

## ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

**Энергетические характеристики очагов цунами и механизм генерации волн сейсмическими движениями океанического дна**М.А. Носов,<sup>1,2,а</sup> А.В. Большакова,<sup>1,б</sup> К.А. Семенцов<sup>1,в</sup><sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*<sup>2</sup> *Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Россия, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1Б*

Поступила в редакцию 19.10.2021, после доработки 03.11.2021, принята к публикации 06.11.2021.

Представлен физический анализ процесса формирования волн цунами сейсмическими движениями дна. Для набора сильных подводных землетрясений выполнены оценки работы, совершаемой против сил гидростатического давления при косейсмических смещениях дна, а также доступной потенциальной энергии — энергии цунами. Показано, что к волнам цунами переходит незначительная доля энергии землетрясения (от 0.004% при  $Mw = 7$  до 0.16% при  $Mw = 9$ ), в то время как работа против сил гидростатического давления по абсолютной величине сопоставима с энергией землетрясения, оцениваемой по формуле Канамори.

**Ключевые слова:** генерация цунами, косейсмические смещения, энергия цунами.

УДК: 551.466.62. PACS: 91.30.Nw.

**ВВЕДЕНИЕ**

В соответствии с исторической базой данных [1] основной причиной возникновения волн цунами (72.3% всех известных случаев) служат подводные землетрясения. Заметно реже цунами возникают в результате вулканических извержений (4.6%), метеорологических причин (3.7%) или оползней (3.6%). В ряде случаев источник может оказаться комбинированным, например землетрясение и оползень (3.6%), вулканическое извержение и землетрясение (0.5%), вулканическое извержение и оползень (0.4%). Для остальных 10.5% случаев источник установить не удалось.

В настоящее время не вызывает сомнений, что формирование цунами при землетрясении обязано сейсмическим движениям дна океана в некоторой области, расположенной вблизи эпицентра землетрясения [2–9].

Ориентированность многих исследователей на решение задач оперативного прогноза цунами стимулировала развитие приближенных моделей динамики цунами и упрощенных представлений о процессе генерации волн. Главным образом, здесь мы имеем в виду вертикально интегрированные уравнения гидродинамики (теория мелкой воды), а также предположение о мгновенности деформации дна при землетрясении, дополненное переносом косейсмических смещений дна на поверхность океана. В рамках этих приближений численное воспроизведение динамики цунами было возможно за разумное время даже без применения суперкомпьютеров, но точность получаемых результатов, очевидно, являлась ограниченной. Ранее, в условиях значительной неопределенности данных о сейсмическом источнике цунами, при-

ближенность моделей не имела принципиального значения.

В начале XXI века наметился существенный прогресс в определении структуры подвижки и динамики вспарывания разрыва в очаге землетрясения [10, 11], что обеспечило возможность восстановления динамики сейсмических движений дна в очаге цунами. Наличие такой информации вкупе с качественными батиметрическими данными позволяет претендовать на решение амбициозной задачи точного воспроизведения процесса генерации цунами. Кроме того, появление качественно новой информации о сейсмическом источнике цунами позволяет получить реалистичные оценки энергетических характеристик очага цунами.

Первая цель работы состоит в последовательном физическом анализе механизма передачи энергии водному слою от подвижного дна при генерации цунами. Второй целью является количественная оценка энергетических характеристик очага цунами для набора сильных подводных землетрясений XXI века: полной энергии, передаваемой водному слою, и доли энергии, которая переходит к волнам цунами.

**1. ОГРАНИЧЕННОСТЬ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН ЦУНАМИ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ДВИЖЕНИЯМИ ДНА**

Из аналитического решения задачи о генерации цунами сейсмическими движениями дна, полученного в рамках теории несжимаемой жидкости [12–16], следует, что спектр смещений водной поверхности промодулирован быстро затухающей функцией  $1/\cosh(kH)$ , где  $k$  — волновое число,  $H$  — глубина океана. Это накладывает существенное ограничение на спектральный состав поверхностных гравитационных волн, сформированных движениями дна. Длина волн  $\lambda$  оказывается ограниченной снизу:  $\lambda > \lambda_{\min}$ , где  $\lambda_{\min} \sim H$ . Эффект известен под названиями

<sup>а</sup> E-mail: [m.a.nosov@mail.ru](mailto:m.a.nosov@mail.ru)

<sup>б</sup> E-mail: [annabolshakova@list.ru](mailto:annabolshakova@list.ru)

<sup>в</sup> E-mail: [sebbest@yandex.ru](mailto:sebbest@yandex.ru)

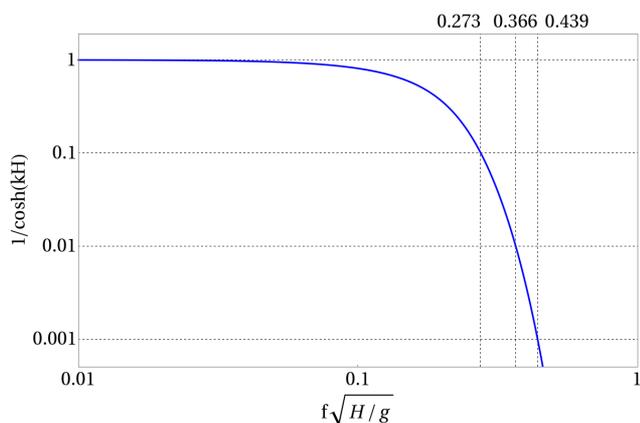


Рис. 1. Величина  $1/\cosh(kH)$ , определяющая амплитуду гравитационных поверхностных волн, возбуждаемых колебаниями дна, в зависимости от безразмерной частоты этих колебаний

«фильтр Каджиуры», или «сглаживающий эффект водного слоя». В частотном диапазоне также имеется соответствующее ограничение, на котором мы остановимся подробнее.

Аргумент модулирующей функции « $kH$ » однозначно связан с циклической частотой  $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  — частота) дисперсионным соотношением для гравитационных поверхностных волн на воде:  $\omega^2 = gk \tanh(kH)$ , где  $g$  — ускорение силы тяжести [17]. Используя дисперсионное соотношение, представим величину  $1/\cosh(kH)$  в форме частотной зависимости (рис. 1). Из рисунка видно, что, будучи близкой к 1 при малых частотах, величина  $1/\cosh(kH)$  экспоненциально быстро убывает при увеличении частоты.

Определим пороговое значение частоты  $f_g$ , при превышении которого амплитуду возбуждаемых волн можно полагать пренебрежимо малой. Пороговое значение частоты можно определить из условия десятикратного, стократного или тысячекратного ослабления поверхностных волн [18]. Из рис. 1 видно, что соответствующие значения критических частот различаются незначительно:  $f_{10} \approx 0.273\sqrt{g/H}$ ,  $f_{100} \approx 0.366\sqrt{g/H}$  и  $f_{1000} \approx 0.439\sqrt{g/H}$ . Для определенности в качестве пороговой частоты мы выберем

$$f_g \equiv f_{100} \approx 0.366\sqrt{g/H}. \quad (1)$$

Существование критической частоты  $f_g$  означает, что вклад в генерацию цунами вносят только низко-частотные сейсмические колебания дна в частотном диапазоне  $f < f_g$  и остаточные (косейсмические) смещения, которые соответствуют нулевой частоте. Примечательно, что при типичных океанских глубинах ( $H = 4000$  м) пороговая частота является весьма низкой:  $f_g \approx 0.02$  Гц.

Следующее замечание касается роли эффектов сжимаемости воды. Известно, что сжимаемый водный слой, ограниченный свободной поверхностью сверху и абсолютно жестким дном снизу, представляет собой волновод [19]. Акустические волны в таком волноводе существуют при частотах, превышающих частоту отсечки  $f_{ac} = c/4H$ , где  $c$  — скорость звука

в воде. Для условий нашей планеты при любой глубине океана имеет силу неравенство  $f_g < f_{ac}$ . Следовательно, цунами и гидроакустические волны существуют в заведомо различных частотных диапазонах. В этой связи эффектами сжимаемости воды в задаче о динамике цунами можно пренебречь, по крайней мере в первом приближении.

Заметим, что сжимаемость воды оказывает слабое влияние на цунами, а именно: проявление сжимаемости наблюдается только при распространении волн на трансокеанские расстояния [20]. При очень быстрых движениях дна незначительный дополнительный вклад в энергию цунами могут внести нелинейные акустические эффекты [8, 21, 22].

В частотном диапазоне  $f_g < f < f_{ac}$  ни акустические, ни гравитационные волны не возникают [8, 18]. Этот диапазон соответствует режиму вынужденных колебаний, при которых водный слой повторяет движения дна.

Корректность изложенных выше теоретических представлений хорошо подтверждается на практике при сопоставлении сигналов, регистрируемых во время землетрясений донными датчиками давления и донными сейсмометрами (см. [23–25]).

## 2. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ И ДИНАМИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ НА ПОДВИЖНОЕ ДНО

Проведем сравнительную оценку гидростатического и динамического давлений, которые действуют на подвижное океаническое дно. Для определенности рассмотрим безграничный по горизонтали океан фиксированной глубины  $H$ . Гидростатическое давление на дно определяется известной формулой:  $p_{st} = \rho g H$ , где  $\rho$  — плотность воды. Предположим, что достаточно протяженный участок дна совершает гармонические колебания с амплитудой  $\eta$  и циклической частотой  $\omega$  в вертикальном направлении. Тогда над подвижным участком дна к гидростатическому давлению добавится динамическая компонента, амплитуду которой можно рассчитать, используя второй закон Ньютона:  $p_d = \rho H \eta \omega^2$  [18, 26, 27]. Справедливость означенной формулы в частотном диапазоне «вынужденные колебания»  $f_g < f < f_{ac}$  подтверждается натурными измерениями [23–25] и результатами численных экспериментов, проведенных с использованием наиболее современных моделей типа «fully-coupled», объединяющих сжимаемый океан и упругое дно [28].

В общем случае вариации придонного давления могут быть обязаны не только вынужденным колебаниям, но также гидроакустическим и поверхностным гравитационным волнам, которые возникают при колебаниях дна. Проявлениями гидроакустических волн мы пренебрегаем, т.к. в интересующем нас частотном диапазоне  $f < f_g$  ( $f_g < f_{ac}$ ) эти волны не возникают. Проявлениями гравитационных волн мы также можем пренебречь в силу того, что амплитуда вариаций придонного давления, вызываемых этими волнами, мала по сравнению с гидростатическим давлением. Действительно, амплитуда гравитационных волн сопоставима с амплитудой колебаний дна, т.е. она оценивается величиной  $\sim \eta$ . Отношение амплитуды соответствующих вариаций давления

к величине гидростатического давления  $\sim \eta/H$ . При типичной для очага цунами ситуации  $\eta/H \ll 1$ .

Итак, отношение динамической компоненты давления к гидростатической определяется формулой:

$$p_d/p_{st} = \eta\omega^2/g. \quad (2)$$

Значимость динамической компоненты возрастает пропорционально квадрату частоты колебаний дна. Но при описании генерации цунами не имеет смысла учитывать высокие частоты  $f > f_g$ . Подставляя в формулу (2) критическую частоту  $f_g$ , получаем следующую оценку:

$$p_d/p_{st} < 5.28\eta/H. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует важный вывод. При условии малости амплитуды сейсмических движений дна по сравнению с глубиной океана ( $\eta/H \ll 1$ ) давление на подвижное дно определяется главным образом гидростатической компонентой, а динамической компонентой давления можно пренебречь.

Этот теоретический вывод согласуется с натурными наблюдениями. В работе [29] анализируются вариации придонного давления, зарегистрированные во время цунамигенного землетрясения Токачи-Оки 2003 непосредственно в очаге цунами на глубине около 2000 м. Двойная амплитуда вариаций давления, измеренная с учетом всех возможных эффектов, в том числе и гидроакустических волн, составила  $\approx 5 \cdot 10^5$  Па. Даже в этом случае амплитуда вариаций давления заметно уступает гидростатическому давлению на означенной глубине  $\approx 2 \cdot 10^7$  Па.

Возможность пренебречь динамической компонентой давления значительно упрощает оценку энергии, передаваемой от подвижного дна водному слою в процессе генерации цунами. Действительно, гидростатическое давление определяется элементарной формулой  $p_{st} = \rho g H$ , в то время как динамическое давление рассчитывается из решения сложной гидродинамической задачи.

### 3. РОЛЬ НОРМАЛЬНЫХ И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ДНА

В задачах гидродинамики при постановке граничных условий на твердых поверхностях принято различать нормальную и тангенциальную компоненты скорости течения [17]. В задаче о генерации цунами такой поверхностью является дно океана, которое при землетрясении может перемещаться как в своей плоскости, так и в нормальном направлении. Будем называть эти движения тангенциальными и нормальными.

Сопоставим эффективность передачи энергии водному слою нормальными и тангенциальными движениями дна. С этой целью рассмотрим движение дна с остаточным смещением, во время которого участок поверхности дна смещается на расстояние  $\eta$  за время  $\tau$ : один раз в нормальном направлении, а в другой раз — в тангенциальном.

Как мы установили выше, на поверхность подвижного дна действует главным образом гидростатическое давление. Давление действует по нормали

к поверхности. Энергию, передаваемую водному слою единицей поверхности дна при его движении в нормальном направлении, рассчитываем как работу против сил давления на пути  $\eta$ :

$$A_n = \rho g H \eta. \quad (4)$$

Аналогичная формула, но без обсуждения роли динамического давления, приведена, например, в работе [30].

Нормальные движения дна всегда ассоциируются с вытеснением воды. При любой форме рельефа дна работа  $A_n$  тратится именно на вытеснение воды, т.е. на смещение центра масс водного слоя в вертикальном направлении.

При движении дна в своей плоскости со стороны дна на водный слой действует тангенциальное напряжение  $\rho C_B u^2$  [31], где  $C_B$  — безразмерный эмпирический коэффициент, значение которого обычно полагают равным 0.0025,  $u$  — скорость потока (в рассматриваемом случае  $u = \eta/\tau$ ). Энергию, передаваемую водному слою единицей поверхности дна, движущегося в своей плоскости, рассчитываем как работу тангенциального напряжения на пути  $\eta$ :

$$A_t = \rho C_B \eta^3 / \tau^2. \quad (5)$$

Отношение величин  $A_t$  и  $A_n$  определяется формулой

$$\frac{A_t}{A_n} = \frac{C_B \eta^2}{\tau^2 g H}. \quad (6)$$

Оценка, выполненная с использованием формулы (6), показывает, что при типичных для очага цунами условиях ( $\eta \sim 1 - 10$  м,  $\tau \sim 10 - 100$  с,  $H \sim 10^3$  м) отношение энергий оказывается заведомо малой величиной  $A_t/A_n \sim 10^{-11} - 10^{-7}$ . Следовательно, передача энергии водному слою при движениях дна в своей плоскости является крайне неэффективной. Эффективная передача энергии происходит при нормальных движениях дна. Причем речь идет либо о низкочастотных ( $f < f_g$ ) сейсмических колебаниях дна [32], либо об остаточных (косейсмических) смещениях дна [5, 8, 15].

### 4. ЭНЕРГИЯ, ПЕРЕДАВАЕМАЯ ВОДНОМУ СЛОЮ, И ЭНЕРГИЯ ЦУНАМИ

Формула (4) легко может быть обобщена на случай океана переменной глубины (индекс « $n$ » у величины  $A$  мы в дальнейшем опускаем)

$$A = \rho g \iint H(\mathbf{D}, \mathbf{n}) ds, \quad (7)$$

где  $\mathbf{n}$  — нормаль к поверхности дна,  $\mathbf{D}$  — вектор косейсмических (остаточных) смещений дна. Интегрирование в формуле (7) ведется по поверхности дна в области источника цунами.

Величину  $A$ , определяемую формулой (7), будем интерпретировать как работу, «совершаемую землетрясением» против сил гидростатического давления. Величина  $A$  не является знакоопределенной. В случае  $A > 0$  часть энергии землетрясения расходуется

на поднятие водного слоя. При  $A < 0$  водный слой опускается и часть его потенциальной энергии дополняет энергию сейсмического источника.

В качестве меры энергии землетрясения будем использовать величину, определяемую формулой Канамори [33]:

$$\log_{10} E_{EQ}[\text{Дж}] = 1.5Mw + 4.8, \quad (8)$$

где  $Mw$  — моментная магнитуда землетрясения. Формула (8) была предложена более 40 лет назад, и в настоящее время ее можно рассматривать как более или менее устоявшийся вариант аналогичных связей.

В качестве еще одной важной энергетической меры будем рассматривать потенциальную энергию начального возвышения водной поверхности в очаге цунами  $E_{TS}$ . Физический смысл этой величины — разница между потенциальными энергиями водного слоя с возмущенной и невозмущенной свободной поверхностью. Величина  $E_{TS}$  именуется «доступная потенциальная энергия» [30]. Именно эта энергия переходит к волнам цунами.

Для расчета энергии  $E_{TS}$  мы используем пространственное предположение об эквивалентности форм косейсмического смещения поверхности дна и начального смещения водной поверхности в очаге цунами [7, 30]. С учетом этого предположения расчетная формула имеет вид:

$$E_{TS} = \frac{\rho g}{2} \iint \eta^2 ds, \quad (9)$$

$$\eta = \frac{\partial H}{\partial x} D_x + \frac{\partial H}{\partial y} D_y + D_z, \quad (10)$$

где  $\eta$  — смещение поверхности дна,  $\mathbf{D} \equiv (D_x, D_y, D_z)$  — вектор косейсмической деформации дна. Компоненты вектора  $\mathbf{D}$  и производные в формуле (10) представлены в локальной прямоугольной системе координат  $Oxyz$ , начало которой расположено на невозмущенной поверхности воды, ось  $Oz$  направлена вертикально вверх, оси  $Ox$  и  $Oy$  — на восток и на север соответственно.

Подчеркнем, что в общем случае начальное возвышение водной поверхности отличается по форме от деформации дна [35–37], оно является более плавным, поэтому формула (9) дает оценку энергии цунами сверху.

Для случая ровного горизонтального дна легко оценить отношение  $A/E_{TS}$ . Предполагая, что в каждой точке очага цунами дно поднялось на величину  $\eta$ , получаем

$$\frac{A}{E_{TS}} = \frac{2H}{\eta}. \quad (11)$$

В большинстве случаев глубина океана в области очага цунами на 3–4 порядка превосходит амплитуду деформации дна. Из формулы (11) следует, что

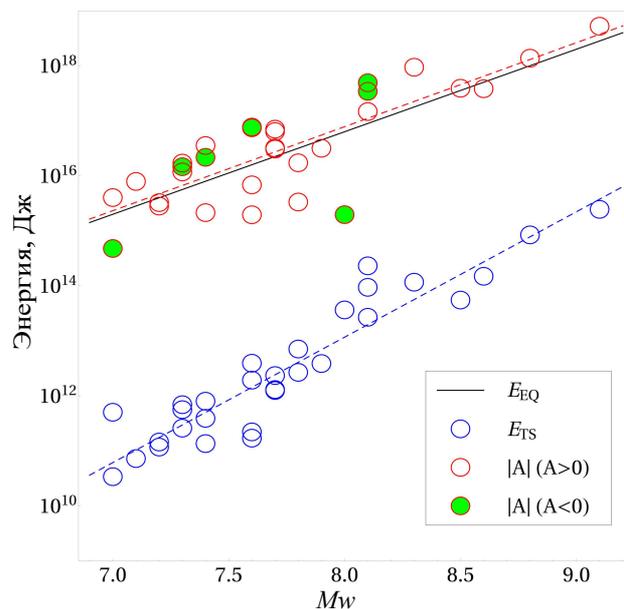


Рис. 2. Энергия землетрясения  $E_{EQ}$ , энергия цунами  $E_{TS}$  и абсолютная величина работы против сил гидростатического давления  $A$  в зависимости от моментной магнитуды землетрясения  $Mw$ . Черная сплошная линия построена в соответствии с формулой (8), пунктирные линии — регрессионные зависимости (12) и (13)

работа, совершаемая землетрясением, также должна на 3–4 порядка превосходить энергию волн цунами.

Далее перейдем от теоретических оценок к анализу набора реальных сильных подводных землетрясений, которые перечислены в таблице. Величины  $A$  и  $E_{TS}$  для этих событий рассчитывались в соответствии с формулами (7) и (9). Для расчетов необходимы: распределение глубин океана  $H$  и векторные поля косейсмических смещений дна  $\mathbf{D}$ . Батиметрические данные были заимствованы из цифрового атласа GEBCO (<https://www.gebco.net>), шаг сетки — 1 угл. мин. Векторные поля  $\mathbf{D}$  рассчитывались по данным о распределении подвижки (FFM — Finite Fault Model), представленным на сайте Геологической службы США (USGS), с применением формул Окада [38]. Описание методики и примеры расчетов можно найти в работах [34, 35].

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов величин  $A$  и  $E_{TS}$  сведены в таблицу и графически представлены на рис. 2. На рис. 2 абсолютная величина работы  $A$  и энергия цунами  $E_{TS}$ , а также энергия землетрясения  $E_{EQ}$  построены в зависимости от моментной магнитуды  $Mw$ . Величины  $A$  и  $E_{TS}$  показаны красными и синими кружками соответственно, а величина  $E_{EQ}$  — сплошной черной линией в соответствии с формулой (8). Пунктирные линии показывают регрессионные зависимости:

$$\log_{10} E_{TS}[\text{Дж}] = (2.3 \pm 0.3)Mw - 5.2 \pm 2.5, \quad (12)$$

$$\log_{10} A[\text{Дж}] = (1.5 \pm 0.4)Mw + 4.7 \pm 3.1. \quad (13)$$

Интервальные оценки в выражениях (12), (13) соответствуют 95 % вероятности.

Таблица. Дата, место и моментная магнитуда ( $Mw$ ) подводного землетрясения. Результаты расчета энергии цунами  $E_{TS}$  и работы землетрясения против сил гидростатического давления  $A$

№	Дата	Место	$Mw$	$E_{TS}$ , Дж	$A$ , Дж
1	20061115	Simushir	8.3	1.16E+14	9.39E+17
2	20070113	Simushir	8.1	2.31E+14	-4.9E+17
3	20070401	Solomon	8.1	2.68E+13	1.47E+17
4	20070815	Peru	8.0	3.64E+13	-1.96E+15
5	20070912	Kepulauan	7.9	3.86E+12	3.16E+16
6	20070912	S.Sumatra	8.5	5.51E+13	3.9E+17
7	20071114	Antofagasta	7.7	1.25E+12	3.06E+16
8	20080220	Simeulue	7.4	1.36E+11	2.14E+15
9	20080929	Kermadec	7.0	3.39E+10	4.02E+15
10	20090103	Papua	7.7	2.34E+12	3.2E+16
11	20090715	New Zealand	7.8	7.09E+12	3.34E+15
12	20090929	Samoa	8.1	9.38E+13	-3.43E+17
13	20090930	S.Sumatra	7.6	1.7E+11	6.84E+15
14	20091007	Vanuatu	7.7	1.3E+12	7.03E+16
15	20100112	Haiti	7.0	5.03E+11	-4.77E+14
16	20100227	Chile	8.8	8.42E+14	1.37E+18
17	20100406	N.Sumatra	7.8	2.67E+12	1.72E+16
18	20100509	N.Sumatra	7.2	1.17E+11	3.25E+15
19	20101025	Kepulauan	7.7	1.3E+12	6.37E+16
20	20101221	Bonin	7.4	7.99E+11	-2.16E+16
21	20101225	Vanuatu	7.3	6.9E+11	-1.46E+16
22	20110309	Japan	7.3	5.61E+11	1.17E+16
23	20110311	Tohoku	9.1	2.45E+15	5.22E+18
24	20110706	Kermadec	7.6	3.91E+12	-7.67E+16
25	20110820	Vanuatu	7.1	7.24E+10	7.88E+15
26	20111021	Kermadec	7.4	3.9E+11	3.54E+16
27	20120110	N.Sumatra	7.2	1.45E+11	2.81E+15
28	20120411	Sumatra	8.6	1.49E+14	3.82E+17
29	20120827	Salvador	7.3	2.59E+11	1.7E+16
30	20120831	Philippines	7.6	1.93E+12	7.45E+16
31	20120905	Costa Rica	7.6	2.21E+11	1.95E+15

Сопоставляя (8) и (12) можно заключить, что доля энергии землетрясения, переходящая к волнам цунами, растет с увеличением магнитуды  $Mw$ . При  $Mw = 7$  эта доля составляет 0.004%, а при  $Mw = 9$  — 0.16%. Этот результат соответствует полученным ранее данным [34, 39, 40].

Новым и неожиданным является результат сопоставления работы  $A$  и энергии землетрясения  $E_{EQ}$ . По абсолютной величине работа  $A$  оказывается сопоставимой с энергией землетрясения, а в ряде случаев и превышает ее почти на порядок. Если говорить про регрессионную зависимость (13) и красный пунктир на рис. 2, то в пределах погрешности она фактически

повторяет формулу Канамори (8). Физически это означает, что при поднятии или опускании водного слоя косейсмическими деформациями затрачивается энергия, сопоставимая с энергией, выделяющейся в очаге землетрясения. Можно предположить, что наличие или отсутствие водного слоя может оказывать некоторое влияние на процессы в очаге землетрясения. Здесь важно уточнить, что в формуле (8) под величиной  $E_{EQ}$  имеется в виду энергия сейсмических волн, излученных очагом землетрясения. Полная энергия, выделяющаяся в очаге землетрясения, может быть заметно больше.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Выполнен физический анализ процесса формирования волн цунами сейсмическими движениями дна. Показано, что при рассмотрении задачи о генерации цунами следует учитывать исключительно низкочастотные ( $f < f_g$ ) движения дна в нормальном к поверхности дна направлении. Установлено, что при сейсмических движениях дна, амплитуда которых существенно уступает глубине океана ( $\eta/H \ll 1$ ), давление на подвижное дно определяется главным образом гидростатической компонентой. При косейсмических смещениях дна совершается работа против сил гидростатического давления  $A$ , которая идет на изменение потенциальной энергии водного слоя. Незначительная часть этой потенциальной энергии — доступная потенциальная энергия ( $E_{TS}$ ) — переходит к волнам цунами:  $E_{TS}/A \sim \eta/H$ .

С использованием данных о структуре подвижки (Finite Fault Model) в очагах ряда сильных подводных землетрясений 21-го века выполнены оценки работы  $A$ , которая совершается против сил гидростатического давления, и энергии цунами  $E_{TS}$ . Установлено, что энергия  $E_{TS}$  на 3–4 порядка меньше работы  $A$ . Сопоставление величин  $A$  и  $E_{TS}$  с энергией землетрясения  $E_{EQ}$ , рассчитываемой по формуле Канамори, позволяет утверждать, что доля энергии землетрясения, переходящая к волнам цунами, незначительна и растет с увеличением моментной магнитуды  $Mw$  (при  $Mw = 7 - 0.004\%$ , при  $Mw = 9 - 0.16\%$ ). Но работа  $A$  по абсолютной величине оказывается сопоставимой с энергией землетрясения  $E_{EQ}$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №19-05-00351, №20-07-01098, №20-35-70038.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Global Historical Tsunami Database / NOAA National Centers for Environmental Information. <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>
2. Hammack J.L. // Journal of Fluid Mechanics. 1973. **60**, N 4. P. 769.
3. Yamashita T., Sato R. // Journal of Physics of the Earth. 1974. **22**, N 4. P. 415.
4. Okal E.A. // Natural Hazards. 1988. **1**, N 1. P. 67.
5. Доценко С. Ф., Соловьев С. Л. // Океанология. 1995. **35**, № 1. С. 25.
6. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Н. Новгород : ИПФ, 1996.
7. Носов М.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. **50**, № 5. С. 540.
8. Levin B.W., Nosov M.A. Physics of Tsunamis, Second Edition. Springer, 2016.
9. Liu C.M. // Wave Motion. 2020. **93**. P. 102489.
10. Ji C., Wald D.J., Helmberger D.V. // Bulletin of the Seismological Society of America. 2002. **92**, N 4. P. 1192.
11. Shao G., Li X., Ji C., Maeda T. // Earth, planets and space. 2011. **63**, N 7. P. 559.
12. Kajiura K. // Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. 1963. **41**, N 3. P. 535.
13. Braddock R.D., Van Den Driessche P., Peady G.W. // Journal of Fluid Mechanics. 1973. **59**, N 4. P. 817.
14. Носов М.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. **33**, № 1. С. 109.
15. Носов М.А., Шелковников Н.К. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1997. **33**, № 1. С. 145.
16. Saito T., Kubota T. // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2020. **48**. P. 121.
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Изд. 4-е, стереотипное, 1988.
18. Nosov M. et al. // Earth, Planets and Space. 2018. **70**, N 1. P. 1.
19. Толстой И., Клей К. С. Акустика океана: Теория и эксперимент в подводной акустике: Пер. с англ. Мир, 1969.
20. Watada S., Kusumoto S., Satake K. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2014. **119**, N 5. P. 4287.
21. Новикова Л.Е., Островский Л.А. // Океанология. 1982. **22**, № 5. С. 693.
22. Носов М.А., Колесов С. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2005. № 3. С. 51.
23. Matsumoto H. et al. // Journal of Disaster Research. 2017. **12**, N 1. P. 163.
24. Karpov V.A. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2020. **75**, N 4. P. 371.
25. Nosov M. et al. // Frontiers in Earth Science. 2021. **9**. P. 212.
26. Filloux J.H. // Journal of physical oceanography. 1983. **13**. N 5. P. 783.
27. An C. et al. // Geophysical Research Letters. 2017. **44**. N 20. P. 10,272.
28. Saito T. // Geophysical Journal International. 2017. **210**, N 3. P. 1888.
29. Bolshakova A. et al. // Russian Journal of Earth Sciences. 2011. **12**, N 2.
30. Okal E.A., Synolakis C.E. // Pure and applied geophysics. 2003. **160**, N 10. P. 2177.
31. Murty T.S. // Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences, Canadian Department of Fisheries and Oceans. 1984. **212**. P. 897.
32. Sementsov K.A. et al. // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. **124**, N 11. P. 8468.
33. Hanks T.C., Kanamori H. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1979. **84**, N B5. P. 2348.
34. Nosov M.A., Bolshakova A.V., Kolesov S.V. // Pure and Applied Geophysics. 2014. **17**, N 12. P. 3515.
35. Nosov M.A., Kolesov S.V. // Pure and Applied Geophysics. 2011. **168**, N 6-7. P. 1223.
36. Файн И.В., Куликов Е.А. // Вычислительные технологии. 2011. **16**, N 2. С. 111.
37. Носов М.А., Семенцов К.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. **50**, N 5. С. 612.
38. Okada Y. // Bulletin of the seismological society of America. 1985. **75**, N 4. P. 1135.
39. Kajiura K. // Bulletin of the Earthquake Research Institute. 1981. **56**. P. 415.
40. Большакова А.В., Носов М.А., Колесов С. В. // Вест. Моск. ун-та. Серия 3. Физ. Астрон. 2015. № 1. С. 61. (Bolshakova A.V., Nosov M.A., Kolesov S.V. // Moscow Univ. Phys. Bull. **70**, N 1. P. 61.)

## Energy Characteristics of Tsunami Sources and the Mechanism of Wave Generation by Seismic Movements of the Ocean Floor

**М.А. Nosov<sup>1,2,a</sup>, А.В. Bolshakova<sup>1,b</sup>, К.А. Sementsov<sup>1,c</sup>**

<sup>1</sup>*Chair of Physics of Sea and Inland Water, Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science. Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>[m.a.nosov@mail.ru](mailto:m.a.nosov@mail.ru), <sup>b</sup>[annabolshakova@list.ru](mailto:annabolshakova@list.ru), <sup>c</sup>[sebbest@yandex.ru](mailto:sebbest@yandex.ru)*

A physical analysis of the generation of tsunami waves by seismic movements of the ocean floor is presented. For a set of strong underwater earthquakes, the work done against hydrostatic pressure during coseismic displacements of the ocean floor and the available potential energy, tsunami energy, are estimated. It is shown that an insignificant part of the earthquake energy (from 0.004% for  $M_w = 7$  to 0.16% for  $M_w = 9$ ) is transferred to the tsunami waves, while the work done against the hydrostatic pressure is comparable in absolute value to the earthquake energy estimated by the Kanamori formula.

*Keywords:* tsunami generation, co-seismic displacements, tsunami energy.

*PACS:* 91.30.Nw.

*Received 19 October 2021.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2021. 76, Suppl. 1. Pp. S136–S142.*

### Сведения об авторах

1. Носов Михаил Александрович — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-16-77, e-mail: [m.a.nosov@mail.ru](mailto:m.a.nosov@mail.ru).
2. Большакова Анна Владимировна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: [annabolshakova@list.ru](mailto:annabolshakova@list.ru).
3. Семенцов Кирилл Александрович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-36-98, e-mail: [sebbest@yandex.ru](mailto:sebbest@yandex.ru).