

УДК 550.344.42+551.466.62

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦУНАМИ В ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ ГЛУБОКОВОДНЫХ СТАНЦИЙ

*Королев П.Ю., Королев Ю.П.*

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия  
Pasha200482@mail.ru*

### Введение

Вопрос о том, является ли цунами в океане длинной или диспергирующей волной, в настоящее время не имеет определенного ответа. Нет сомнения в том, что на эволюцию цунами дисперсия оказывает влияние. Если длинная волна распространяется с сохранением периода и относительно медленным затуханием, то диспергирующая волна распространяется с увеличением периода и более быстрым затуханием. Не ясно, когда начинает проявляться дисперсия, от каких характеристик источника цунами зависит этот момент.

Зависимости периода (длины) волны от магнитуды землетрясения исследовались в [5, 3] по ограниченной информации о землетрясениях и цунами. Рассматривались цунами вблизи Японии за 1931-1969 гг. Выведено соотношение, связывающее длину волны цунами с характерным горизонтальным размером очага:  $L \sim 2.8 R$ .

Характерный размер очага  $R$  оценивался как  $R = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{L_{\max} \cdot L_{\min}} = \sqrt{S/\pi}$ , где  $L_{\max}$  и  $L_{\min}$  – большой и малый горизонтальные размеры,  $S$  – площадь очаговой области.

Представляет интерес рассмотреть землетрясения и цунами других регионов, а также цунами, распространяющиеся в океане.

Согласно сложившимся представлениям, волна цунами рассматривается как длинная волна на мелкой воде, длина которой много больше глубины воды. Такая волна распространяется без изменения длительности (периода) головной волны, а амплитуда уменьшается с расстоянием  $r$  как  $1/\sqrt{r}$ .

Согласно другим представлениям, на цунами оказывает влияние дисперсия. В результате период волны увеличивается, а амплитуда уменьшается как  $1/r$ . Несмотря на большое количество работ по расчету цунами, как без дисперсии, так и с дисперсией, эффекты проявления дисперсии в реальных волнах цунами и условия применимости моделей не исследованы.

В [4] рассмотрены нелинейные и дисперсионные эффекты на достаточно больших расстояниях от очага. Выведено выражение для так называемой длины дисперсии в бассейне постоянной глубины  $D$ , т.е. расстояния, после которого на волну оказывает влияние дисперсия:

$$L_{\text{disp}} \sim 0.06 \cdot A^3 / D^2 \quad (1)$$

Оценки длин дисперсии, выполненные для некоторых цунами, дают величины 8 – 48 тыс. км, что сравнимо и превышает размеры океана. Согласно этим оценкам, влияние дисперсии при распространении цунами несущественно.

Дисперсионные эффекты, влияющие на распространение цунами, рассмотрены в статье [1]. Рассматривалась задача Коши-Пуассона о возбуждении волн от мгновенного однородного поднятия участка морского дна радиуса  $R$  на величину  $a_0$ . Методом стационарной фазы получено асимптотическое выражение, описывающее форму волны:

$$\zeta(r, t) \approx \frac{a_0 \cdot R}{c \cdot t} \cdot \frac{J_1\left(\sqrt{2 \frac{\tau}{t}} \cdot \frac{R}{D}\right)}{ch\left(\sqrt{2 \frac{\tau}{t}}\right)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \frac{\tau}{t}}} \cdot \cos\left(\frac{ct}{3D} \cdot \left(2 \frac{\tau}{t}\right)^{3/2}\right), \quad (2)$$

где  $t$  – время пробега фронта волны,  $D$  – постоянная глубина бассейна,  $c = \sqrt{g \cdot D}$  – скорость распространения длинных волн,  $J_i(\ )$  – функция Бесселя,  $\tau$  – время, отсчитываемое от момента прихода фронта волны в точку наблюдения.

С учетом исследованного в [1] поведения волны на фронте и перед ним длительность первого периода волны оценивается как  $T = 3.91 \cdot \frac{D^{2/3}}{c^{2/3}} \cdot t^{1/3}$ . Из этого выражения и выражения (2) видны зависимости от времени периода (как  $t^{1/3}$ ) и амплитуды (как  $1/t$ ).

Целью работы являлось выяснение того, являются ли волны цунами в океане длинными волнами или волнами с дисперсией. Представлял интерес определить поведение цунами при распространении в океане, изменение амплитуды и периода головной волны в зависимости от времени пробега. А также оценить границы, до которых цунами можно рассматривать как длинную волну, и влияние глубины океана в очаге на формирование цунами.

### Оценка длины (времени) дисперсии

Выражение для длины дисперсии может быть выведено, исходя из иных, нежели в [4], соображений.

В выражении (2) функциями, определяющими форму волнового пакета, являются огибающая (функция Бесселя  $J_1\left(\sqrt{2\frac{\tau}{t}} \cdot \frac{R}{D}\right)$ ) и  $\cos\left(\frac{ct}{3D}\left(2\frac{\tau}{t}\right)^{3/2}\right)$ . Скорость перемещения вдоль оси

относительного времени  $\tau$  первого нуля функции Бесселя (равного примерно 4) выше, чем скорость перемещения нулей косинуса. На начальном этапе нуль функции Бесселя находится левее второго нуля косинуса, затем, перемещаясь со временем, нуль функции Бесселя занимает положение правее нескольких первых нулей косинуса.

За момент начала проявления дисперсии принимаем момент совпадения положений первого нуля функции Бесселя и второго нуля косинуса.

Из равенств  $\sqrt{2\frac{\tau}{t}} \cdot \frac{R}{D} = 4$  и  $\frac{ct}{3D}\left(2\frac{\tau}{t}\right)^{3/2} = \frac{3\pi}{2}$ , исключая  $\tau$ , получим

$$t_{disp} = \frac{3}{2^6} \cdot \frac{3\pi}{2} \cdot \frac{R^3}{cD^2} \approx 0.22 \cdot \frac{R^3}{cD^2}. \quad (3)$$

По аналогии с понятием длины дисперсии (1) полученное соотношение (3) будем называть временем дисперсии.

Для оценки размеров очага цунами использованы соотношения между магнитудой  $M$  землетрясения и размерами очага цунами [2]:  $lg L_{max} = 0.5 M^{-1.9}$  и  $lg L_{min} = 0.5 M^{-2.2}$ .

Для оценок времен дисперсии в (3) в качестве  $R$  принята половина длины меньшей оси очага:  $R = 10^{0.5M - 2.2}/2$ .

Например, для цунами Тохоку (2011 г.,  $M=9.1$ )  $R=97$  км,  $t_{disp}=800$  мин.,  $L_{disp}=10500$  км. Соответственно, для Симуширского цунами (2006 г.,  $M=8.3$ )  $R=39$  км,  $t_{disp}=50$  мин.,  $L_{disp}=670$  км. Оценки сильно отличаются от оценок по (1). Для оценок глубина океана принята равной 4400 м.

### Постановка задачи

Исследовались зависимости амплитуды гребня и периода первой волны от времени пробега цунами до точки регистрации станциями системы DART (<https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart>). За время пробега принят момент времени прихода первого гребня в точку измерения. Длительность первого периода нормировалась на характерное время в очаге (нормирующий период)

$$T_{norm} = R/c_0, \quad (4)$$

где  $R$  – половина длины меньшей оси очага цунами,  $c_0$  – скорость длинных волн на глубине  $D_0$  в эпицентре очага цунами:  $c_0 = (g D_0)^{1/2}$ .

Данные об анализируемых землетрясениях и цунами приведены в таблице 1.

Выполненное исследование носит предварительный, качественный характер. Статистическая обработка результатов измерений не проводилась.

Принадлежность цунами к диспергирующим или недиспергирующим волнам оценивалась по двум показателям: степени затухания амплитуды и степени увеличения длительности периода головной волны в зависимости от времени пробега.

Таблица. Данные о землетрясениях и цунами

№ п/п	Географическое место очага цунами, дата (год.мес.число)	Координаты эпицентра (широта долгота)	Магнитуда	Полуширина меньшей оси очага цунами $R$ , км	Глубина океана в эпицентре, $D_0$ , м	Нормирующий период, $T_{norm}$ , мин
1	Симушир, 2009.01.15	46.857 155.154	7.4	13.77	6960	0.88
2	Цунами, 2011.03.09	38.435 142.842	7.5	15.45	1470	2.14
3	Кодьяк, 2018.01.23	56.046 149.073	7.9	24.49	4560	1.93
4	Симушир, 2006.11.15	46.592 153.266	8.3	38.8	3520	3.48
5	Симушир, 2007.01.13	46.243 154.524	8.1	30.83	6650	2.01
6	Чили, 2014.04.01	-19.610 -70.769	8.2	34.59	2110	4.01
7	Перу, 2007.08.15	-13.386 -76.603	8.0	27.48	140	12.36
8	Чили, 2015.09.16	-31.573 -71.674	8.3	38.81	300	12.0
9	Тохоку, 2011.03.11	38.297 142.373	9.1	97.49	970	16.66

### Результаты и обсуждение

Анализируемые события разбиты на три серии. Результаты анализа представлены ниже. Первая серия (№№ 1 – 3 в таблице 1) – цунами с небольшой магнитудой ( $M=7.4 – 7.9$ ) землетрясения, но относительно большой ( $D_0=1470 – 6960$  м) глубиной океана в эпицентре (рис. 1). Вторая серия (№№ 4 – 5 в таблице 1) – цунами с большой магнитудой ( $M=8.1 – 8.3$ ) и большой глубиной океана в эпицентре ( $D_0=3520 – 6650$  м) (рис. 2). Третья серия (№№ 6 – 9 в таблице 1) – цунами с большой магнитудой ( $M=8.0 – 9.1$ ), но с небольшой глубиной океана в эпицентре ( $D_0=140 – 2110$  м) (рис. 3).

В левых колонках рисунков – зависимость амплитуды головной волны от времени пробега цунами до точки измерения. На всех рисунках изображены зависимости  $1/t^{1/2}$  и  $1/t$ .

В правых колонках рисунков – зависимость нормированного на (4) периода головной волны от времени пробега. Изображена зависимость  $t^{1/3}$ . Наклонный крестик показывает время дисперсии (3) и период головной волны в этот момент времени.

Форма значков на рисунках обозначает различные направления точек регистрации относительно очага цунами.

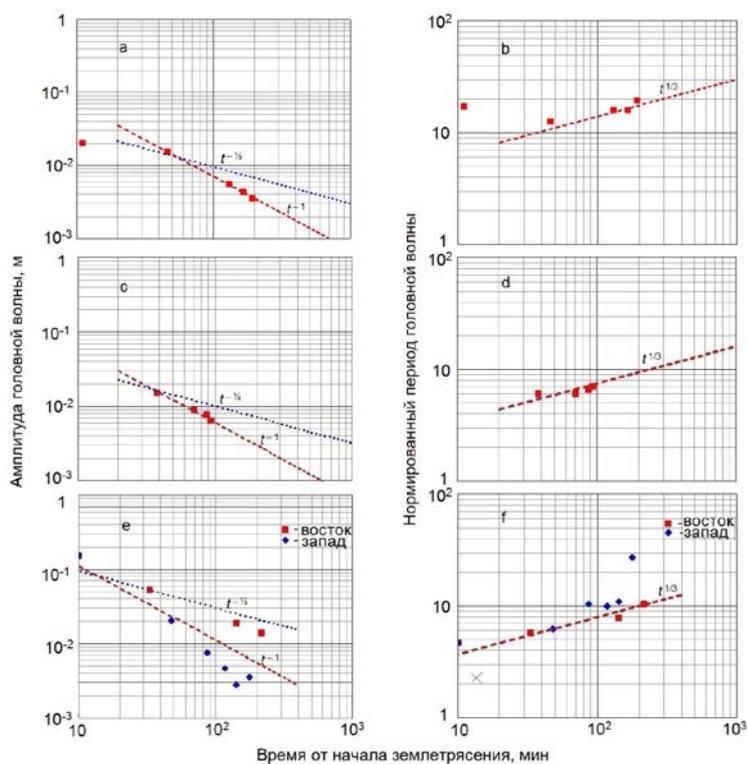


Рис. 1. Зависимости амплитуды и нормированного периода первой волны цунами от времени пробега: а, б – Симуширское цунами 15.01.2009 г., с, д – цунами 09.03.2011 г., е, ф – Аляскинское цунами 23.01.2018 г.

В первой серии результаты измерений амплитуды первых двух событий хорошо ложатся на зависимость от времени  $1/t$ , в последнем событии затухание амплитуды в восточном направлении происходит быстрее, чем  $1/t^{1/2}$ , в западном – быстрее, чем  $1/t$ . Для всех трех событий результаты

измерений периода хорошо ложатся на зависимость от времени  $t^{1/3}$ , что характерно для диспергирующих волн.

Рассчитанные по (3) времена дисперсии для первых двух событий малы и выходят за пределы поля рисунка, для третьего события  $t_{disp} \approx 13$  мин., что согласуется с результатами измерений, несмотря на то, что (3) выведено в условиях постоянной глубины бассейна.

Цунами, возбужденные землетрясениями с  $M=7.4 - 7.9$  при больших глубинах океана в очагах (1.47 – 6.96 км), являются диспергирующими волнами практически от очага.

Во второй серии для события 2006 г. (рис. 2 а, б) результаты измерений амплитуды хорошо ложатся на зависимость от времени  $1/t$ , периода – на линию  $t^{1/3}$  после 150 мин. Можно предположить, что при меньших временах от 10 до 150 мин. амплитуда уменьшается как  $1/t^{1/2}$ , период остается постоянным.

Можно полагать, что для события 2007 г. (рис. 2 с, d) результаты измерений амплитуды в интервале времени 20 – 150 мин. ложатся на зависимость от времени  $1/t^{1/2}$ , при  $t > 150$  мин. – на зависимость от времени  $1/t$ . Первый период для этого события почти постоянен в интервале 20 – 600 мин.

Рассчитанные времена дисперсии, равные 60 и 30 мин., являются заниженными, возможно, из-за несоответствия глубин в океане и в очаге.

Симуширское цунами 2006 г. (в результате землетрясения с  $M=8.3$ ) при глубине воды в очаге 3.52 км через 2.5 час. пробега, по-видимому, представляет собой диспергирующую волну.

Симуширское цунами 2007 г. ( $M=8.1$ ) при глубине воды в очаге 6.65 км через 2.5 час. пробега, по степени затухания амплитуды можно отнести к диспергирующим волнам, по другому показателю, длительности первого периода, оно относится, скорее, к длинным волнам.

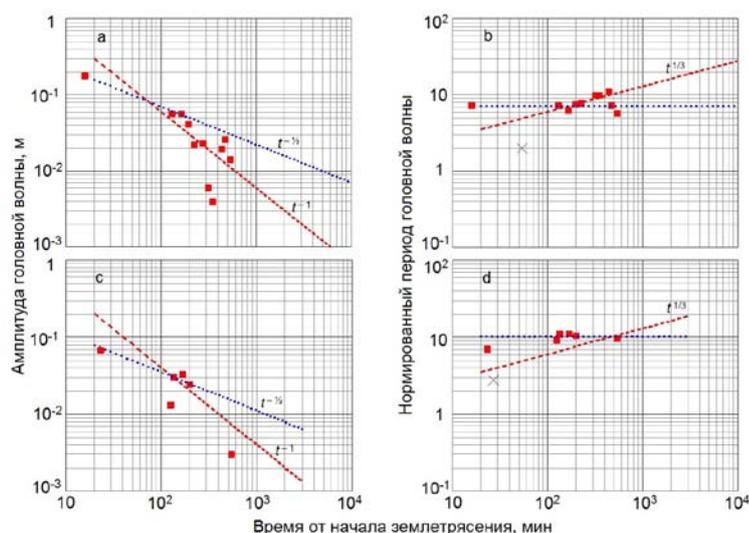


Рис. 2. Зависимости от времени пробега амплитуды и нормированного периода первой волны цунами: а, б – Симуширское цунами 15.11.2006 г., с, д – Симуширское цунами 13.01.2007 г.

В третьей серии в первом событии (Чилийское цунами 2014 г.,  $D_0 = 2110$  м) затухание амплитуды первого гребня от времени может быть описано зависимостью  $1/t$ . Во втором и третьем событиях (Перу, 2007 г.,  $D_0=140$  м и Чили, 2015 г.,  $D_0=300$  м) затухание до 1000 мин. может быть описано зависимостью  $1/t$ , после 1000 мин. затухание усиливается. В четвертом событии (Тохоку, 2011 г.,  $D_0=970$  м) степень затухания амплитуды находится в интервале  $1/2 - 1$ .

Для всех четырех событий нормированный первый период почти постоянен на протяжении времени распространения до 17 час. (1000 мин.). По этому показателю цунами во всех четырех событиях в течение 17 час. относятся к длинным волнам.

Для первых трех событий значения времен дисперсии являются заниженными, по-видимому, из-за различий в глубине океана и глубине в очаге. Для последнего события оценка времени дисперсии хорошо согласуется с результатами.

### Заключение

Предварительный анализ подтвердил, что на эволюцию цунами дисперсия действительно оказывает влияние. Время пробега (расстояние), начиная с которого проявляется дисперсия, зависит не только от магнитуды землетрясения, вызвавшего цунами, но и глубины океана в очаге цунами.

Цунами от землетрясений с  $M < 8$  при глубинах океана в очаговой области, сравнимых и превышающих среднюю глубину океана, являются диспергирующими практически от очага.

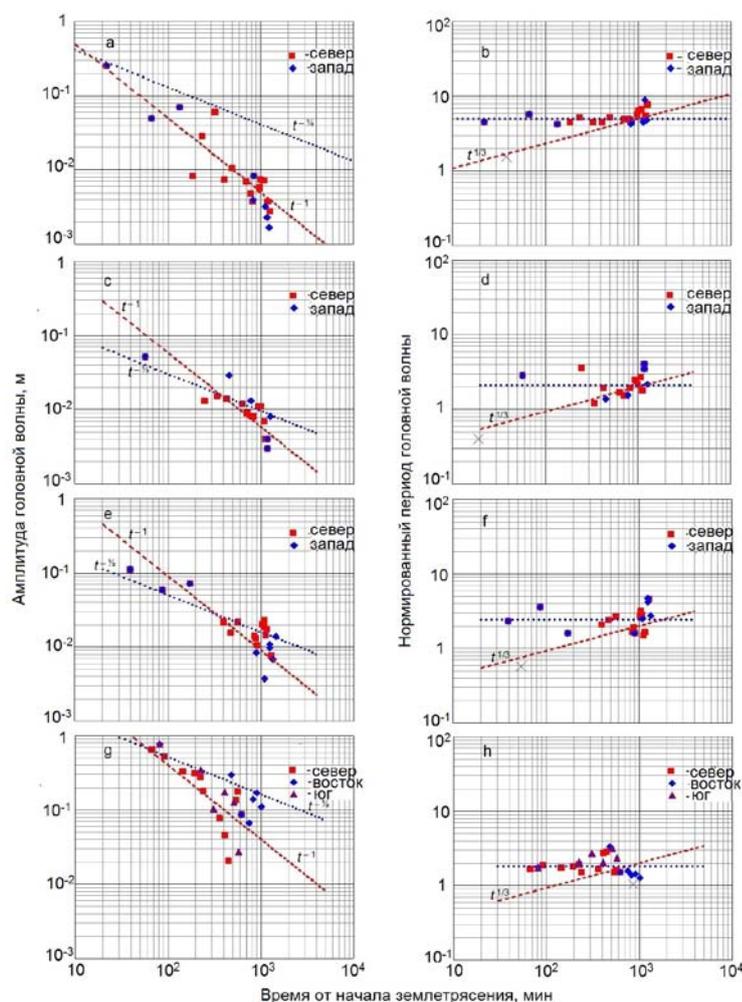


Рис. 3. Зависимости от времени пробега амплитуды и нормированного периода первой волны цунами: а, b – Чилийское цунами 01.04.2014 г., с, d – Перуанское цунами 15.08.2007 г., е, f – Чилийское цунами 16.09.2015 г., g, h – цунами Тохоку 11.03. 2011 г.

Цунами от землетрясений с  $M \geq 8$  при глубинах океана в очаговой области, сравнимых и превышающих среднюю глубину океана, становятся диспергирующими по прошествии 2.5 час. от возникновения.

Цунами от землетрясений с  $M=8.0 - 9.1$  при глубинах океана в очаговой области (140 – 2110 м), существенно меньших средней глубины океана, на протяжении 17 час. остаются длинными волнами без дисперсии.

Следует заметить, что Симуширское 2006 г. и Чилийское 2015 г. цунами с одинаковыми магнитудами (8.3), но с разными глубинами океана в очаге (3520 и 300 м), являются, соответственно, диспергирующими и длинными волнами. По-видимому, глубина океана в очаге оказывает существенное влияние на характер цунами: при одинаковой магнитуде землетрясения цунами, возникающие в очагах с меньшей глубиной океана, менее подвержены дисперсии.

Предложенный подход к оценке длины (времени) дисперсии может оказаться более адекватным, чем применявшийся ранее, однако требуется корректировка, учитывающая различия в глубинах океана и очаговой области цунами.

### Список литературы

1. Газарян Ю.Л. О поверхностных волнах в океане, возбуждаемых подводными землетрясениями // Акуст. ж. 1955. Т. 1. Вып. 3. С. 203–217.
2. Kanamori H., Anderson D.L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology // Bull. seismol. Soc. Am. 1975. V. 65. P. 1073–1095.
3. Mirchina N.P., Pelinovsky E.N. The Dependence of Tsunami Wave Period on the Source Dimensions // Marine Geodesy. 1981. V. 5, №3. P. 201–208.
4. Mirchina N.P., Pelinovsky E.N. Nonlinear and Dispersive Effects for Tsunami Waves in the Open Ocean // Int. J. Tsunami Society (Natural Science of Hazards). 1982. V. 2. No. 4. P. D1–D9.
5. Mirchina N.P., Pelinovsky E.N., Shavratsky S. Kh. Parameters of Tsunami Waves in the Source // Int. J. Tsunami Society (Natural Science of Hazards). 1982. V. 2. No. 4. P. B1–B7.