

Волны цунами: длинные или диспергирующие?

© 2020 Ю. П. Королев*, П. Ю. Королев

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: Yu_P_K@mail.ru

Реферат. Длинные и диспергирующие волны различным образом трансформируются при распространении в океане. Диспергирующие волны характеризуются более быстрым затуханием, нежели длинные волны. Исследовалось изменение амплитуды и периода головной волны в зависимости от времени пробега. Оценивались границы, до которых цунами можно рассматривать как длинную волну. Критериями принадлежности цунами к диспергирующим или недиспергирующим волнам являлись степень затухания амплитуды и степень увеличения длительности периода головной волны в зависимости от времени пробега. Фактические моменты времени, когда дисперсия начинает проявляться, сравнивались с различными теоретическими оценками длины (времени) дисперсии. 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. Оценки времен дисперсии и, соответственно, знание характера волн необходимы для адекватного применения тех или иных моделей для расчета. В одних случаях для расчета цунами, по-видимому, достаточно применения более простых уравнений длинных волн на «мелкой воде», в других – полных нелинейно-дисперсионных уравнений.

Ключевые слова: цунами, магнитуда землетрясения, длинные волны, диспергирующие волны, длина дисперсии, время дисперсии.

Для цитирования: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Волны цунами: длинные или диспергирующие? *Геосистемы переходных зон.* 2020. Т. 4, № 1. С. 26–34. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.026-034>

Are tsunamis long or dispersive waves?

Yury P. Korolev, Pavel Yu. Korolev*

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*E-mail: Yu_P_K@mail.ru

Abstract. Long and dispersive waves are transformed differently when propagating in the ocean. Dispersive waves are characterized by faster attenuation than long waves. The change in the amplitude and period of the head wave depending on the run time was studied. The boundaries to which a tsunami can be considered as a long wave were estimated. The criteria of whether a tsunami belongs to dispersive or non-dispersive (long) waves were the degree of attenuation of the amplitude and the degree of increase in the duration of the head wave period, depending on the run time. The actual moments of time when the dispersion begins to manifest were compared with different theoretical estimations of the dispersion length (time). The depth of the ocean in the focus has a significant influence on the tsunami nature: with the same earthquake magnitude, tsunamis that occur in foci with a lower depth of the ocean are less susceptible to dispersion. Estimates of the dispersion times and, consequently, knowledge of the nature of the waves are necessary for the adequate application of certain models for calculation. In some cases it seems sufficient to use simpler equations of long shallow-water waves to calculate tsunamis; in others, it is necessary to use complete nonlinear-dispersion equations.

Keywords: tsunami, magnitude of earthquake, long waves, dispersive waves, dispersion length, dispersion time.

For citation: Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. Are tsunamis long or dispersive waves? *Geosystems of Transition Zones,* 2020, vol. 4, no. 1. p. 26–34. (In Russian). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.026-034>

Введение

Вопрос о том, является ли цунами тектонического происхождения в океане длинной (недиспергирующей) или диспергирующей волной, в настоящее время не имеет определенного ответа. Под длинными волнами подразумеваются волны, описываемые уравнениями «мелкой воды». Под диспергирующими – достаточно длинные волны, скорость распространения которых зависит от длины волны. Другие виды дисперсии, как, например, дисперсия, обусловленная вращением Земли, другие эффекты, связанные со сжимаемостью воды, упругостью подстилающего дна, нами не рассматриваются, поскольку имеют больший порядок малости.

Знание характера волн необходимо для оценки в оперативном режиме степени опасности цунами, а также для адекватного применения в расчетах моделей – простых и быстроедействующих длинных волн или более сложных, учитывающих возможное проявление дисперсии. Длинные и диспергирующие волны различаются характером трансформации при распространении. Длинные распространяются с сохранением длительности периода головной волны и затуханием, обратно пропорциональным квадратному корню из пройденного расстояния. Диспергирующие волны распространяются с увеличением периода и более быстрым затуханием, обратно пропорциональным пройденному расстоянию.

Эффекты проявления дисперсии в реальных волнах цунами и условия применимости моделей детально не исследованы.

По зарегистрированной форме цунами трудно отличить диспергирующую волну от длинной. Известно [Владимиров, 1976], что в пространстве двух пространственных переменных решение волнового уравнения даже в однородной среде определяет только передний фронт волны. Задний фронт, в отличие от случая с тремя переменными, отсутствует. Колебания после прохождения основного возмущения продолжают достаточно долго, постепенно затухая. Влияние дисперсии проявляется спустя некоторое, достаточно большое время пробега. Неясно, когда начинает проявляться дисперсия, от каких характеристик источника цунами зависит этот момент.

В ряде работ предложены уравнения, описывающие распространение волн в приближениях, учитывающих дисперсионные, нелинейные эффекты, с учетом вращения Земли [Федотова, Хакимянов, 2010; и др.].

В работе [Gusev, Beisel, 2016] выполнено численное моделирование цунами от детальных сейсмических источников с применением уравнений недиспергирующих и диспергирующих волн. Исследовалось проявление дисперсии в зависимости от параметров сейсмического источника. Обнаружено, что волны от источников с большей магнитудой могут быть подвержены дисперсии в большей степени. Сравнение результатов численных экспериментов с натурными данными не проводилось.

В работе [Glinsdal et al., 2013] численно исследовалось поведение цунами от источника цунами Тохоку 2011 г. с использованием моделей диспергирующих и недиспергирующих волн. Показано, что дисперсия проявляется достаточно далеко от источника, на противоположной стороне Тихого океана в районе Центральной Америки в месте нахождения станции 43413 системы DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis – оценка и передача данных о цунами в океане) [NOAA Center for Tsunami Research].

Насколько оправданно применение достаточно сложных моделей диспергирующих волн по сравнению с применением моделей длинных волн для практического расчета сильных цунами?

На основании численного моделирования, без сравнения с натурными данными, затруднительно выявить и подтвердить закономерности трансформации цунами, проявления дисперсии в процессе распространения.

На рис. 1 представлена карта Тихого океана с обозначением эпицентров землетрясений, а также местоположений упоминающихся в тексте глубоководных станций измерения уровня океана системы DART.

Зарегистрированные формы трех цунами в океане на разных расстояниях от очагов приведены на рис. 2. За головной волной во всех случаях наблюдаются долго не прекращающиеся колебания. Визуально трудно определить, относятся ли представленные волны к диспергирующим или недиспергирующим.

В [Mirchina, Pelinovsky, 1982] 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 трансформацию волны оказывает влияние дисперсия: $L_{\text{disp}} \sim 0.06 \cdot \lambda^3 / D^2$, где λ – характерная длина волны цунами.

В работах [Mirchina, Pelinovsky, 1981; Mirchina et al., 1982] на основании фактических данных выведено соотношение, связывающее длину волны цунами с характерным горизонтальным размером (R) очага: $\lambda \sim 2.8 R$. С учетом этого длина дисперсии $L_{\text{disp}} \sim 1.3 R^3 / D^2$, а момент времени от возбуждения волны, когда проявляется дисперсия (время дисперсии),

$$t_{\text{disp}} \sim 1.3 R^3 / D^2 c, \quad (1)$$

где $c = (g \cdot D)^{1/2}$ – скорость длинных волн, g – ускорение свободного падения.

Дисперсионные эффекты, влияющие на распространение цунами, рассмотрены в статье [Газарян, 1955]. Исследовалась задача Коши–Пуассона о возбуждении волн от мгновенного однородного поднятия участка морского дна радиуса R_0 . Методом стационарной фазы получено асимптотическое решение, описывающее форму волны, согласно которому зависимость длительности первого периода от времени пробега t оценивается как $T = 3.91 D^{2/3} t^{1/3} / c^{2/3}$, амплитуда уменьшается со временем как $1/t$. Приведенные зависимости получены для модели распространения волн в бассейне постоянной глубины. Дисперсия волн описывается соотношением

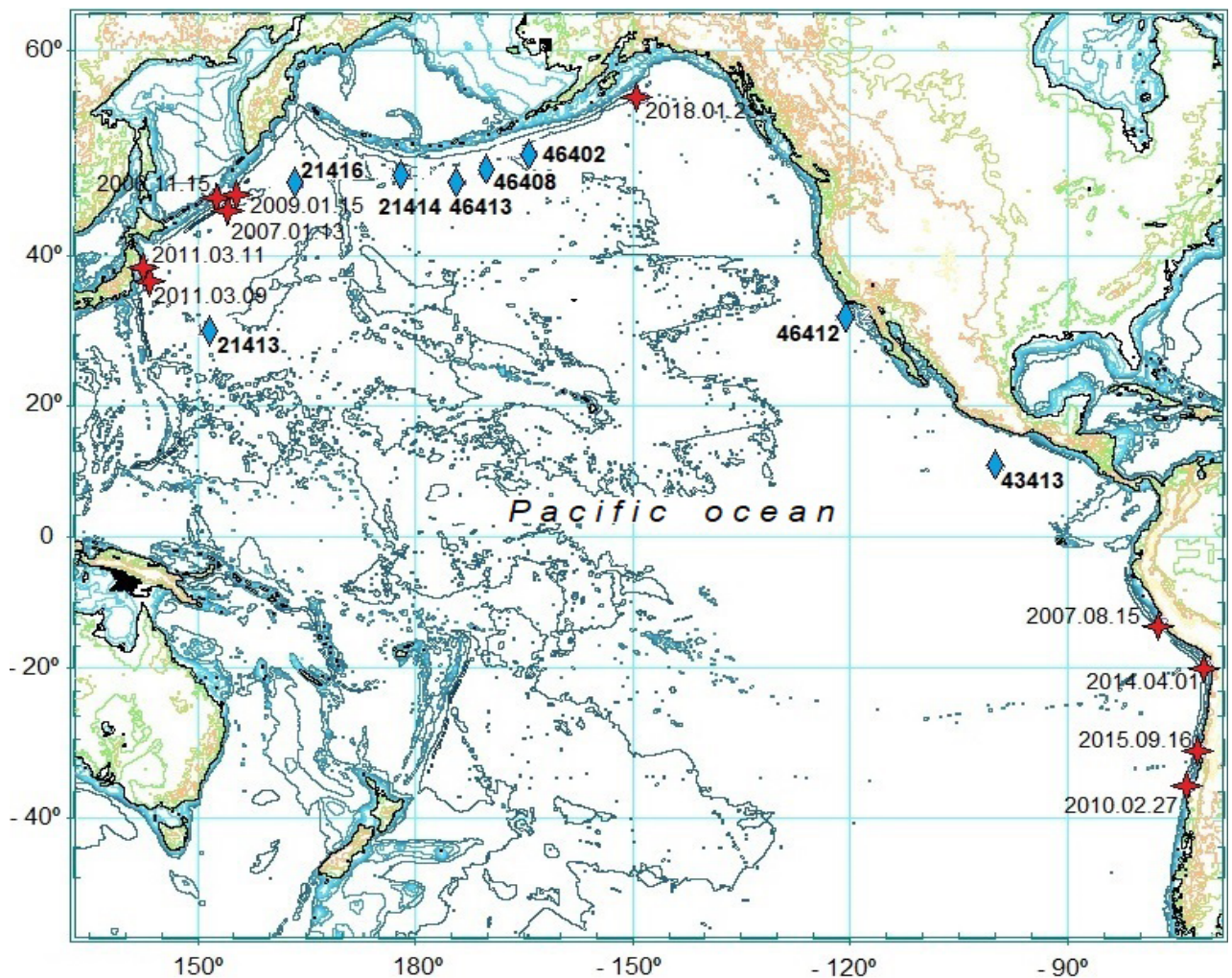


Рис. 1. Схема расположения станций системы DART. Звездочками отмечены эпицентры землетрясений с указанием даты; ромбами – положения станций системы DART.

Fig. 1. The scheme of location of DART stations. Asterisks mark the epicenters of earthquakes with the date. Rhombuses indicate the positions of DART stations.

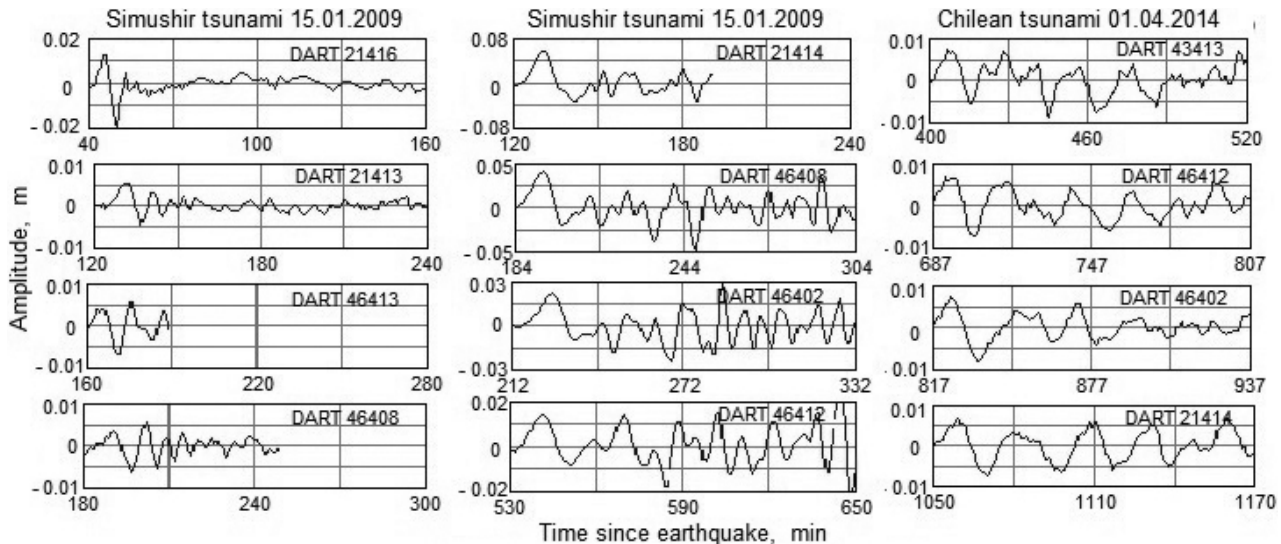


Рис. 2. Волновые формы цунами, зарегистрированные станциями системы DART в Тихом океане.

Fig. 2. Tsunami waveforms recorded by DART stations in the Pacific Ocean.

ем между частотой ω и волновым числом k :
 $\omega = (g/D)^{1/2} k \cdot D \cdot (1 - k^2 D^2/6)$.

В рамках этой же модели в статье [Korolev et al., 2019] предложено выражение для длины дисперсии исходя из иных, нежели в [Mirchina, Pelinovsky, 1982], соображений: $L_{disp} \sim 0.22 R_0^3/D^2$. Для нестационарных волн, распространяющихся над неоднородным дном, удобнее применять термин «время дисперсии»:

$$t_{disp} \sim 0.22 R_0^3/D^2 \cdot c. \quad (2)$$

Оценки по (1) и (2) различаются почти в 6 раз.

В работе предполагается, что приведенные выше зависимости от t амплитуды и периода головной волны, а также время дисперсии можно применить для оценок при описании распространения волн в океане переменной глубины.

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

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

Постановка задачи

Для анализа использовались цифровые данные станций DART об уровне океана [National Data Buoy Center]. Исследовались зависимости амплитуды гребня и периода первой волны от времени пробега цунами в Тихом океане до точки регистрации этими станциями.

Предполагалось, что проявление дисперсии зависит не только от магнитуды землетрясения, вызвавшего цунами, что очевидно, но и от глубины океана в очаге (эпицентре). Рассматриваемые события сгруппированы в три серии в зависимости от магнитуды землетрясения и глубины океана в эпицентре: малая магнитуда, но большая глубина океана в эпицентре; большая магнитуда и большая глубина океана в эпицентре; большая магнитуда, но малая глубина океана в эпицентре.

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. Выполнялись также оценки времен дисперсии по (1) и (2) при различном выборе характерного размера очага.

Результаты и обсуждение

Рассмотрены как сильные, так и слабые цунами, не причинившие ущерба, но зарегистрированные глубоководными станциями измерения уровня океана системы DART.

За время пробега принято время, прошедшее от момента начала землетрясения до момента прихода фронта волны в точку измерения. Длительность первого периода волны нормировалась на характерное время в очаге (нормирующий период):

$$T_{\text{norm}} = L/c_0, \quad (3)$$

где L – характерный размер очага цунами, c_0 – скорость длинных волн на глубине D_0 в эпицентре очага цунами: $c_0 = (g D_0)^{1/2}$.

Оценки характерных размеров очага цунами выполнялись на основе соотношений между магнитудой M землетрясения и максимальным и минимальным размерами очага цунами [Handbook... , 2001; Bolshakova, Nosov, 2011]: $\lg L_{\text{max}} = 0.5M - 1.9$ и $\lg L_{\text{min}} = 0.5M - 2.2$.

Для оценки времени дисперсии по (1) в качестве R принят эквивалентный радиус кругового источника, площадь которого равна площади очага: $R = 1/2 (L_{\text{max}} \cdot L_{\text{min}})^{1/2} = 10^{0.5M - 2.05}/2$. Для краткости такой способ оценки будет называться способом 1. Для оценок времен дисперсии по (2) в качестве R_0 приняты эквивалентный радиус кругового источника R (способ 2) или половина длины меньшей оси очага: $L = 10^{0.5M - 2.2}/2$ (способ 3).

В таблице приведены некоторые данные об очагах цунами: магнитуда землетрясения, характерный размер очага, глубина океана в очаге и характерный период возмущения.

Результаты исследования зависимости амплитуды гребня и периода первой волны цунами от времени пробега приведены ниже на рисунках 3–5.

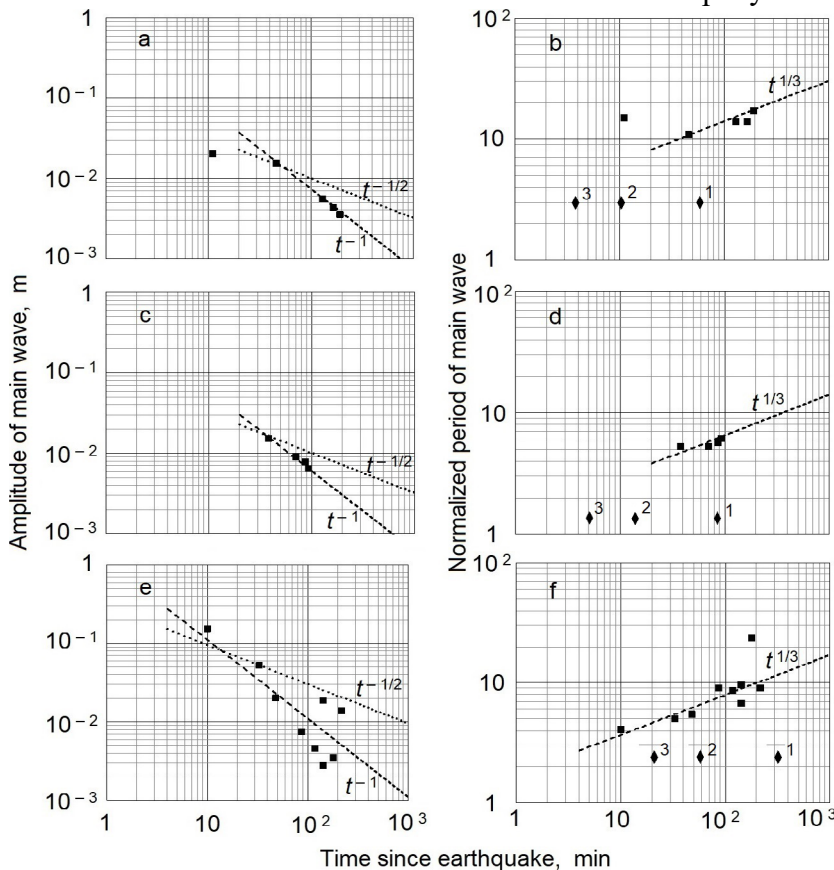


Рис. 3. Зависимости амплитуды (а, с, е) и нормированного периода первой волны цунами (b, d, f) от времени пробега (обозначены квадратами): а, b – Симуширское цунами 15.01.2009; с, d – слабое цунами 09.03.2011; е, f – Аляскинское цунами 23.01.2018. Здесь и далее ромбами отмечены времена дисперсии, рассчитанные способами 1, 2 и 3.

Fig. 3. The dependence of the amplitude (a, c, e) and the normalized period of the first tsunami wave (b, d, f) on the run time (squares): a, b – Simushir tsunami, 15.01.2009; c, d – weak tsunami 09.03.2011; e, f – Alaskan tsunami, 23.01.2018. Hereinafter rhombuses indicate the dispersion times calculated: 1 – by (2) using R , 2 – by (2) using R and 3 – by (2) using L .

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 – зависимость нормированного на (3) периода головной волны от времени пробега. В качестве L принята половина длины меньшей оси очага. Изображена зависимость $t^{1/3}$.

Времена дисперсии отмечены на рис. 3–5 ромбами с указанием способа оценок. Для оценок принята средняя глубина океана $D = 4400$ м.

Первая серия – цунами от землетрясений с небольшой магнитудой, но относительно большой глубиной океана в эпицентре: Симуширское 15.01.2009, $M = 7.4$, $D_0 = 6960$ м; слабое цунами вблизи о. Хонсю 09.03.2011, $M = 7.5$, $D_0 = 1470$ м; Аляскинское (вблизи о. Кодьяк) 23.01.2018, $M = 7.9$, $D_0 = 4560$ м (рис. 3). Мареограммы Симуширского цунами 2009 г. приведены на рис. 2.

Таблица. Данные об очагах цунами
Table. Data on tsunami centers

Географическое место очага цунами, дата	Координаты эпицентра: широта и долгота	Магнитуда	Половина длины меньшей оси очага L , км	Глубина океана в эпицентре, D_0 , м	Нормирующий период по L , $T_{\text{норм}}$, мин
Симушир, 15.01.2009	46.857; 155.154	7.4	15.8	6960	1.0
Хонсю, 09.03.2011	38.435; 142.842	7.5	17.7	1470	2.5
Кодьяк, 23.01.2018	56.046; 149.073	7.9	28.1	4560	2.2
Симушир, 15.11.2006	46.592; 153.266	8.3	44.6	3520	3.0
Симушир, 13.01.2007	46.243; 154.524	8.1	35.4	6650	2.3
Чили, 01.04.2014	-19.610; -70.769	8.2	39.7	2110	4.6
Перу, 15.08.2007	-13.386; -76.603	8.0	31.5	140	14.2
Чили, 16.09.2015	-31.573; -71.674	8.3	44.6	300	13.7
Тохоку, 11.03.2011	38.297; 142.373	9.1	111.9	970	19.1

Примечание. Координаты эпицентров и магнитуды землетрясений взяты из [National Centers for Environmental Information].

В первой серии результаты измерений амплитуды первых двух цунами хорошо ложатся на зависимость от времени $1/t$, в последнем событии затухание амплитуды в восточном направлении происходит как $1/t$, в западном – быстрее, чем $1/t$. Для всех трех событий результаты измерений периода головной волны хорошо ложатся на зависимость от времени $t^{1/3}$, что характерно для диспергирующих волн.

По обоим показателям, степени затухания амплитуды и степени увеличения длительности периода головной волны, цунами, возбужденные землетрясениями с $M = 7.4-7.9$ при больших глубинах океана в очагах (1.47–6.96 км), становятся диспергирующими волнами практически от очага (через 10–20 мин пробега).

Наиболее реалистичными для первых двух событий являются оценки времен дисперсии способом 2, для последнего – способом 3. Оценки времени дисперсии способом 1 для всех событий являются завышенными.

Вторая серия – цунами от землетрясений с большой магнитудой и большой глубиной океана в эпицентре: Симуширское 15.11.2006, $M = 8.3$, $D_0 = 3520$ м; Симуширское 13.01.2007, $M = 8.1$, $D_0 = 6650$ м (рис. 4).

Во второй серии для события 2006 г. (рис. 4 а, б) результаты измерений амплитуды хорошо ложатся на зависимость от времени $1/t$, периода – на линию $t^{1/3}$ после 200 мин. Можно предположить, что при меньших временах от 10 до 200 мин амплитуда

уменьшается как $1/t^{1/2}$, период остается постоянным. Мареограммы этого цунами изображены на рис. 2.

Можно полагать, что для события 2007 г. (рис. 4 с, d) результаты измерений амплитуды в интервале времени 20–100 мин ложатся на зависимость от времени $1/t^{1/2}$, при $t > 100$ мин – на зависимость от времени $1/t$. Первый период для этого события почти постоянен в интервале 20–600 мин.

Симуширское цунами 2006 г. (в результате землетрясения с $M = 8.3$) при глубине воды в очаге 3.52 км через 3 ч пробега представляет собой диспергирующую волну.

Симуширское цунами 2007 г. ($M = 8.1$) при глубине воды в очаге 6.65 км через 1.5 ч

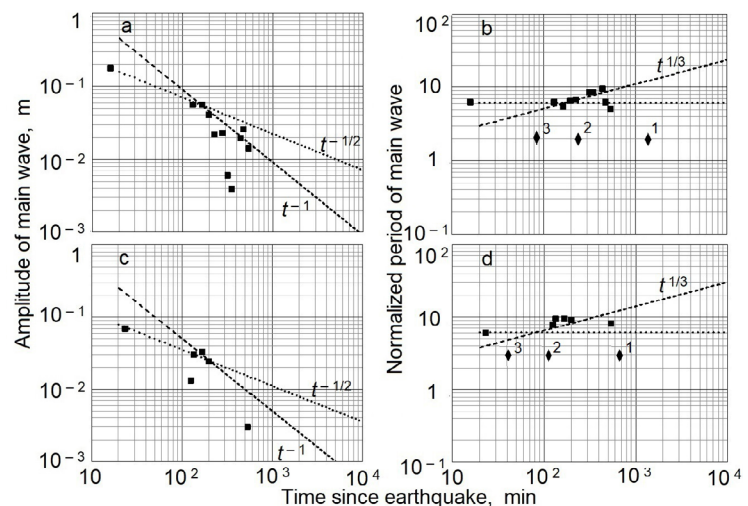


Рис. 4. Зависимости амплитуды (а, с) и нормированного периода первой волны цунами (б, d) от времени пробега (обозначены квадратами): а, б – Симуширское цунами 15.11.2006; с, d – Симуширское цунами 13.01.2007.

Fig. 4. The dependence of the amplitude (a, c) and the normalized period of the first tsunami wave (b, d) on the run time (squares): a, b – Simushir tsunami, 15.11.2006, c, d – Simushir tsunami, 13.01.2007.

пробега по степени затухания амплитуды можно отнести к диспергирующим волнам, а по другому показателю, длительности первого периода, оно относится, скорее, к длинным волнам. Следует отметить, что цунами 2007 г., в отличие от других, рассмотренных в работе, имело головную волну отрицательной амплитуды.

В этой серии, так же как и в первой, наиболее реалистичны оценки времен дисперсии способом 2. Оценки времен дисперсии способом 1 для всех событий являются завышенными.

Моменты начала проявления дисперсии цунами первой и второй серий хорошо совпа-

дают с рассчитанными способом 2 временами дисперсии, несмотря на то что выражения для последних выведены в рамках идеализированной модели распространения волн над дном постоянной глубины.

Третья серия – цунами от землетрясений с большой магнитудой, но с небольшой глубиной океана в эпицентре: Чилийское 01.04.2014, $M = 8.2$, $D_0 = 2110$ м; Перуанское 15.08.2007, $M = 8.0$, $D_0 = 140$ м; Чилийское 16.09.2015; $M = 8.3$, $D_0 = 300$ м; Тохоку 11.03.2011, $M = 9.1$, $D_0 = 970$ м (рис. 5).

В первом событии этой серии (Чилийское цунами 2014 г.) (рис. 5 а и б) зависимость амплитуды первого гребня от времени может быть описана как $1/t$. Мареограммы представлены на рис. 2.

Во втором и третьем событиях (Перу, 2007 г., рис. 5 с, d, и Чили, 2015 г., рис. 5 е, f) затухание до 1000 мин может быть описано зависимостью $1/t$, после 1000 мин оно усиливается.

В четвертом событии (Тохоку, 2011 г., рис. 5 g и h) степень затухания амплитуды находится в интервале $1/2 - 1$.

Для второго–четвертого событий нормированный первый период почти постоянен и равен примерно 2 нормирующим периодам на протяжении времени распространения до ~ 17 ч (100 мин). В первом событии нормированный первый период почти постоянен и равен примерно 5 нормирующим периодам на протяжении всего времени распространения. По этому показателю цунами всех четырех событий в течение 17 ч относятся к длинным волнам.

Более близки к реальности оценки времен дисперсии способом 1 для первых трех событий и способом 3 для последнего цунами. Оценки времен дисперсии способами 2 и 3 для первых трех событий являются заниженными,

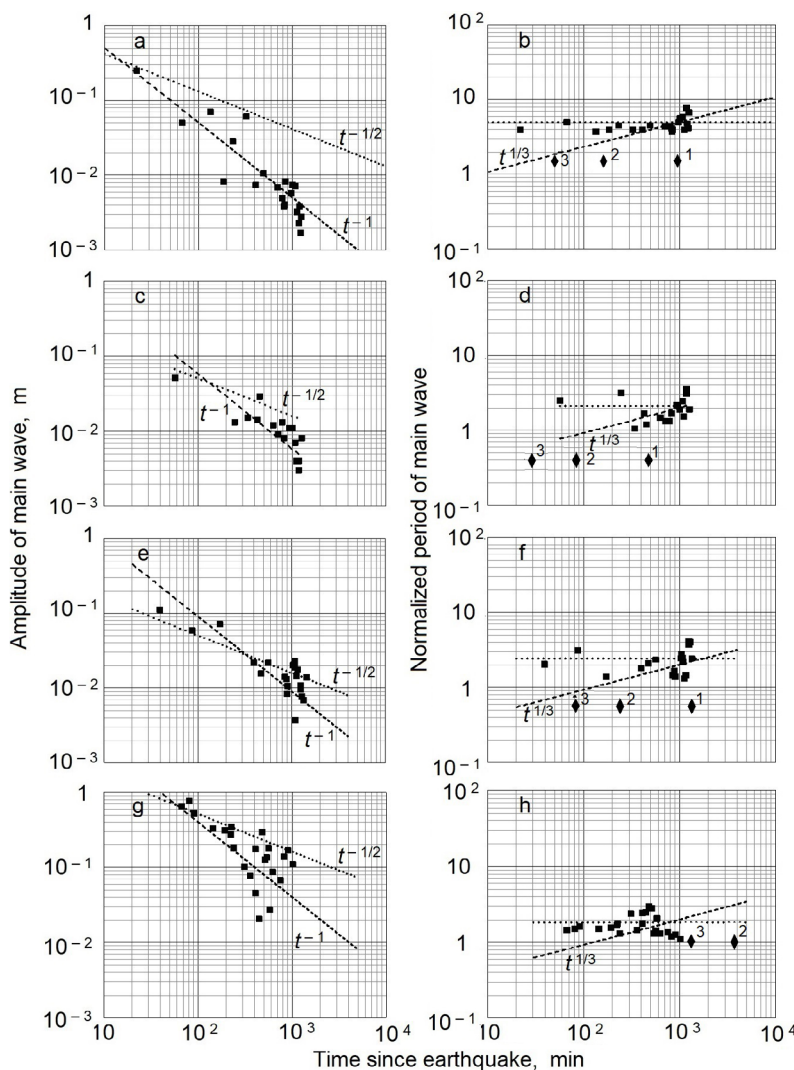


Рис. 5. Зависимости амплитуды (а, с, е, g) и нормированного периода первой волны цунами (b, d, f, h) от времени пробега (обозначены квадратами): а, b – Чилийское цунами 01.04.2014; с, d – Перуанское 15.08.2007; е, f – Чилийское 16.09.2015; g, h – цунами Тохоку 11.03. 2011.

Fig. 5. The dependence of the amplitude (a, c, e, g) and the normalized period of the first tsunami wave (b, d, f, h) on the run time (squares): а, b – Chilean tsunami, 01.04.2014, с, d – Peruvian tsunami, 15.08.2007, е, f – Chilean tsunami, 16.09.2015, g, h – Tohoku tsunami, 11.03. 2011.

а способами 1 и 2 для последнего события дают величины, превышающие времена пробега цунами через океан.

Неоднозначность оценок времен дисперсии разными способами для цунами третьей серии не позволяет сделать выбор в пользу какого-либо из предложенных. Это связано, видимо, с тем, что расчетные формулы получены для модели распространения волн в бассейне постоянной глубины, в то время как глубины океана в очагах цунами сильно отличаются от средней глубины океана.

Следует отметить, что Симуширское 2006 г. и Чилийское 2015 г. цунами с одинаковыми магнитудами ($M = 8.3$) произошли в очагах с разными глубинами океана (3520 и 300 м соответственно). Первое из них становится диспергирующей волной через 3 ч, второе – остается длинной волной в течение практически всего времени распространения.

Заключение

Качественный анализ подтвердил, что на эволюцию цунами в океане дисперсия действительно оказывает влияние. Результаты обработки данных 9 рассмотренных цунами позволяют сделать предварительные выводы.

На основании фактических данных показано, что цунами, возбуждаемые землетрясениями с магнитудами $M \leq 8.3$, возникающие в очаговых областях с глубинами 3.52–6.96 км, сравнимыми и превышающими среднюю глубину океана, становятся диспергирующими волнами при временах пробега 10 мин – 3 ч. Слабое цунами 09.03.2011 ($M = 7.4$) с относительно небольшой глубиной океана в очаге $D_0 = 1.47$ км также становится диспергирующей волной после 40 мин пробега. Оценки времен дисперсии выполнены в соответствии с выражением $t_{\text{disp}} \sim 0.22R^3 / D^2c$, где R – эквивалентный радиус кругового источника, рассчитанный исходя из магнитуды землетрясения, D – глубина океана, c – скорость длинных волн в океане. Они хорошо совпадают с временами проявления дисперсии, полученными при анализе реальных данных.

Показано, что цунами от землетрясений с $M = 8.0$ – 9.1 при глубинах океана в очаговой

области (140–2110 м), существенно меньших средней глубины океана, при пробеге практически до противоположного берега океана (на протяжении 17 ч) остаются длинными волнами без дисперсии. Оценки времен дисперсии по формулам, выведенным в рамках модели распространения волн в бассейне с постоянной глубиной, в этой ситуации дают неоднозначные результаты. В формулах не учитывается существенная разница глубин в очаге цунами и в океане.

Вывод выражений для оценки времени дисперсии при распространении в океане с неоднородным дном не производился, влияние заметных различий в глубинах океана и в очаге цунами на оценки времен дисперсии теоретически не исследовалось.

Момент времени проявления дисперсии волны цунами зависит не только от магнитуды землетрясения, вызвавшего цунами, но и от глубины океана в очаге: при одинаковой магнитуде землетрясения цунами, возникающие в очагах с меньшей глубиной океана, менее подвержены дисперсии.

Расчеты цунами в результате землетрясений с $M \leq 8.3$, возникающих в очаговых областях с глубинами, сравнимыми и превышающими среднюю глубину океана, в оперативном режиме в ближней зоне до времен пробега, определяемых длиной дисперсии, могут выполняться на основе модели длинных волн на «мелкой воде». Для дальней зоны обоснованно применение дисперсионной модели.

Для расчетов цунами от землетрясений с $M = 8.0$ – 9.1 при глубинах океана в очаговой области, существенно меньших средней глубины океана, возможно применение модели «мелкой воды» в течение всего времени распространения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и предложения, которые были учтены при доработке статьи.

Работа выполнена в рамках госзадания ИМГиГ ДВО РАН № АААА-А18-118012290123-8 «Наводнения на морских берегах: мониторинг, моделирование, прогноз».

Список литературы

1. Владимиров В.С. **1976**. *Уравнения математической физики*. М.: Наука, 528 с.
2. Газарян Ю.Л. **1955**. О поверхностных волнах в океане, возбуждаемых подводными землетрясениями. *Акустический журнал*, 1(3): 203–217.
3. Федотова З.И., Хахимзянов Г.С. **2010**. Нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды на вращающейся сфере. *Вычислительные технологии*, 15(3): 135–145.
4. Bolshakova A.V., Nosov M.A. **2011**. Parameters of tsunami source versus earthquake magnitude. *Pure Appl. Geophys*, 168: 2023–2031. doi:10.1007/s00024-011-0285-3
5. Glimsdal S., Pedersen G.K., Harbitz C.B., Lovholt F. **2013**. Dispersion of tsunamis: does it really matter? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 1507–1526. doi:10.5194/nhess-13-1507-2013.
6. Gusev O., Beisel S. **2016**. Tsunami dispersion sensitivity to seismic source parameters. *Science of Tsunami Hazards*, 35(2): 84–105.
7. *Handbook for tsunami forecast in the Japan Sea*. **2001**. Earthquake and Tsunami Observation Division, Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency, 22 p.
8. Korolev P.Yu., Korolev Yu.P., Loskutov A.V. **2019**. Analysis of the main characteristics of tsunamis based on data from deep-ocean stations. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324(012017). doi:10.1088/1755-1315/324/1/012017.
9. Mirchina N.P., Pelinovsky E.N. **1981**. The dependence of tsunami wave period on the source dimensions. *Marine Geodesy*, 5(3): 201–208.
10. Mirchina N.P., Pelinovsky E.N. **1982**. Nonlinear and dispersive effects for tsunami waves in the open ocean. *Int. J. Tsunami Society (Natural Science of Hazards)*, 2(4): D1–D9.
11. Mirchina N.P., Pelinovsky E.N., Shavratsky S. Kh. **1982**. Parameters of tsunami waves in the source. *Int. J. Tsunami Society (Natural Science of Hazards)*, 2(4): B1–B7.
12. *National Centers for Environmental Information*. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7> (дата обращения: 25.01.2020).
13. *National Data Buoy Center*. URL: <https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml> (дата обращения: 17.12.2019).
14. *NOAA Center for Tsunami Research*. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart> (дата обращения: 17.12.2019).

Об авторах

КОРОЛЕВ Юрий Павлович (ORCID 0000-0002-7068-7341), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, КОРОЛЕВ Павел Юрьевич (ORCID 0000-0003-3741-7654), младший научный сотрудник – лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск

References

1. Bolshakova A.V., Nosov M.A. **2011**. Parameters of tsunami source versus earthquake magnitude. *Pure Appl. Geophys*, 168: 2023–2031. doi:10.1007/s00024-011-0285-3.
2. Fedotova Z.I., Khakimzianov G.S. **2010**. [Nonlinear-dispersive shallow water equations on the rotating sphere]. *Vychislitel'nye tekhnologii [Computing technologies]*, 15(3): 135–145. (In Russ.).
3. Gazarian Iu.L. **1955**. [About the ocean surface waves, excited by the undersea earthquakes]. *Akusticheskij zhurnal = Acoustical Physics*, 1(3): 203–217. (In Russ.).
4. Glimsdal S., Pedersen G.K., Harbitz C.B., Lovholt F. **2013**. Dispersion of tsunamis: does it really matter? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 1507–1526. doi:10.5194/nhess-13-1507-2013
5. Gusev O., Beisel S. **2016**. Tsunami dispersion sensitivity to seismic source parameters. *Science of Tsunami Hazards*, 35(2): 84–105.
6. *Handbook for tsunami forecast in the Japan Sea*. **2001**. Earthquake and Tsunami Observation Division, Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency, 22 p.
7. Korolev P.Yu., Korolev Yu.P., Loskutov A.V. **2019**. Analysis of the main characteristics of tsunamis based on data from deep-ocean stations. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324(012017). doi:10.1088/1755-1315/324/1/012017
8. Mirchina N.P., Pelinovsky E.N. **1981**. The dependence of tsunami wave period on the source dimensions. *Marine Geodesy*, 5(3): 201–208.
9. Mirchina N.P., Pelinovsky E.N. **1982**. Nonlinear and dispersive effects for tsunami waves in the open ocean. *Int. J. Tsunami Society (Natural Science of Hazards)*, 2(4): D1–D9.
10. Mirchina N.P., Pelinovsky E.N., Shavratsky S. Kh. **1982**. Parameters of tsunami waves in the source. *Int. J. Tsunami Society (Natural Science of Hazards)*. 2(4): B1–B7.
11. *National Centers for Environmental Information*. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7> (access: 25.01.2020).
12. *National Data Buoy Center*. URL: <https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml> (access: 17.12.2019).
13. *NOAA Center for Tsunami Research*. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart> (access: 17.12.2019).
14. Vladimirov V.S. **1976**. [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 528 p. (In Russ.).