

УДК 551.466

ВКЛАД ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДНА В ГЕНЕРАЦИЮ ЦУНАМИ У ПОБЕРЕЖЬЯ ЯПОНИИ 11 МАРТА 2011 г.

© 2011 г. М. А. Носов, С. В. Колесов, член-корреспондент РАН Б. В. Левин

Поступило 17.05.2011 г.

11 марта 2011 г. в 05 ч 46 мин 24 с (UTC) в Тихом океане восточнее о. Хонсю произошло землетрясение, которое явилось беспрецедентным по своей силе для региона Японских островов. По данным Геологической службы США эпицентр сейсмического события (38.297° с.ш., 142.372° в.д.) располагался в 129 км к востоку от города Сендай, глубина гипоцентра составила 30 км, момент-магнитуда $M_w = 9.0$.

Несмотря на то что Японское метеорологическое агентство (JMA) объявило тревогу цунами всего через 3 мин после начала землетрясения, а первая сильная волна достигла ближайшего побережья примерно через 30 мин, последствия цунами оказались ужасающими. Опасность катастрофы была явно недооценена. Во многих пунктах ближайшего к очагу цунами побережья о. Хонсю высоты заплеска превышали 20 м. А в порту г. Мияко высота заплеска достигла рекордной величины 37.9 м. Количество жертв и материальный ущерб еще предстоит уточнить. На момент написания статьи, согласно официальному бюллетеню ЮНЕСКО № 23 от 2 мая 2011 г., в результате катастрофы погибли 14728 человек и 10808 человек пропали без вести.

В последние годы в Мировом океане развернута сеть глубоководных регистраторов цунами (DART, Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis), включающая в настоящее время около 50 станций. В их число входит и российская станция DART 21401, которая была установлена вблизи Южных Курильских островов в августе 2010 г.

Вдали от берегов, на больших глубинах, сигнал цунами не искажается резонансными и нелинейными эффектами, характерными для распространения волн в мелководной прибрежной зоне и при их накате на берег. Поэтому сигнал, зарегистри-

рованный глубоководной станцией, в большей степени отражает особенности очага цунами, чем запись берегового мареографа. Неудивительно, что сопоставление расчетных и измеренных волн [1] оказывается наиболее удачным именно для глубоководных измерителей. Следовательно, можно пойти дальше и попытаться выявить особенности источника цунами, сопоставляя данные глубоководных регистраторов и результаты численного моделирования.

Основной физический механизм генерации цунами землетрясением — это вытеснение значительного объема воды остаточной деформацией дна океана. Если дно горизонтально, то за вытеснение ответственна только вертикальная компонента деформации. Но в общем случае неровного (наклонного) дна горизонтальная компонента деформации также вносит вклад в вытеснение воды и, следовательно, в формирование цунами. Цель настоящей работы — показать важность учета горизонтальной компоненты деформации дна для точного расчета волны цунами, вызванной землетрясением 11 марта 2011 г.

При описании эволюции волн цунами сейсмо-тектонического происхождения сейсмическую и гидродинамическую части задачи принято рассматривать отдельно [2]. Основанием для такого разделения служит тот факт, что к цунами переходит очень незначительная доля энергии землетрясения — до 2% [3]. Следовательно, можно предположить, что наличие водного слоя слабо сказывается на движениях дна во время землетрясения. Кроме того, существенное превосходство скорости вспарывания разрыва (~ 3000 м/с) по сравнению со скоростью длинных гравитационных волн в океане ($\sqrt{gH} \approx 200$ м/с при глубине океана $H = 4000$ м и ускорении силы тяжести $g = 9.8$ м/с²) позволяет в первом приближении считать процесс деформации дна мгновенным. Мгновенность в данном случае означает, что продолжительность деформации дна мала по сравнению со временем распространения длинной волны на расстояние, равное горизонтальной протяженности очага.

*Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Южно-Сахалинск
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова*

На первом, “сейсмологическом этапе”, пренебрегая наличием водного слоя, рассчитывают остаточные деформации дна, сформировавшиеся в результате землетрясения. Для этой цели применяют аналитическое решение статической задачи теории упругости (формулы Окада), полученное в работе [4] для упругого безграничного полупространства и подвижки, которая является однородной вдоль прямоугольной площадки разрыва.

В последние годы в практику расчета остаточных деформаций дна все в большей степени входит учет структуры подвижки вдоль площадки разрыва. Для этой цели площадка разрыва разбивается на некоторое количество элементарных прямоугольных подобластей, для каждой из которых определяется свой вектор подвижки. Данные о структуре подвижки для сильных землетрясений в цифровом формате доступны на сервере Геологической службы США (<http://earthquake.usgs.gov/>). Итоговое векторное поле деформации дна рассчитывается как суперпозиция вкладов от элементарных прямоугольных подобластей с использованием формул Окада.

На втором, “гидродинамическом этапе” предполагают, что водный слой является несжимаемым, а деформация дна происходит мгновенно. Вытеснение некоторого объема воды деформацией дна вызывает отклонение свободной поверхности водного слоя от исходного равновесного положения, и на поверхности океана формируется возмущение, именуемое “начальное возвышение”. В практических схемах расчета цунами начальное возвышение традиционно полагают равным вертикальной остаточной деформации дна. Начальное возвышение при нулевом поле скорости течения служит в качестве начальных условий в задаче распространения цунами.

Описанный выше традиционный способ постановки начальных условий нашел широкое применение в численном моделировании реальных событий, так как он более-менее адекватно воспроизводит основной механизм генерации цунами – вытеснение воды деформацией дна [1, 2, 5–7].

Несовершенство традиционного способа описания генерации цунами землетрясением обязано, по меньшей мере, двум причинам. Во-первых, в момент окончания деформации дна отклонение водной поверхности от равновесного положения и вертикальная остаточная деформация не будут равными даже в случае ровного горизонтального дна и мгновенной подвижки: форма начального возвышения воды будет гладкой по сравнению с формой деформации дна [7–9]. Причина этого заключается в следующем. Из аналитического решения задачи о генерации цунами в бассейне постоянной глубины малыми вертикальными де-

формациями дна следует, что пространственный спектр смещения водной поверхности промодулирован быстро затухающей функцией $1/chkH$, где k – волновое число [2, 7]. Следовательно, движения дна не могут создать на поверхности возмущения с длиной волны $\lambda < H$. В этой связи, прямой перенос вертикальной деформации дна на водную поверхность приводит к искусственному насыщению спектра цунами коротковолновыми компонентами, которые не существуют в реальности. Во-вторых, в случае наклонного дна горизонтальная компонента деформации также приводит к вытеснению воды и, следовательно, вносит вклад в начальное возвышение [7, 9, 10].

В работе [9] нами было показано, что в случае, когда деформацию дна можно считать мгновенной, исходная трехмерная гидродинамическая задача, сформулированная в рамках линейной потенциальной теории, может быть сведена к следующей статической задаче:

$$\Delta F = 0, \quad (1)$$

$$F = 0, \quad z = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}} = (\boldsymbol{\eta}, \mathbf{n}), \quad z = -H(x, y), \quad (3)$$

где F – потенциал смещения, $\boldsymbol{\eta} \equiv (\eta_x, \eta_y, \eta_z)$ – векторное поле остаточной деформации дна, $\mathbf{n} \equiv (n_x, n_y, n_z)$ – вектор нормали к поверхности дна. Начальное возвышение связано с потенциалом следующей простой формулой:

$$\xi_0(x, y) = \left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_{z=0}. \quad (4)$$

Начальное возвышение, рассчитанное из решения задачи (1)–(3), не только учитывает вклад всех трех компонент вектора деформации дна, но и оказывается достаточно гладким за счет естественного удаления из спектра коротковолновых компонент, которые, подчеркнем, в принципе не могут быть созданы на поверхности воды движениями дна.

Прямое численное решение уравнений (1)–(3) представляет собой достаточно трудоемкую вычислительную задачу. Поэтому для практических расчетов разработан аналитико-численный алгоритм, подробное описание которого можно найти в работе [7].

При численном моделировании цунами 11.03.2011 г. остаточные деформации дна в очаге рассчитывали по данным о структуре подвижки, представленным на сайте Геологической службы США. В соответствии с этой моделью угол падения площадки разрыва – $\text{dip} = 10.21^\circ$, угол простирания – $\text{strike} = 194.43^\circ$, максимальная величина подвижки – $\text{slip} = 33.47$ м. Площадка раз-

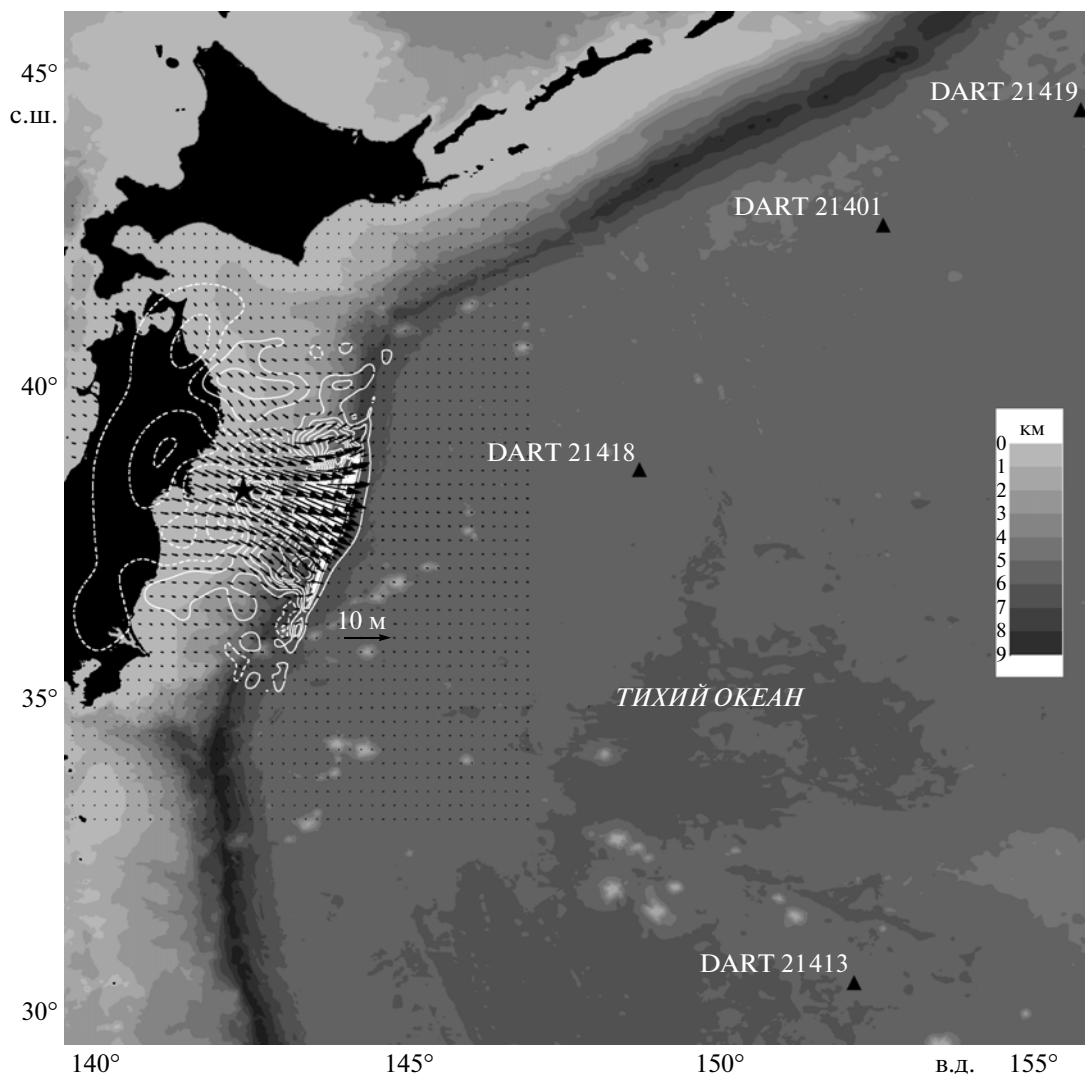


Рис. 1. Центральный фрагмент расчетной области. Положение эпицентра землетрясения 11.03.2011 г. показано звездочкой, положение глубоководных станций DART – треугольниками. Белые изолинии – вертикальная деформация дна (сплошная линия – поднятие, пунктирная – опускание, интервал 0.5 м). Черные стрелки – векторное поле горизонтальной деформации, горизонтальная стрелка с подписью 10 м – масштаб деформации.

рыва была разбита на 325 подобластей (25×13 элементов по простиранию и по падению соответственно).

Результаты расчетов остаточной деформации дна представлены на рис. 1. Вертикальная компонента деформации показана белыми изолиниями с шагом 0.5 м (сплошная линия – подъем, пунктирная – опускание). Векторы горизонтальной деформации изображены черными стрелками. Максимальное поднятие дна составило 8.95 м, максимальное опускание – 1.98 м. Горизонтальная деформация достигала 17.3 м. Видно, что значительные горизонтальные деформации приурочены к склону Курило-Камчатского глубоководного желоба. Смещение западного склона глубоководного желоба в восточном направлении, очевидно,

должно было обеспечить дополнительный положительный вклад в начальное возвышение.

На следующем этапе по векторному полю деформации дна и распределению глубин в районе источника (1-минутный цифровой атлас GEBCO, British Oceanographic Data Centre) из решения задачи (1)–(3) рассчитывали начальное возвышение в очаге цунами. Результаты расчетов начального возвышения с учетом всех трех компонент векторного поля деформации дна показаны на рис. 2а. Максимальное поднятие уровня воды в очаге цунами достигает 9.48 м, максимальное опускание – 1.90 м. Гипотетическое начальное возвышение, сформированное только горизонтальными компонентами деформации дна, изображено на рис. 2б. В этом случае максимальное поднятие достигает 2.07 м, а опускание – 0.30 м.

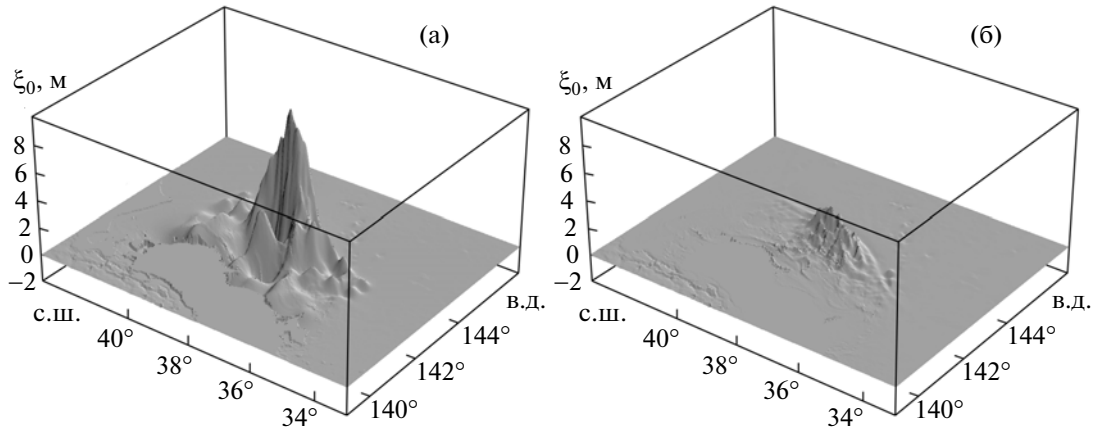


Рис. 2. Начальное возвышение в очаге цунами 11.03.2011 г., рассчитанное с учетом вертикальной и горизонтальной деформации дна (а) и с учетом только горизонтальной деформации (б).

Если судить по максимальной величине поднятия, то вклад горизонтальной деформации в начальное возвышение составляет 22%, что, несомненно, является значимой величиной.

Обладая данными о векторном поле деформации дна и о распределении глубин, несложно рассчитать полный объем воды, вытесненный в очаге цунами,

$$V_{xyz} = \iint (\eta_x n_x + \eta_y n_y + \eta_z n_z) dx dy \quad (5)$$

и вклад в эту величину горизонтальных деформаций наклонного дна

$$V_{xy} = \iint (\eta_x n_x + \eta_y n_y) dx dy. \quad (6)$$

Интегрирование в формулах (5) и (6) велось по области от 139° до 147° в.д. и от 33° до 43° с.ш. с учетом сферичности поверхности Земли. В результате было получено, что деформация дна при землетрясении 11.03.2011 г. вытеснила $V_{xyz} = 99.6 \text{ км}^3$ воды. Вклад в эту величину горизонтальных деформаций составил $V_{xy} = 19.8 \text{ км}^3$ (около 20%).

Помимо вытесненного объема, интересно также оценить энергию волны цунами как потенциальную энергию начального возвышения в очаге. Для этой цели воспользуемся формулой

$$E = 0.5 \rho g \iint \xi_0^2 dx dy, \quad (7)$$

где ρ – плотность морской воды (в расчетах принимаем $\rho = 1030 \text{ кг/м}^3$). Если начальное возвышение рассчитывать, принимая во внимание все три компоненты вектора деформации дна, то получаем значение $E_{xyz} = 2.18 \cdot 10^{15} \text{ Дж}$. Энергия начального возвышения, рассчитанного без учета горизонтальной деформации дна, составляет $E_z = 1.63 \cdot 10^{15} \text{ Дж}$. Видно, что если пренебречь вкладом горизонтальных компонент деформации дна

в начальное возвышение, то энергия цунами будет недооценена на 25%.

Численное моделирование распространения цунами выполнено в рамках линейной теории длинных волн. Заметим, что линейное приближение обеспечивает очень хорошую точность расчетов для случая открытого океана, так как отношение амплитуды волны цунами к глубине действительно представляет собой малую величину ($A/H < 10^{-3}$). Уравнения теории длинных волн, записанные в сферической системе координат, были сведены к волновому уравнению относительно смещения свободной поверхности. В качестве начальных условий задавалось статичное начальное возвышение ξ_0 ($\partial \xi_0 / \partial t = 0$). Вблизи берега, на изобате $H = -5 \text{ м}$, ставилось условие полного отражения. Детали численной модели описаны в работе [7].

Расчетная область простиралась по долготе от 134° до 160° в.д. и по широте от 25° до 50° с.ш. Шаг сетки составлял 1 угл. минуту (число узлов 1561×1501). На рис. 1 показан центральный фрагмент расчетной области, на котором изображены эпицентр землетрясения (звездочка), очаг цунами (область деформации дна) и четыре ближайших к источнику станции DART.

Результаты численных расчетов представлены на рис. 3 вместе с сигналами, записанными станциями DART, из которых предварительно была удалена низкочастотная компонента, соответствующая приливным колебаниям уровня. Каждая из станций DART через 200–300 с после начала землетрясения регистрирует высокочастотный всплеск – проявление сейсмических поверхностных волн. Собственно волна цунами достигает датчиков через 2000–5000 с. Амплитуда цунами (размах), записанная ближайшим к очагу датчиком DART 21418, составила 2.8 м. Это самая большая амплитуда цунами из всех, которые когда-

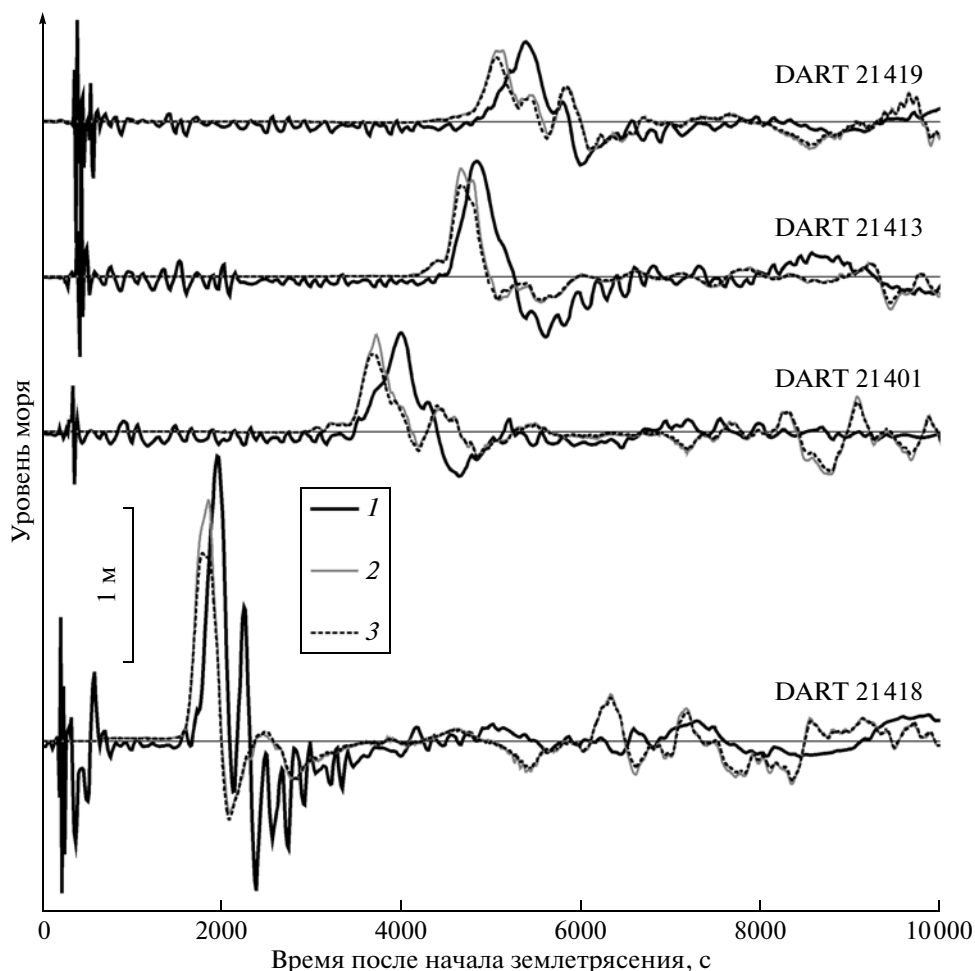


Рис. 3. Вариации уровня моря, зарегистрированные ближайшими к очагу цунами 11.03.2011 г. станциями DART (1). Результаты численного моделирования с учетом вертикальной и горизонтальной деформации дна (2) и с учетом только вертикальной деформации (3). Время отсчитывается с момента начала землетрясения (05:46:24 UTC).

либо регистрировались в открытом океане. На трех других рассматриваемых станциях амплитуда в 2–3 раза меньше. Период волны цунами также заметно изменяется от станции к станции. Волна, зарегистрированная станцией DART 21418, имеет наименьший период – порядка 500 с, на прочих станциях период заметно больше. Объясняется это геометрией очага, который вытянут вдоль глубоководного желоба и, следовательно, излучает относительно короткие волны в направлении, перпендикулярном оси желоба, т.е. в сторону станции DART 21418.

Амплитуда синтетического сигнала, полученного с учетом горизонтальных и вертикальных деформаций дна, хорошо соответствует измерениям на всех датчиках за исключением ближайшего к источнику. Однако из рис. 3 видно, что во всех случаях учет горизонтальной компоненты деформации дна обеспечивает более точное совпадение модельных и натуральных данных. Различия в пери-

одах сигналов также неплохо воспроизводится численной моделью.

Отдельного комментария заслуживает разница во временах вступления синтетического и натурального сигналов. Синтетический сигнал всегда приходит раньше. Причем по мере удаления от источника эта разница имеет тенденцию к увеличению (100, 270, 180, 285 с). Эти факты могут быть объяснены следующим образом. Во-первых, в численных расчетах в качестве нулевого времени принимается момент начала землетрясения, а продолжительность формирования деформации дна не учитывается. Во-вторых, теория длинных волн, используемая в численной модели, не принимает во внимание запаздывание реальных волн из-за фазовой дисперсии.

По данным Геологической службы США продолжительность вспарывания разрыва в очаге землетрясения 11.03.2011 г. достигала 200 с. Каталог CMT (<http://www.globalcmt.org/>) дает близкую ве-

личину: половина продолжительности вспарывания разрыва (half duration) оценивается как 70 с. В любом случае конечность продолжительности деформации дна полностью не может объяснить разницу времен вступления.

Время запаздывания сигнала из-за фазовой дисперсии можно оценить по формуле (глубину океана полагаем постоянной)

$$\Delta t = \frac{(C_0 - C_{gr})}{C_0} t, \quad (8)$$

где $C_0 = \sqrt{gH}$ – скорость длинных волн, $C_{gr} = d\omega/dk$ – групповая скорость, $\omega^2 = gk \operatorname{th}(kH)$ – дисперсионное соотношение для линейных гравитационных волн, t – время распространения сигнала. Для слабодиспергирующих волн ($kH \ll 1$), к которым и относятся волны цунами, формула (8) может быть заменена приближенным соотношением

$$\Delta t \approx \frac{2\pi^2 H}{gT^2} t, \quad (9)$$

где T – период волны. В соответствии с формулой (9) для ближайшей к очагу станции DART 21418 ($T = 500$ с, $H = 5000$ м, $t = 2000$ с) время запаздывания составляет $\Delta t \approx 80$ с, что близко к наблюдаемому значению. Для наиболее удаленной станции DART 21419 ($T = 1000$ с, $H = 5000$ м, $t = 5000$ с) оценка дисперсионного запаздывания дает зна-

чение $\Delta t \approx 50$ с. Из представленных данных видно, что совместный учет дисперсии и конечной продолжительности процесса в очаге землетрясения позволяет объяснить наблюдаемое рассогласование во временах вступления натурного и синтетического сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10–05–00562, 10–05–92102).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Левин Б.В. и др.* // ДАН. 2009. Т. 426. № 3. С. 386–392.
2. *Levin B.W., Nosov M.A.* Physics of Tsunamis. B.: Springer, 2008. 327 p.
3. *Bolshakova A.V., Nosov M.A.* // Pure and Appl. Geophys. 2011.
4. *Okada Y.* // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.
5. *Kowalik Z., Knight W., Logan T., Whitmore P.* // Sci. Tsunami Hazard. 2005. V. 23. № 1. P. 40–56.
6. *Fujii Y., Satake K.* // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2008. V. 98. № 3. P. 1559–1571.
7. *Nosov M.A., Kolesov S.V.* // Pure and Appl. Geophys. 2011. V. 168. № 6–7. P. 1223–1237.
8. *Rabinovich A.B., Lobkovsky L.I., Fine I.V., et al.* // Adv. Geosci. 2008. V. 14. P. 105–116.
9. *Носов М.А., Колесов С.В.* // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. 2009. № 2. С. 96–99.
10. *Tanioka Y., Satake K.* // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. № 8. P. 861–864.