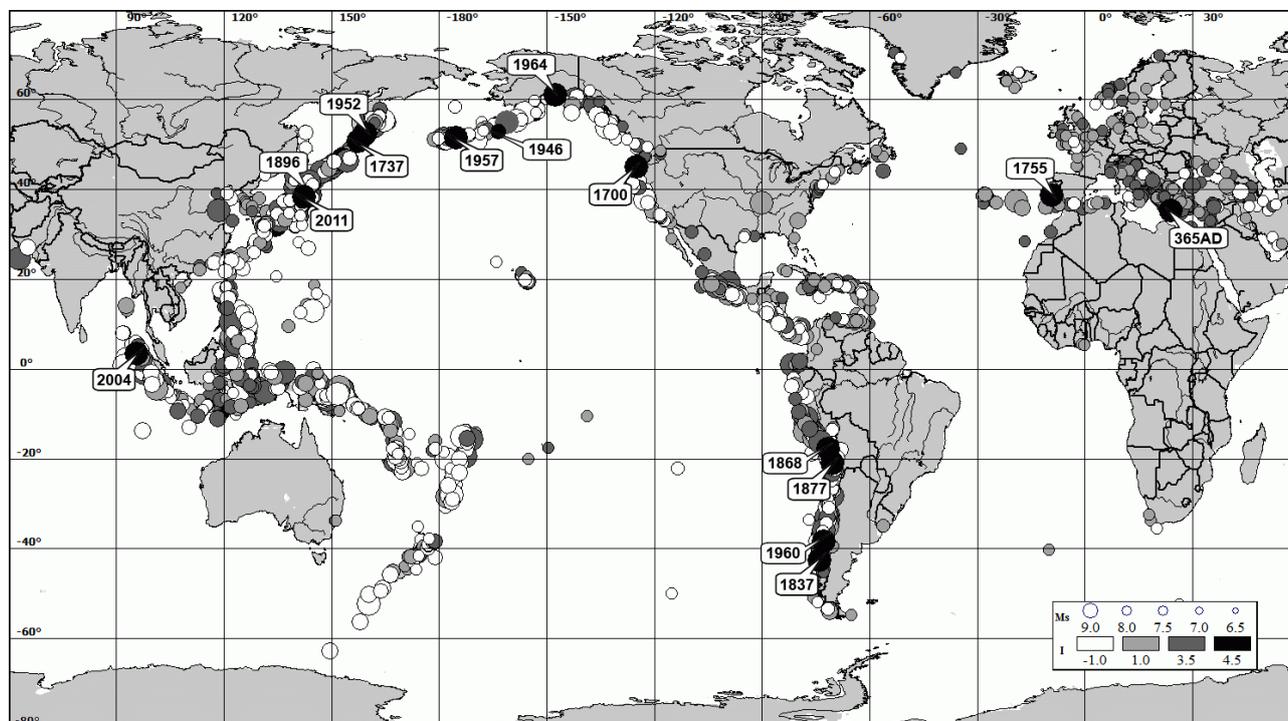


Рис. 1. Карта очагов цунами, происшедших в Мировом океане с 2000 г. до н.э. по настоящее время. Размер кружков пропорционален магнитуде землетрясения, цвет соответствует интенсивности цунами по шкале Соловьева-Имамуры. Очаги трансокеанских цунами выделены дополнительными большими кругами и помечены датой (годом возникновения).

Явным исключением являются лишь два случая сильных цунами – цунами Санрику 15 июня 1896 г. в Японии и Алеутское цунами 1 апреля 1946 г. Оба эти события относятся к классу так называемых цунами-землетрясений (tsunami-earthquakes), возбуждающих аномально сильные волны цунами при умеренной магнитуде самого землетрясения [5]. Обсуждаемыми в литературе причинами аномальности цунами-землетрясений являются большая глубина воды в очаговой области, особенности механизма и большое время развития очагового процесса [3,5], а для Алеутского цунами 1946 г. также присутствие обвальской компоненты в очаге [4]. В пользу последнего фактора говорит выраженная направленность излучения энергии Алеутского цунами, основной луч которой прошел в направлении Гавайских и Маркизских островов и далее к Антарктиде. На Маркизских островах наблюдались заплески до 18–20 м, в то время как на достаточно близко (по азимуту) расположенных островах Американского Самоа они не превышали 2–3 м.

Основываясь на данных Таблицы 1 значение магнитуды  $M_w=9.0$  можно принять в качестве порога для выделения разрушительных трансокеанских цунами среди всех прочих цунамигенных событий. Похоже, что даже незначительное снижение величины  $M_w$  (на 0.2–0.3 балла) приводит, при сохранении разрушительного потенциала события в ближней зоне, к резкому снижению его опасности для удаленных побережий. Последним примером в этом отношении является Чилийское цунами 27 февраля 2010 г. ( $M_w=8.8$ ), максимальные заплески в ближней зоне которого достигали 25–29 м. Однако на Гавайях, в Японии и на Курило-Камчатском побережье высоты волн не превышали 1–2 м и, хотя объявление тревоги на этих побережьях было вполне оправданным, реальной угрозы и ущерба от этого цунами ни на Гавайях, ни в Японии не было.

Относительно мест расположения очагов землетрясений, приведенных в Таблице 1 можно сказать, что все они, за исключением Лиссабонского землетрясения 1755 г., произошли на участках зон субдукции, примыкающих к побережью Тихого и Индийского океанов. Согласно основным представлениям концепции тектоники плит, в очагах сильнейших субдукционных землетрясений осуществляется разрыв вдоль главной литосферной границы, отделяющей пододвигающуюся океаническую плиту от перекрывающего ее краевого клина континентальной литосферы. Большая протяженность разрыва (от 500 до 1000 км), малая глубина очага (в среднем порядка 30 км) и значительные горизонтальные смещения по разрыву (до 30–50 м), приводят к возбуждению разрушительных цунами, характеризующихся значительными высотами заплеска (до 40–50 м) и увеличенным, сравнительно с обычными цунами, периодом волн (до 30–40 мин).

Смещение по разрыву в очагах мега-землетрясений может достигать 20–30 м и более. Относительная скорость плит в районах субдукции варьирует в довольно широких пределах, от 25 до 100 мм в год. Тогда в предположении, что все накопленные напряжения освобождаются только в очагах сильнейших землетрясений, их период повторяемости должен быть в пределах от 250 до 1000 лет. Фактический интервал времени между двумя последовательными мега-землетрясениями изменяется в весьма широких пределах – для уже известных исторических событий от 215 лет (камчатские землетрясения 17.10.1737 г. и 4.11.1952 г.) до 1142 лет (землетрясения Тохоку 13.07.869 г. и 11.03.2011 г.).

В рамках геодинамической модели зоны субдукции в районах островных дуг была предложена так наз. "клавишная" модель возникновения сильных субдукционных землетрясений [1]. В этой модели считается, что островодужный выступ надвигающейся континентальной литосферы разбит системой поперечных разломов на отдельные сегменты (клавиши), имеющие характерный размер в 100–150 км (вдоль простираения дуги), которые могут перемещаться относительно независимо друг от друга. В момент возникновения сильного (с магнитудой 7.5–8.5) субдукционного землетрясения, напряжения, накопленные в таком сегменте, разряжаются путем вспарывания границы между океанической корой и перекрывающим ее островодужным клином континентальной литосферы.

Согласно этой модели, преобладающим типом механизмов очагов сильных субдукционных землетрясений должен быть пологий (с углом падения 20–25°) подвиг. Континентальное крыло очаговой области при этом оказывается опущенным, что соответствует часто наблюдающимся косейсмическим опусканиям побережья. "Сработавший" островодужный сегмент в момент землетрясения выдвигается в сторону океана на величину смещения по плоскости разрыва (от 2–3 до 10 м). Таков в первом приближении сеймотектонический механизм возникновения сильных (с магнитудой 7.5 и выше) землетрясений в зонах островных дуг и активных континентальных окраин. Средний по Тихому океану период повторяемости таких землетрясений (в англоязычной литературе для них часто используется термин "characteristic earthquake") в каждом отдельном блоке составляет 140–190 лет [2].

Большинство цунамигенных землетрясений в районах субдукции происходит именно в этом магнитудном диапазоне (7.5–8.5). Возникающее при этом цунами возбуждается в основном вертикальной компонентой смещения морского дна и имеет высоту 1–2 м в глубоком океане, которая возрастает до 2–3 м на шельфе и до 5–10 м при выходе на берег. Важно отметить, что зона максимальных заплесков при этом находится прямо против очага и ее ширина не превышает размера очага, т.е. 150–200 км.

Наиболее важным отклонением от такой схемы являются происходящие время от времени мега-землетрясения с магнитудами 9.0 и выше, имеющие протяженность очагов от 500–600 до 1000 км. Очевидно, что в очагах таких землетрясений одновременно срабатывают несколько соседних сейсмостектонических блоков (клавиш), находящихся на различных стадиях сейсмического цикла. При этом важно отметить, что соответствующего размера бреши (зоны молчания), существующие на протяжении длительного времени (сотни лет), в зона субдукции как правило не выделяются.

Характерным примером в этом отношении является побережье Тохоку, занимающее северо-восточную часть острова Хонсю. Сильные цунамигенные землетрясения происходили в этом районе неоднократно, при этом наблюдались высоты заплеска до 29 м (в 1933 году) и 38 м (в 1896 году). Однако они затрагивали ограниченные по протяженности участки побережья, длиной в 150–200 км. Катастрофическое цунами, возникшее после мега-землетрясения 11 марта 2011 г., вызвало заливание берега с высотами более 20 м на протяжении более чем 350 км вдоль побережья. При этом исторически известные максимальные высоты заплеска, наблюдавшиеся здесь в течение почти тысячи лет, были обновлены (часто со значительным превышением) на участках побережья с общей протяженностью почти 1000 км.

В настоящее время нет единой точки зрения на то, что именно заставляет несколько соседних блоков сработать одновременно. Так же нет единого мнения о возможности возникновения мега-землетрясений на любых участках зон субдукции. До начала текущего столетия такие землетрясения были известны лишь для нескольких зон (Камчатка, северо-запад США, Южная Америка) и предпринимались попытки найти корреляцию их местоположения с физическими свойствами океанической плиты. Сейчас начинает преобладать точка зрения, что взамен нескольких особых участков, способных порождать мега-землетрясения в некоторых субдукционных зонах, практически все они должны рассматриваться как возможные места возникновения мега-землетрясений с магнитудой 9.0–9.5 [8]. Для оценки долгосрочного цунами-риска (цунамирайонирования побережья) признание этого факта означает коренной пересмотр существующих подходов к решению этой задачи.

Современный подход к задаче цунамирайонирования состоит в применении методики РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment), основными элементами которой являются построение вероятностной сейсмостектонической модели региона и применение численных методов расчета возбуждения и распространения цунами для получения распределений высот волн на побережье для реалистичного набора модельных источников различной магнитуды.

В некоторых работах (напр., в [6]) при использовании методики РТНА учитывается возможность возникновения мега-землетрясений, но только по тем зонам, где они уже происходили в прошлом. Возможность же реализации такого землетрясения на любом, в том числе ближайшем к рассматриваемому побережью сегменте субдукционной зоны, по-прежнему, часто игнорируется. Такой подход в значительной степени обесценивает полученные карты цунамиопасности, поскольку исключение из рассмотрения сильнейшего события приводит к существенной недооценке ожидаемых высот цунами.

## **Заключение**

1. Сильнейшие трансокеанские цунами составляют особый класс цунамигенных событий, для которых характерны большие высоты заплеска (до 40–50 м), измеренные на значительном протяжении береговой линии (от 200 до 1000 км) в районе расположения очага, и способность сохранения разрушительного потенциала вплоть до противоположных берегов океанического бассейна (на расстояниях до 10000 км). В общем числе цунамигенных событий, происшедших в Мировом океане за все время исторических наблюдений, доля таких событий составляет менее 1%. Однако они ответственны за более чем половину от общего числа жертв цунами и за значительную долю наносимого материального ущерба.

2. Источником сильнейших трансокеанских цунами в подавляющем числе случаев являются очаги подводных мега-землетрясений с магнитудой 9.0 и выше, в очагах которых осуществляется разрыв вдоль границы, отделяющей пододвигающуюся океаническую кору от перекрывающего ее

краевого клина континентальной литосферы. Большая протяженность разрыва (от 500 до 1000 км), малая глубина очага (в среднем порядка 30 км) и большие смещения по разрыву (20–50 м) приводят к возбуждению разрушительных волн цунами, характеризующихся значительными максимальными высотами заплеска (до 40–50 м) и увеличенным, сравнительно с обычными цунами, периодом волн, достигающим 30–40 мин.

3. Важнейшей особенностью трансокеанских цунами является их способность пересекать весь океанический бассейн и производить разрушения на его противоположных берегах. Такая способность является результатом действия нескольких факторов, основными из которых являются высокая направленность излучения энергии протяженным очагом землетрясения и увеличенные, сравнительно с обычными цунами, длины волн.

4. Другой важной особенностью трансокеанских цунами является их способность вызывать опасные колебания уровня на побережье окраинных морей (типа Охотского, Берингова), которые в значительной степени защищены островными дугами от воздействия сильнейших региональных цунами. Длиннопериодные волны, приходящие из удаленных областей океана, обладают большей способностью проникновения сквозь цепочки островов и достижения континентального побережья, где они, благодаря резонансным эффектам, возникающим в замкнутых и полузамкнутых бассейнах, могут создавать опасные колебания уровня спустя десятки часов после прихода головной волны.

7. Главная проблема оценки цунамиопасности конкретного участка океанического побережья, имеющего перед собой зону субдукции, состоит в получении реалистичных оценок места и времени возникновения в ближайших сегментах этой зоны мега-землетрясения с магнитудой 9.0 и выше. Получение таких оценок представляет собой сложную научно-практическую проблему и фактически сводится к решению задачи долгосрочного прогноза сильнейших землетрясений. Карты цунамиопасности любого масштаба, построенные без учета возможности и вероятности возникновения мега-землетрясений, будут значительно недооценивать реальную опасность цунами и приводить к неверным инженерным решениям по застройке прибрежной полосы.

Работа выполнена в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН (проект № 0251-2021-0004).

### Список литературы

1. Лобковский Л.И., Баранов Б.В. К вопросу о возбуждении цунами в зонах поддвига литосферных плит / Процессы возбуждения и распространения цунами, М.: ИО АН СССР. 1982. С. 7–17.
2. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. 1968. С. 121–150.
3. Fukao Y. Tsunami earthquakes and subduction processes near deep-sea trenches // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. No. 5. P. 2303–2314.
4. Fryer G.J., Watts P., Pratson L.F. Source of the great tsunami of 1 April 1946: a landslide in the upper Aleutian forearc // Mar. Geol. 2004. V. 203. P. 201–218.
5. Kanamori H. Mechanism of tsunami earthquakes // Phys. Earth Planet. Inter. 1972. V. 6. P. 346–359.
6. Leonard L., Roger G., Mazotti S. Tsunami hazard assessment of Canada // Nat. Hazards. 2013. doi: 10.1007/s11069-013-0809-5.
7. NOAA/WDS Global Historical Tsunami Database, National Geophysical Data Center, Boulder, USA. 2014. Web-version: [http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml)
8. Stein S., Okal E.A. The size of the 2011 Tohoku earthquake needn't have been a surprise // Eos Trans. AGU. 2011. V. 92. P. 227–228.