

Н.К.В.Санникова, С.Ф.Доценко

Морской гидрофизический институт, г.Севастополь

**АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛН ЦУНАМИ
В СИСТЕМЕ БАСЕЙНОВ, СОЕДИНЕННЫХ
ПРЯМОЛИНЕЙНЫМ ПРОЛИВОМ**

В рамках нелинейной теории длинных поверхностных волн методом конечных разностей выполнен анализ энергетических характеристик волн цунами, распространяющихся из одного бассейна в другой через прямолинейный пролив постоянного прямоугольного поперечного сечения. Очаг цунами имеет эллиптическую форму и располагается в области, включающей шельфовую зону и материковый склон.

Изучено влияние силы трения, нелинейности и вращения Земли на перераспределение волновой энергии. Установлено, что наибольшее влияние на перераспределение энергии оказывает сила трения. Исследование влияния параметров пролива на количество переносимой во второй бассейн энергии, показало, что увеличение ширины пролива приводит к росту волновой энергии, переносимой во второй бассейн.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *волны цунами, эллиптический очаг генерации, энергия цунами, двумерное распространение нелинейные длинные волн, распространение в зоне пролива, численное моделирование.*

Исследование энергетических характеристик волн цунами – важная задача. Ее решение позволяют получить обобщенное представление о преимущественном направлении распространения волн, локализации области их захвата; определить участки побережья наиболее подверженные катастрофическому воздействию цунами.

В настоящей работе в рамках нелинейной теории длинных поверхностных волн методом конечных разностей выполнен анализ энергетических характеристик волн цунами, распространяющихся из одного бассейна в другой через прямолинейный пролив постоянного прямоугольного поперечного сечения. Очаг цунами имеет эллиптическую форму и располагается в области, включающей шельфовую зону и материковый склон. Процесс передачи энергии деформаций дна вышележащему водному слою изучался в [1 – 4].

Шельфовая зона, ограниченная с одной стороны берегом, а с другой – зоной резкого увеличения глубины (материковым склоном), может служить волноводом, над которыми происходит концентрация волновой энергии, создавая преимущественное направление распространения волн [5 – 8]. В представленной работе основное внимание уделено влиянию силы трения, нелинейности и вращения Земли на перераспределение энергетических характеристик в различных частях бассейна [9].

При прохождении волны цунами через пролив осуществляется передача волновых возмущений из одного бассейна, где произошло землетрясение, в другой. Такая ситуация, например, потенциально реализуется в системе Черное море – Азовское море – Средиземное море. Волны цунами 11 – 12 сентября 1927 г., 28 декабря 1939 г. и 12 июля 1966 г. прошли из Черного моря в Азовское через Керченский пролив: отголоски этих черноморских

цунами зарегистрированы в пунктах регистрации Опасное и Мариуполь в Азовском море [10]. Параметры модельного бассейна условно отражают основные черты береговой черты системы Черное море – Азовское море и соединяющий их Керченский пролив.

Перенос волновой энергии через проливы наблюдается при моделировании исторических цунами [11, 12], однако в рамках таких задач трудно оценить количество передаваемой энергии. Закономерности переноса энергии через проливы изучены недостаточно полно. Представляет интерес оценка коэффициента прохождения энергии передаваемой во второй бассейн через пролив в зависимости от параметров модели.

Математическая модель. Два бассейна (F1-F2-F3-F4-F5-F6-F1 и S1-S2-S3-S4-S5-S6-S1) соединены прямолинейным проливом (F3-F4-S4-S3-F3) прямоугольного поперечного сечения шириной B и длиной A (рис.1, а). Рельеф дна обоих бассейнов является цилиндрическим, то есть глубина бассейнов H зависит только от меридиональной координаты y .

При численном моделировании распространения волн глубина бассейна по y задавалась кусочно-линейной зависимостью (рис.1, б). Рельеф дна первого бассейна характеризуется шельфом с малым уклоном дна и крутым плоским материковым склоном. При $y \leq 0$ глубина бассейна постоянна. Глубины второго бассейна и пролива постоянные.

Рассмотрен традиционный генератор волн цунами – вертикальные смещения эллиптического участка дна G , происходящие при $t \geq 0$ по закону

$$h(x, y, t) = h_0(x, y)q(t), \quad (x, y) \in G, \quad (1)$$

который будет задан ниже. В формуле (1) t – время; x – зональная координата; $q = 0$ при $t \leq 0$.

В рамках нелинейной теории поверхностных длинных волн движение жидкости в бассейне в полных потоках описывается системой трех уравнений [13]

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{D} \right) - f \frac{V}{D} = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{D} \right) + f \frac{U}{D} = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (3)$$

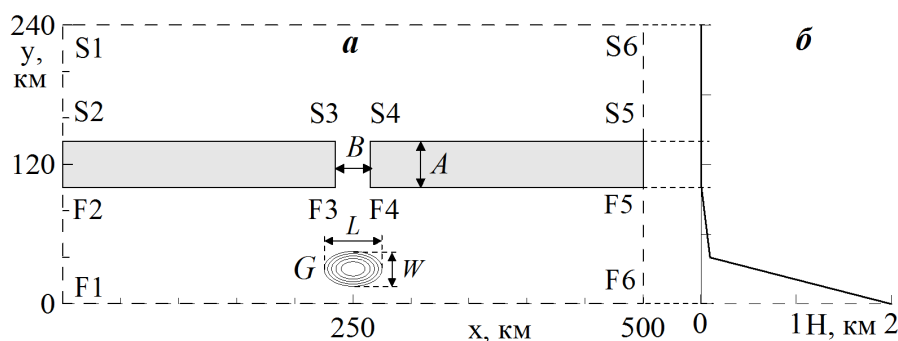


Рис. 1. Схема двух бассейнов с соединяющим их проливом (а) и цилиндрическое распределение глубины (б).

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

где $U(x, y, t)$ и $V(x, y, t)$ – проекции полного горизонтального потока жидкости на оси x и y соответственно; $\zeta(x, y, t)$ – смещение свободной поверхности слоя жидкости от горизонтального положения; $D = H(y) + \zeta(x, y, t) - h(x, y, t)$ – полная (динамическая) глубина жидкости с учетом смещений свободной поверхности и деформаций дна бассейна; g – ускорение свободного падения; f – постоянный параметр Кориолиса; $n = 0,013$ – параметр Маннинга. Значениям глубины $h > 0$ соответствует подъем, $h < 0$ – опускание дна бассейна.

В начальный момент времени жидкость неподвижна, ее свободная поверхность горизонтальна, поэтому

$$U = V = 0, \quad \zeta = 0 \quad (t = 0). \quad (5)$$

Исходные данные и вычислительный алгоритм. Задача (2) – (5) решалась численно методом конечных разностей в прямоугольной области F1-S1-S6-F6-F1, показанной на рис.1, а. Рассматривались два случая: в первом, расчетная область имеет шесть открытых участков границы F1-F2, F1-F6, F5-F6, S1-S2, S1-S6, S5-S6 и шесть участков в виде твердых вертикальных боковых стенок F2-F3, F4-F5, S2-S3, S4-S5, F3-S3, F4-S4, ограничивающих пролив (открытая область); во втором, все границы области являются закрытыми (закрытая область). На открытых участках границы задавались условия свободного выхода линейных длинных волн из расчетной области [8, 13, 14], на твердых участках границы – условия непротекания жидкости. Все эти условия записываются в виде

$$\frac{\partial U}{\partial t} - C \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (\text{F1-F6}), \quad \frac{\partial U}{\partial t} + C \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (\text{S1-S6}), \quad (6)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} - C \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (\text{F1-F2}), \quad \frac{\partial V}{\partial t} + C \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (\text{F5-F6}), \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} - C \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (\text{S1-S2}), \quad \frac{\partial V}{\partial t} + C \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (\text{S5-S6}), \quad (8)$$

$$V = 0 \quad (\text{F2-F3}), \quad V = 0 \quad (\text{F4-F5}), \quad V = 0 \quad (\text{S2-S3}), \quad V = 0 \quad (\text{S4-S5}), \quad (9)$$

$$U = 0 \quad (\text{F3-S3}), \quad U = 0 \quad (\text{F4-S4}), \quad (10)$$

где $C = \sqrt{gH(y)}$ – локальная скорость распространения линейных длинных волн. Условия свободного выхода волн из расчетной области являются приближенными для поставленной нелинейной задачи.

Смещения дна бассейна (1) в области эллиптической формы с центром в точке (x_0, y_0) задавались в виде

$$h_0 = a_0 \begin{cases} \cos^2(\pi\xi/2), & \xi \leq 1, \\ 0, & \xi > 1, \end{cases} \quad \xi = 2\sqrt{\frac{(x-x_0)^2}{L^2} + \frac{(y-y_0)^2}{W^2}}, \quad (11)$$

$$q = 0 \quad (t < 0), \quad q = t/T \quad (0 \leq t \leq T), \quad q = 1 \quad (t > T). \quad (12)$$

Здесь L и W – большая и малая оси эллиптической зоны деформации дна соответственно; $a_0 = h_0(x_0, y_0)$ – максимальное смещение дна бассейна;

T – длительность деформаций дна. Смещения дна (1), (11), (12) описывают изменения глубины бассейна с остаточными деформациями $h = h_0(x, y)$ ($t \geq T$).

Рельеф дна бассейна задавался следующим образом (рис.1, б): глубина континентального склона первого бассейна (0 – 60 км) убывает по направлению к проливу линейно от 2000 до 100 м; глубина шельфовой зоны (60 – 100 км) убывает по направлению к проливу от 100 до 10 м; глубина пролива и второго бассейна постоянна и равна 10 м. Длина пролива изменялась в вычислительных экспериментах от 30 до 50 км, ширина – от 5 до 50 км.

Для задания длины L и ширины W эллиптического участка дна, а также максимальных смещений дна a_0 использовались эмпирические зависимости от магнитуды землетрясения M , предложенные в работах [15, 16]. Результаты расчетов, представленные ниже, получены при $L = 50$ км, $W = 30$ км, $a_0 = 1$ м ($M = 7$), $T = 5$ с.

Начально-краевая задача (2) – (10) решалась, как уже отмечалось ранее, методом конечных разностей по явно-неявной схеме [8, 13, 14]. Для проекций потока жидкости U , V и смещений свободной поверхности ζ использовались разнесенные сетки (сетка Аракавы C). Шаги интегрирования по пространству и времени выбирались на основе вычислительных экспериментов. Для основной части расчетов пространственные шаги $\Delta x = \Delta y = 250$ м (сеточная область 2000×960 точек), шаг интегрирования по времени $\Delta t = 1$ с.

Полная энергия волн E получена как сумма кинетической и потенциальной энергий в каждой ячейке прямоугольной расчетной сетки; E_b – полная энергия жидкости в бассейне на пятой расчетной секунде.

Результаты численного анализа. При проведении первого численного эксперимента не учитывались силы трения и Кориолиса. Анализ эволюции энергии волн в отдельных частях открытого и закрытого бассейнов показал, что за весь промежуток расчетного времени полная энергия в закрытом бассейне сохраняется (рис.2, б, кривая 1). Установлено, что в рассмотренном случае во второй бассейн передается 30 % начальной волновой энергии (рис.2, а, кривая 4), около 50 % энергии захватывается шельфовой зоной, расположенной по обе стороны от входа в пролив. Энергия в замкнутой области, ограниченной боковой границей бассейна F2-F3 и бровкой шельфа практически постоянна (рис.2, б, кривая 5). Некоторые колебания связаны с тем, что захваченные волны претерпевают отражение не непосредственно от бровки шельфа, а в полосе, отстоящей от нее на ± 10 км. При начальном формировании волнового поля превалирует потенциальная энергия, далее она перераспределяется в кинетическую и потенциальную в равных пропорциях [1].

В рамках нелинейной модели длинных волн дополнительно были проведены расчеты энергетических характеристик волн цунами в открытой и закрытой областях для 4-х случаев: без учета трения и силы Кориолиса (рис.3, кривые 1); с учетом только трения (рис.3, кривые 3); с учетом только силы Кориолиса (рис.3, кривые 4); в рамках линейной модели без учета трения и силы Кориолиса (рис.3, кривые 2). Установлено, что наибольшее влияние на перераспределение энергии оказывает сила трения. Сопоставление расчетных данных, полученных в рамках нелинейных моделей с учетом силы трения и без нее, показало, что максимальное отличие составляет около 20 %. Эффекты нелинейности наиболее сильно проявляются в более мелко-

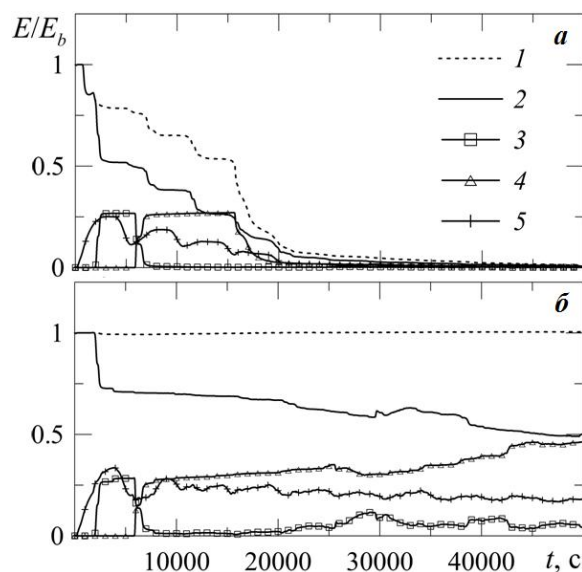


Рис. 2. Полная энергия в открытой (а) и закрытой (б) областях: во всей расчетной области (кривая 1); в первом бассейне (кривая 2); в проливе (кривая 3); во втором бассейне (кривая 4); в области, ограниченной боковой границей бассейна F2-F3 и бровкой шельфа (кривая 5).

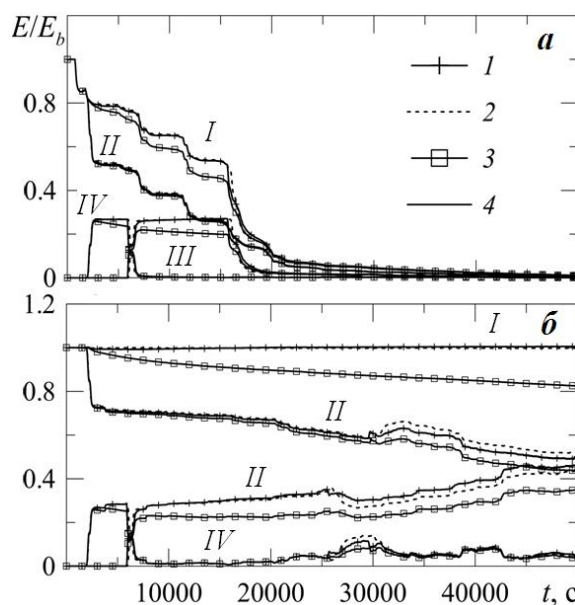
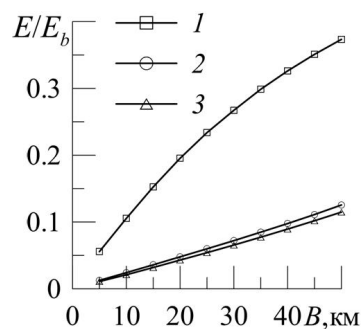


Рис. 3. Полная энергия в открытой (а) и закрытой (б) областях: во всей расчетной области (I); в первом (II) и во втором (III) бассейнах; в проливе (IV).

водной части расчетной ласти. Однако отличие четных данных, полученных в рамках нелинейной и линейной моделей, не превышает 5 %. Сила Кориолиса на расчетном временном промежутке практически не оказывает влияние на энергетические характеристики волн цунами, поэтому кривые 1 и 4 практически неразличимы (рис.3).

Представляет интерес оценка коэффициента прохождения энергии, передаваемой во второй бассейн через пролив, в зависимости от определяющих параметров. Установлено, что увеличение ширины пролива приводит к росту волновой энергии, переносимой во второй бассейн (рис.4). Наибольшее количество волновой энергии передается во второй бассейн в случае расположения очага цунами непосредственно напротив входа в пролив и составляет около 40 % (рис.4, кривая 1). Если очаг цунами сдвинут влево на одну или две длины очага, то наибольшее количество волновой энергии, переносимой во второй бассейн, составляет 10 % (рис.4, кривые 2, 3). Длина пролива практически не оказывает влияние на количество передаваемой во второй бассейн энергии и это свойство не зависит от положения очага цунами относительно входа в пролив.



Р и с . 4 . Часть полной энергии, передаваемой во второй, в зависимости от ширины пролива B для трех положений очага цунами: очаг расположен непосредственно напротив пролива (кривая 1), сдвинут влево на длину L (кривая 2) и $2L$ (кривая 3).

Заключение. В рамках нелинейной теории длинных поверхностных волн методом конечных разностей выполнен анализ энергетических характеристик волн цунами, распространяющихся от эллиптического очага цунами из одного бассейна в другой через

прямолинейный пролив постоянного прямоугольного поперечного сечения.

Анализ эволюции энергии волн в отдельных частях открытого и замкнутого бассейнов показал, что за весь промежуток расчетного времени полная энергия в замкнутом бассейне сохраняется. Установлено, что в рассмотренном случае во второй бассейн передается до 30 % начальной волновой энергии, около 50 % энергии захватывается шельфовой зоной, расположенной по обе стороны от входа в пролив.

Исследование влияния силы трения, нелинейности и вращения Земли на перераспределение волновой энергии показало, что наибольшее влияние на энергию волн оказывает сила трения. Сопоставление расчетных данных, полученных в рамках нелинейных моделей с учетом силы трения и без нее, показало, что максимальное отличие составляет около 20%. Эффекты нелинейности наиболее сильно проявляются в более мелководной части расчетной области. Однако, отличие расчетных данных, полученных в рамках нелинейной и линейной моделей, не превышает 5%. Сила Кориолиса на расчетном временном промежутке влияния практически не оказывает.

Изучение влияния определяющих параметров (длина и ширина пролива, положение очага цунами) на коэффициент прохождения энергии через пролив показало, что увеличение ширины пролива приводит к росту волновой энергии, переносимой во второй бассейн, в то время как его длина влияния практически не оказывает. Наибольшее количество волновой энергии передается во второй бассейн в случае расположения очага цунами непосредственно напротив входа в пролив и составляет около 40%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dutykh D., Dias F.* Energy of tsunami waves generated by bottom motion // *Proc. R. Soc. A.* – 2009. – v.465. – P.725-744.
2. *Kajiura K.* Tsunami source, energy and the directivity of wave radiation // *Bull. Earthquake Res. Inst.* – 1970. – v.48. – P.835-869.
3. *Dotsenko S.F., Korobkova T.Y.* The effect of frequency dispersion on plane waves generated as a result of bed motions // *Phys. Oceanogr.* – 1997. – v.8. – P.143-154.
4. *Velichko A.S., Dotsenko S.F., Potetyunko E.N.* Amplitude-energy characteristics of tsunami waves for various types of seismic sources generating them // *Phys. Oceanogr.* – 2002. – v.12. – P.308-322.
5. *Войт С.С.* Волны цунами // *Исследования цунами.* – 1987. – № 2. – С.8-26.
6. *Мурти Т.С.* Сейсмические морские волны цунами. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 447 с.

7. *Summerfield W.C.* On the trapping of wave energy by bottom topography.– Flinders Univ., South Australia, Horace Lamb Cent. Oceanogr. Res., Res. Pap. 30, 1969.– 214 p.
8. *Марчук Ан.Г., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.* Численное моделирование волн цунами.– Новосибирск: Наука, 1983.– 175 с.
9. *Санникова Н.К.В.* Энергетические характеристики волн цунами, распространяющихся из одного бассейна в другой через прямолинейный пролив // Молод. научно-практич. конф. «Экологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление прибрежной зоной».– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014.– С.155-157.
10. *Григораш З.К.* Обзор удаленных мареограмм некоторых цунами в Черном море // Тр. СахКНИИ.– 1972.– вып.29.– С.271-278.
11. *Rabinovich A.B., Lobkovsky L.I., Fine I.V., Thomson R.E., Ivelskaya T.N., Kulikov E.A.* Near-source observations and modeling of the Kuril Islands // Adv. Geosci.– 2008.– v.14.– P.105-116.
12. *Kowalik Z., Knight W., Logan T., Whitmore P.* The Tsunami of 26 December, 2004: numerical modeling and energy considerations // Pure appl. geophys.– 2006.– v.164.– P.1-15.
13. *Liu P.L.-F., Cho Y.-S., Briggs M.J. et al.* Runup of solitary waves on a circular island // J. Fluid Mech.– 1995.– v.302.– P.259-285.
14. *Вольцингер Н.Е., Клеванный К.А., Пелиновский Е.Н.* Длинноволновая динамика прибрежной зоны.– Л.: Гидрометеиздат, 1989.– 272 с.
15. *Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. и др.* Опыт картирования очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии.– М.: ИФЗ РАН, 1993.– вып.1.– С.99-108.
16. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейная динамика волн цунами.– Горький: ИПФ АН СССР, 1982.– 226 с.

Материал поступил в редакцию 24.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ В рамках нелінійної теорії довгих поверхневих хвиль методом кінцевих різниць виконано аналіз енергетичних характеристик хвиль цунамі, що розповсюджуються з одного басейну в інший через прямолінійну протоку постійного прямокутного поперечного перерізу. Осередок цунамі має еліптичну форму і розташовується в області, що включає шельфову зону і материковий схил. Вивчено вплив сили тертя, нелінійності і обертання Землі на перерозподіл хвильової енергії. Встановлено, що найбільший вплив на перерозподіл енергії надає сила тертя. Дослідження впливу параметрів протоки на кількість енергії, що переноситься у другий басейн, показало, що збільшення ширини протоки призводить до зростання хвильової енергії, що переноситься у другий басейн.

ABSTRACT In the frame of the nonlinear theory of long surface waves the energy characteristics of tsunami waves propagating from one basin to another through straight strait of constant rectangular cross-section were analyzed by finite difference method. The tsunami source has an elliptical shape and is located in the area, which includes the shelf and the continental slope.

The influence of the friction force, nonlinearity and rotation of the Earth on the reallocation of wave energy is studied. It was found that the biggest impact to energy reallocation comes from the friction force. Investigation of the influence of straight parameters on the amount of energy transferred to the second basin demonstrated showed that an increase of the width of the strait leads to an increase in wave energy transferred to the second basin.