Свойства остаточных деформаций океанического дна по данным о структуре подвижки в очагах цунамигенных землетрясений

А. В. Большакова^{1,*a*}, М. А. Носов^{2,*b*}, С. В. Колесов^{2,*c*}

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, ¹ кафедра физики Земли; ² кафедра физики моря и вод суши.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^a annabolshakova@list.ru, ^b nosov@phys.msu.ru, ^c kolesov@ocean.phys.msu.ru

Статья поступила 14.08.2014, подписана в печать 27.09.2014.

По структуре подвижки, заимствованной из базы данных SRCMOD, с применением формул Окада рассчитаны векторные поля остаточных деформаций океанического дна для очагов 75 подводных землетрясений, произошедших в период с 1923 по 2013 г. Показано, что горизонтальные компоненты деформации наклонного дна, как правило, обеспечивают дополнительный и заметный вклад в вытесненный объем воды и в потенциальную энергию возвышения водной поверхности, эквивалентного по форме смещению поверхности дна (энергию цунами). Проанализированы связи амплитуды деформации дна, вытесненного объема и энергии цунами с моментной магнитудой землетрясения, построены соответствующие регрессионные зависимости. Показано, что доля энергии землетрясения, переходящая к волнам цунами, растет с увеличением моментной магнитуды, но даже при катастрофических землетрясениях она не превышает 0.1 %.

Ключевые слова: подводное землетрясение, моментная магнитуда, очаг цунами, остаточная деформация дна, энергия цунами, вытесненный объем.

УДК: 532.593.4. PACS: 91.30.Nw.

Введение

В 1970-80-е гг. появились первые работы, посвященные восстановлению структуры очага землетрясения по полю сейсмических волн [1–4]. Существенный прогресс, достигнутый в этом направлении за последние годы, обеспечил возможность получения уникальной информации — реалистичных оценок распределения подвижки в очагах землетрясений [5–9]. В дальнейшем для обозначения распределения подвижки будем использовать сокращение FFM (Finite Fault Model).

Для подводных землетрясений данные о распределении подвижки обладают особой ценностью, — они позволяют восстановить остаточные деформации дна и описать генерацию волн цунами [10, 11]. Адекватность такого способа восстановления деформаций дна подтверждается хорошим соответствием расчетных и измеренных (с применением глубоководных станций DART, JAMSTEC и др.) волновых форм [7, 12, 13]. Именно поэтому FFM данные широко используются для моделирования конкретных цунами различными научными группами [13–17].

Первые попытки изучения общих свойств деформаций дна в очагах цунами, восстановленных на основе FFM, были предприняты нами в статьях [17, 18]. Связи такого рода являются полезными как для оперативной оценки параметров цунами, так и для понимания физической природы явлений, происходящих в водном слое над очагом подводного землетрясения. В [17, 18] нами использовался сравнительно небольшой набор данных, представленных на сайтах Калифорнийского института технологий (Caltech), Университета Санта-Барбары (UCSB) и Геологической службы США (USGS). В этой работе мы будем использовать недавно организованную базу данных SRCMOD (Finite-Source Rupture Model Database, http://equake-rc.info/SRCMOD/), которая интегрирует в себе практически всю доступную ныне информацию по FFM.

Основная цель настоящей работы — анализ общих свойств остаточных деформаций дна в очагах подводных землетрясений на основе максимально широкой выборки из базы данных SRCMOD. В частности, в работе изучены связи моментной магнитуды землетрясения с параметрами деформации дна, такими как амплитуда деформации, вытесненный объем воды, потенциальная энергия возвышения водной поверхности, эквивалентного по форме смещению поверхности дна (энергия цунами). Также в работе оценен вклад горизонтальных компонент деформации наклонного дна в вытесненный объем и энергию цунами.

1. Параметры, характеризующие остаточные деформации дна в очаге цунами

Рассмотрим водный слой, ограниченный свободной поверхностью сверху и поверхностью дна произвольной формы снизу. Начало прямоугольной системы координат расположим на невозмущенной поверхности воды. Ось z направим вертикально вверх, а оси x и y — на восток и на север соответственно. Пусть до землетрясения положение дна определяется формулой $z_b = -H(x, y)$. После землетрясения дно перемещается в новое положение $z_b = -H(x, y) + \eta(x, y)$, где $\eta(x, y)$ — остаточное смещение поверхности дна.

Остаточное смещение поверхности дна связано с векторным полем деформации $D \equiv (D_x, D_y, D_z)$ и распределением глубин следующей формулой [17, 19]:

$$\eta = \frac{\partial H}{\partial x} D_x + \frac{\partial H}{\partial y} D_y + D_z.$$
(1)

Векторное поле **D** рассчитывалось по данным FFM с применением формул Окада [20]. Описание методики и примеры расчетов можно найти в работах [17, 21, 22].

Для реальных событий функция $\eta(x, y)$ обычно имеет сложную структуру, следовательно, ее полное описание, вообще говоря, требует большого числа параметров. В работе мы ограничимся анализом следующего набора параметров, которые однозначно определяются по функции $\eta(x, y)$:

1) амплитуда деформации дна

$$\Delta \eta = \max(\eta) - \min(\eta), \tag{2}$$

 объем воды, вытесненный остаточной деформацией дна, и его составляющие, обязанные горизонтальной и вертикальной компонентам деформации дна:

$$V_{xyz} = V_{xy} + V_z, \tag{3}$$

$$V_{xy} = \iint \left(\frac{\partial H}{\partial x} D_x + \frac{\partial H}{\partial y} D_y \right) ds, \tag{4}$$

$$V_z = \iint D_z \, ds; \tag{5}$$

3) потенциальная энергия возвышения водной поверхности, эквивалентного по форме остаточному смещению поверхности дна и ее составляющие, обязанные горизонтальной и вертикальной компонентам деформации дна (энергия цунами и ее составляющие):

$$E_{xyz} = \frac{\rho g}{2} \iint \eta^2 ds, \tag{6}$$

$$E_{xy} = E_{xyz} - E_z,\tag{7}$$

$$E_z = \frac{\rho g}{2} \iint (D_z)^2 \, ds. \tag{8}$$

Вычисление максимальных и минимальных значений, а также интегрирование в формулах (2)-(8) выполнялись по всей области, где деформации дна имели заметные значения. Для прибрежных источников область суши в расчетах не учитывалась.

Для задачи распространения цунами вытесненный объем и энергию цунами, по крайней мере в первом приближении, можно считать интегралами движения. Действительно, некоторые «потери» вытесненного объема возможны только для очень сильных цунами, когда волны проникают в глубь суши на значительные расстояния и затопляют локальные понижения. Диссипацией энергии цунами можно пренебречь практически во всех случаях за исключением длительного распространения волн по мелководью и их наката на берег [10, 23]. В работе [18] для модели равномерного распределения подвижки вдоль прямоугольной площадки разрыва исследовались максимально возможные значения амплитуды деформации дна, вытесненного объема и энергии цунами. В итоге были получены зависимости этих параметров от моментной магнитуды землетрясения M_w следующего вида:

$$\log_{10} Q = AM_{\omega} - B, \tag{9}$$

где *Q* — исследуемый параметр, *A* и *B* — числовые коэффициенты, значения которых представлены в таблице (2 и 3-я колонки).

Параметры деформации дна в реальных очагах цунами ($\Delta\eta$, V_{xyz} , E_{xyz}), рассчитанные с использованием ограниченного набора данных FFM (44 землетрясения, 70 моделей очагов) и батиметрии цифрового атласа GEBCO с разрешением 1 угл. мин, изучались в работе [17]. Регрессионные зависимости параметров от моментной магнитуды также имели вид формулы (9). Соответствующие значения коэффициентов A и B приведены в 4 и 5-й колонках таблицы.

В настоящей работе для определения остаточного смещения поверхности дна используется информация о распределении подвижки (FFM), заимствованная из максимально полной в настоящее время базы данных SRCMOD. В расчетах применялась новая версия цифрового атласа GEBCO-08 с разрешением 30 угл. с. Всего в работе рассматриваются 200 моделей очагов, которые были построены различными научными группами для 75 подводных землетрясений за период с 1923 по 2013 г.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена амплитуда деформации дна в зависимости от моментной магнитуды землетрясения. Амплитуда варьируется от нескольких сантиметров (7 см) до нескольких десятков метров (48.5 м) и в среднем экспоненциально быстро возрастает с увеличением магнитуды. Регрессионная зависимость показана на рисунке черной пунктирной линией. Серая полоса, ограниченная серыми пунктирными линиями, показывает 95 %-й доверительный интервал. Коэффициенты для формулы (9) с интервальными оценками представлены в 6 и 7-й колонках таблицы. Зависимость характеризуется довольно значительным разбросом данных: коэффициент корреляции составляет 0.8. Разброс данных объясняется чувствительностью деформации дна не только к магнитуде, но и к ориентации площадки разрыва, направлению и распределению подвижки, глубине землетрясения.

Значения коэффициентов в формуле (9), описывающей связь параметров деформации дна с моментной магнитудой землетрясения

	Теоретический максимум [18]		[17]		Коэффициенты регрессионных зависимостей, 95 %-й доверительный интервал	
	Α	В	Α	В	Α	В
$\Delta\eta$, м	0.5	-3.4	0.89	-7.01	0.86 ± 0.09	-6.61 ± 0.73
V_{xyz} , м ³	1.5	-1.8	1.46	-2.2	1.48 ± 0.09	-2.45 ± 0.89
<i>Е_{хуz}</i> , Дж	2.0	-1.7	2.33	-5.59	2.26 ± 0.13	-4.93 ± 0.92



Рис. 1. Амплитуда деформации дна как функция моментной магнитуды землетрясения: точки — расчет на основе данных о распределении подвижки, пунктирная линия — регрессионная зависимость, серая полоса — 95 % доверительный интервал, сплошная линия теоретический максимум [18]

Сплошной черной линией на рис. 1 показана теоретическая зависимость для максимально возможной амплитуды деформации, которая была получена для модели однородного распределения подвижки вдоль прямоугольной площадки разрыва [18]. Видно, что для значительной части реальных событий, и особенно для событий с большой магнитудой, амплитуда деформации дна превышает теоретическое максимальное значение. Этот факт не является парадоксальным, он объясняется концентрацией подвижки в узкой области площадки разрыва. Равномерное распределение подвижки вдоль всей площадки разрыва при сохранении сейсмического момента (и моментной магнитуды), очевидно, привело бы к уменьшению амплитуды деформации дна.

Рисунок 2 иллюстрирует вклад горизонтальных деформаций наклонного дна V_{xy} в полный вытесненный объем V_{xyz}. Обе величины могут иметь как положительный, так и отрицательный знак. Для наглядности мы представляем линейные эквиваленты объемов с сохранением знака sign $(V_{xyz})|V_{xyz}|^{1/3}$ и sign $(V_{xy})|V_{xy}|^{1/3}$. Из рисунка видно, что в большинстве случаев (163 из 200) знаки величин V_{xy} и V_{xyz} совпадают. Это означает, что горизонтальные деформации дна, как правило, обеспечивают дополнительный вклад в вытесненный объем. По абсолютному значению вклад горизонтальных компонент деформации дна в вытесненный объем V_{xu}/V_{xuz} варьируется от 0.1 до 88 %, среднее значение составляет 15 %. Следовательно, пренебрежение горизонтальными компонентами деформации дна при моделировании цунами, вообще говоря, приводит к заметной, а иногда к значительной недооценке волны.

Связь абсолютной величины полного вытесненного объема с моментной магнитудой представлена на рис. 3.



Рис. 2. Объем, вытесненный горизонтальными компонентами деформации наклонного дна V_{xy} как функция полного вытесненного объема V_{xyz} . По осям отложены линейные эквивалетны вытесненных объемов с сохранением знака



Рис. 3. Абсолютная величина объема, вытесненного остаточной деформацией дна, как функция моментной магнитуды землетрясения: точки — расчет на основе данных о распределении подвижки, пунктирная линия — регрессионная зависимость, серая полоса — 95 % доверительный интервал, сплошная линия — теоретический максимум [18]

Вытесненный объем варьируется от 0.08 до 121 км³ и в среднем экспоненциально возрастает с увеличением моментной магнитуды. В отличие от амплитуды деформации дна вытесненный объем хорошо коррелирует с моментной магнитудой: коэффициент корреляции составляет 0.95. Регрессионная зависимость показана черной пунктирной линией. Серая полоса, ограниченная серыми пунктирными линиями, соответствует 95 %-му доверительному интервалу. Коэффициенты для регрессионной зависимости вида (9) с интервальными оценками приведены в таблице.

Сплошной черной линией на рис. З представлена теоретическая зависимость для максимально возможного значения вытесненного объема, которое было получено в рамках модели равномерного распределения подвижки [18]. Видно, что вытесненный объем, рассчитанный для реальных событий, никогда не превосходит теоретическое максимальное значение и в среднем обычно оказывается в несколько раз меньше этого значения.

На рис. 4 представлена доля потенциальной энергии возвышения водной поверхности, которая обязана вкладу горизонтальных компонент деформации наклонного дна E_{xy}/E_{xyz} в зависимости от полной потенциальной энергии E_{xyz} . Величина E_{xy}/E_{xyz} может быть как положительной, так и отрицательной ($-0.08 < E_{xy}/E_{xyz} < 0.41$). В большинстве случаев (173 из 200) вклад горизонтальной деформации является положительным. Иными словами, горизонтальные компоненты деформации дна, как правило, дают дополнительный вклад в энергию цунами. Важно подчеркнуть, что этот вклад не является пренебрежимо малым, его среднее значение составляет 10 %.



Рис. 4. Относительный вклад горизонтальных компонент деформации дна в энергию цунами как функция полного значения энергии

Зависимость полного значения потенциальной энергии начального возвышения E_{xyz} от моментной магнитуды представлена на рис. 5. Для реальных событий оценка энергия варьируется в диапазоне от $4.62 \cdot 10^9$ до $1.01 \cdot 10^{16}$ Дж. В среднем энергия экспоненциально возрастает с увеличением моментной магнитуды. Зависимость характеризуется довольно высоким коэффициентом корреляции 0.94. Регрессионная



Рис. 5. Потенциальная энергия возвышения водной поверхности, эквивалентного по форме остаточной деформации дна (энергия цунами), как функция моментной магнитуды землетрясения: точки — расчет на основе данных о распределении подвижки, пунктирная линия — регрессионная зависимость, серая полоса — 95 % доверительный интервал, сплошная линия — теоретический максимум [18]

прямая показана пунктиром. Серая полоса, ограниченная серыми пунктирными линиями, соответствует 95 %-му доверительному интервалу. Коэффициенты для формулы (9) приведены в таблице. Видно, что так же как и в случае вытесненного объема, потенциальная энергия, рассчитанная для реальных источников, никогда не превосходит максимальные теоретические значения (сплошная черная линия) [18].

Известна связь энергии землетрясения (Дж) с моментной магнитудой [24]:

$$\lg E_{\rm EQ} = 1.5M_{\omega} + 4.8. \tag{10}$$

Используя регрессионную зависимость для энергии начального возвышения, получаем оценку доли энергии землетрясения, переходящей к волнам цунами

$$\lg E_{xyz}/E_{\rm EQ} = 0.75M_{\rm w} - 9.73. \tag{11}$$

Из формулы (11) следует, что доля энергии, переходящая к цунами, растет с увеличением магнитуды от 0.003 % (при $M_w = 7$) до 0.1 % (при $M_w = 9$). В любом случае к цунами переходит крайне незначительная часть энергии землетрясения.

Заключение

По данным о распределении подвижки из базы данных SRCMOD восстановлены 200 модельных остаточных деформаций океанического дна для очагов 75 подводных землетрясений, произошедших за период с 1923 по 2013 г. Рассчитаны параметры остаточных деформаций дна: амплитуда деформации, вытесненный объем и потенциальная энергия возвышения водной поверхности, эквивалентного по форме остаточному смещению поверхности дна (энергия цунами).

Проанализирован вклад горизонтальных и вертикальных компонент деформации дна в вытесненный объем и в энергию цунами. Показано, что по абсолютному значению вклад горизонтальных компонент в вытесненный объем варьируется в пределах от 0.1 до 88 %, среднее значение 15 %. Вклад горизонтальных компонент в энергию цунами варьируется от 0.3 до 41 %, среднее значение 10 %. Установлено, что для большинства случаев горизонтальные компоненты деформации дна обеспечивают дополнительный вклад в вытесненный объем и энергию начального возвышения. Следовательно, пренебрежение горизонтальными компонентами деформации дна, как правило, ведет к недооценке волны цунами.

Построены регрессионные зависимости, связывающие амплитуду деформации дна, вытесненный объем и энергию цунами с моментной магнитудой землетрясения. Показано, что к волнам цунами переходит не более 0.1 % энергии землетрясения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-05-31295-мол_а, 13-05-92100 ЯФ, 13-05-00337 А).

Список литературы

- Alewine R.W., Jordan T.H. // Geophys. J. Royal Astron. Soc. 1973. 35. P. 357.
- Jovanovich D.B. // Geophys. J. Astron. Soc. 1975. 43. P. 347.
- 3. *Павлов В.М., Гусев А.А. //* Докл. АН СССР. 1980. **255**. С. 828.
- Ward S.N., Barrientos S.E. // J. Geophys. Res. 1986. 91(B5). P. 4909.
- Ji C., Wald D.J., Helmberger D.V. // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2002, 92, N 4. P. 1192.

- Bassin C., Laske G., Masters G. // EOS Trans. AGU. 2000. 81. F897.
- 7. Lay T., Yamazaki Y., Ammon C.J. et al. // Earth Planets Space Letter. 2011. 63. P. 797.
- Shao G., Li X., Ji C., Maeda T. // Earth Planets Space. 2011. 63, N 7. P. 559.
- 9. Yagi Y., Fukahata Y. // Geophys. J. Intern. 2011. 186, N 2. P. 711.
- 10. Levin B.W., Nosov M.A. Physics of Tsunamis. Dordrecht, 2009.
- Носов М.А. // Изв. РАН. Физ. атмосферы и океана. 2014. № 5. С. 540.
- 12. Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Левин Б.В. и др. // Докл. РАН. 2009. **426**, № 3. С. 386.
- 13. Носов М.А., Колесов С.В., Левин Б.В. // Докл. РАН. 2011. **441**, № 1. С. 108.
- Newman A.V., Hayes G., Wei Y., Convers J. // Geophys. Res. Lett. 2011. 38. L05302.
- Poisson B., Oliveros C., Pedreros R. // Geophys. J. Intern. 2011. 185, N 3. P. 1365.
- Kim D.C., Kim K.O., Pelinovsky E N. et al. // J. of Coastal Res. 2013. Spec. issue 65. P. 266.
- Nosov M.A., Bolshakova A.V., Kolesov S.V. // Pure and Appl. Geophys. 2014. 171. P. 3515.
- Bolshakova A.V., Nosov M.A. // Pure and Appl. Geophys. 2011. 168. P. 2023.
- Tanioka Y., Satake K. // Geophys. Res. Lett. 1996. 23, N 8. P. 861.
- 20. Okada Y. // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1985. **75**, N 4. P. 1135.
- Носов М.А., Колесов С.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 2. С. 96 (Nosov M.A., Kolesov S.V. // Moscow University Phys. Bull. 2009. 64, N 2. P. 208).
- 22. Nosov M.A., Kolesov S.V. // Pure and Appl. Geophys. 2011. **168**, N 6-7. P. 1223.
- 23. Бернадский А.В., Носов М.А. // Изв. РАН. Физ. атмосферы и океана. 2102. **48**, № 4. С. 481.
- 24. Kanamori, H., Anderson, D.L. // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1975. 65. P. 1073.

The properties of co-seismic deformations of the ocean bottom as indicated by the slip-distribution data in tsunamigenic earthquake sources

A. V. Bolshakova^{1,a}, M. A. Nosov^{2,b}, S. V. Kolesov^{2,c}

¹Department of Physics of Earth; ²Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia. E-mail: ^a annabolshakova@list.ru, ^b nosov@phys.msu.ru, ^c kolesov@ocean.phys.msu.ru.

In this study we consider 75 ocean-bottom earthquakes that occurred during the 1923–2013 period. Based on the slip-distribution data from the Finite-Source Rupture Model Database (SRCMOD) and Okada formulas, the vector fields of co-seismic bottom deformations were calculated. It is shown that, as a rule, the horizontal components of the sloping bottom deformation make an additional and essential contribution to the water displacement and the potential energy of the water-surface elevation that is similar in shape to the bottom surface displacement (the tsunami energy). On the basis of the analyzed relationships between the bottom deformation amplitude, the displaced water volume, tsunami energy, and the earthquake moment magnitude the corresponding regression dependencies were constructed. It is shown that the fraction of the potential energy of an earthquake that is converted into a tsunami increases with the increasing moment magnitude, but even during catastrophic earthquakes it is less than 0.1% of the total earthquake energy.

Keywords: underwater earthquake, moment magnitude, tsunami source, co-seismic deformation of the ocean bottom, tsunami energy, water displacement.

PACS: 91.30.Nw.

Received 14 August 2014.

English version: Moscow University Physics Bulletin 1(2015).

Сведения об авторах

- 1. Большакова Анна Владимировна канд. физ.-мат. наук, инженер; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: annabolshakova@list.ru.
- 2. Носов Михаил Александрович докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: nosov@phys.msu.ru.
- 3. Колесов Сергей Владимирович канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: kolesov@ocean.phys.msu.ru.