

С.Ф. Доценко, Н.К.В. Санникова

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

АНАЛИЗ ДВУМЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ ИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ОЧАГА В ПРЯМОЛИНЕЙНЫЙ КАНАЛ

В рамках нелинейной теории длинных поверхностных волн методом конечных разностей выполнен анализ распространения волн цунами из бассейна, занимающего в плане полуплоскость, в прямолинейный канал постоянного прямоугольного поперечного сечения. Очаг цунами имеет эллиптическую форму и располагается в области, включающей шельфовую зону и материковый склон.

Установлено, что на характеристики волны, прошедшей в канал, влияют его ширина и положение очага цунами по отношению ко входу в канал. Максимальные высоты волн в канале реализуются для очагов цунами, расположенных на материковом склоне напротив входа в канал. Высоты волн в канале убывают при увеличении сдвига зоны генерации относительно входа в канал параллельно границе бассейна.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *волны цунами, эллиптический очаг генерации, двумерное распространение, нелинейные длинные волны, распространение цунами из бассейна в канал, численное моделирование.*

Введение. Разнообразие физико-географических факторов, влияющих на процессы распространения и трансформации цунами, приводит к значительной изменчивости высот волн вдоль береговой линии и, тем более, в удаленных друг от друга точках побережья с различной топографией местности [1]. Типичный пример – сильное цунами 4 октября 1994 г. на западном побережье Тихого океана, вызванное подводным землетрясением с магнитудой $M = 8,1$ в районе Курильских островов [2]. На восточном побережье Японии высоты волн при подходе к берегу достигали 1,73 м, а в среднем по всему тихоокеанскому бассейну они составили 0,4 м.

Значительное усиление волн цунами у берега отмечено в бухтах, заливах и устьях рек, в районах островов, проливов и других нерегулярностей рельефа дна и границ бассейна [3]. Анализ особенностей распространения, усиления и ослабления волн, вызванных указанными выше факторами, представляется важным не только для изучения общих физических закономерностей эволюции волн цунами, но и для совершенствования методов цунамирайонирования морского побережья.

Каналы, в частности проливы, представляют собой водные области, соединяющие смежные водоемы и предназначенные для прохода судов. При вхождении волны цунами в канал осуществляется передача волновых возмущений из одного бассейна, где произошло землетрясение, в другой. При прохождении канала может происходить значительное усиление волн. К сожалению, закономерности передачи энергии цунами через каналы изучены недостаточно полно.

Ниже в рамках нелинейной теории длинных поверхностных волн выполнен численный анализ распространения пространственной волны цуна-

ми из бассейна переменной глубины в прямолинейный канал прямоугольного поперечного сечения. Основное внимание уделено изучению влияния положения сейсмического источника по отношению к входу в канал и геометрических параметров сечения канала на характер распространения и высоты волн цунами в зоне канала.

Математическая модель. Рассмотрим показанный на рис. 1 прямоугольный бассейн ($F1-F2-F3-F4-F5-F6-F1$), к которому под прямым углом примыкает канал прямоугольного сечения ($F2-F3-S3-S2-F2$) ширины B (см. рис. 1, *a*). При этом батиметрия бассейна является цилиндрической: глубина H зависит только от меридиональной координаты y , то есть $H = H(y)$.

При численном моделировании волнового процесса распределение глубины бассейна $H(y)$ задавалось кусочно-линейной функцией (см. рис. 1, *б*). Рельеф дна характеризуется шельфом с малым уклоном и крутым плоским материковым склоном до изобаты 2 000 м. Глубина канала постоянна.

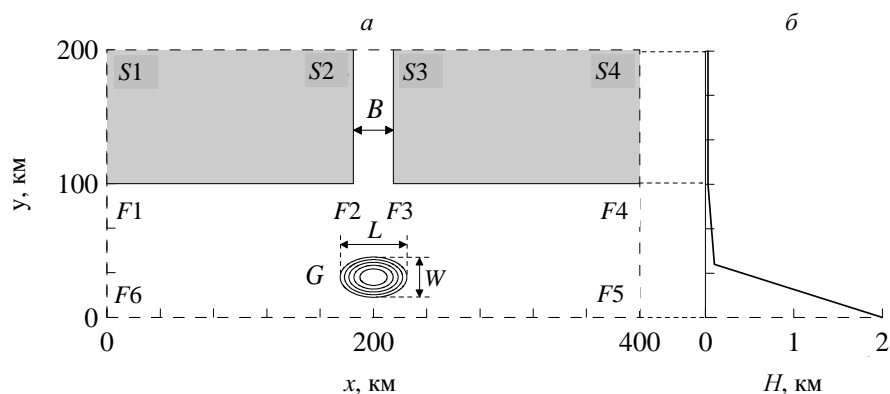


Рис. 1. Схема бассейна: *a*) – геометрия бассейна и примыкающего к нему канала; *б*) – распределение глубины бассейна.

Генератор волн – вертикальные смещения эллиптического участка дна G (см. рис. 1, *a*), происходящие при $t \geq 0$ по закону

$$h(x, y, t) = \begin{cases} h_0(x, y)q(t), & (x, y) \in G \\ 0, & (x, y) \notin G \end{cases}, \quad (1)$$

конкретный вид которого будет представлен ниже. В формуле (1) t – время; x – зональная координата; $q = 0$ при $t \leq 0$.

В рамках нелинейной теории длинных волн движение жидкости в бассейне описывается системой уравнений в полных потоках [4]

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

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

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

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 жидкости от горизонтального положения; $D = H(y) + \zeta(x, y, t) - h(x, y, t) > 0$ – полная глубина жидкости с учетом смещений свободной поверхности и деформаций дна бассейна; g – ускорение свободного падения; $n = 0,013$ – параметр Маннинга. Положительным значениям h соответствует подъем, отрицательным – опускание дна бассейна.

В начальный момент времени жидкость неподвижна, а ее свободная поверхность горизонтальная, а поэтому

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

Исходные данные и вычислительный алгоритм. Задача (2) – (5) решалась методом конечных разностей в области $F6-F5-S4-S1-F6$ (см. рис. 1, а). Она имеет четыре открытых участка границы $F1-F6$, $F4-F5$, $F5-F6$, $S2-S3$ и четыре участка в виде твердых вертикальных боковых стенок $F1-F2$, $F3-F4$, $F2-S2$ и $F3-S3$, ограничивающих бассейн и канал. На открытых участках границы задавались условия свободного выхода линейных длинных волн из расчетной области [4 – 6]. На твердых участках границы задавались условия непротекания жидкости. Весь комплекс граничных условий записывается в виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t} - C \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (F5-F6), \quad \frac{\partial U}{\partial t} + C \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (S2-S3), \quad (6)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} - C \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (F1-F6), \quad \frac{\partial V}{\partial t} + C \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (F4-F5), \quad (7)$$

$$V = 0 \quad (F1-F2), \quad V = 0 \quad (F3-F4), \quad U = 0 \quad (F2-S2), \quad U = 0 \quad (F3-S3), \quad (8)$$

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

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

$$h_0 = a_0 \begin{cases} \cos^2(\pi\xi/2), & \xi \leq 1, \\ 0, & \xi > 1, \end{cases} \quad \xi = 2\sqrt{\frac{(x-x_0)^2}{L^2} + \frac{(y-y_0)^2}{W^2}}, \quad (9)$$

$$q = 0 \quad (t < 0), \quad t/T \quad (0 \leq t \leq T), \quad 1 \quad (t > T). \quad (10)$$

Здесь $a_0 = h_0(x_0, y_0)$ – максимальное смещение дна бассейна; L и W – длины большой и малой осей эллиптической зоны деформации дна соответственно; T – длительность деформаций дна. Смещения дна (1), (9), (10) описывают изменения глубины бассейна с остаточными деформациями $h = h_0(x, y)$ ($t \geq T$).

Рельеф дна бассейна задавался следующим образом (см. рис. 1, б): глубина жидкости над континентальным склоном бассейна (0 – 60 км) убывает по направлению к берегу линейно от 2 000 до 100 м; глубина шельфовой зоны (60 – 100 км) убывает по направлению к береговой черте от 100 до 30 м; глубина канала постоянна (30 м). Ширина канала в вычислительных экспериментах изменялась в диапазоне 5 – 30 км.

Для задания длины L и ширины W эллиптического участка дна, а также максимального смещения дна a_0 использованы эмпирические зависимости от магнитуды землетрясения M , предложенные в работах [7, 8]. Результаты расчетов, представленные ниже, соответствуют значениям $L = 50$ км, $W = 30$ км и $a_0 = 1$ м ($M = 7$).

Начально-краевая задача (2) – (8) решалась методом конечных разностей по явно-неявной схеме [4 – 6]. Для проекций полного потока жидкости U , V и формы свободной поверхности ζ использовались смещенные сетки (сетка Аракавы C). Шаги интегрирования по пространству и времени выбирались путем численного экспериментирования. Для основной части расчетов пространственные шаги $\Delta x = \Delta y = 250$ м (сетка $1\ 600 \times 800$ узлов), шаг интегрирования по времени $\Delta t = 1$ с.

Численные эксперименты показали, что при входе волны в шельфовую зону бассейна и при распространении в канале происходит усиление вычислительной дисперсии. Для ее ослабления был применен метод работы [9]. Он использует направленные разности для производных от проекций полного потока жидкости U и V по x и y соответственно в сочетании с аппроксимациями более высокого порядка для частных производных по x и y в уравнениях (2) – (4). Помимо этого использовалось следующее осреднение смещений свободной поверхности жидкости ζ и проекций полного потока жидкости U , V через каждые 30 шагов по времени

$$\bar{\varphi}_{i,j}^{n+1} = \frac{31}{32} \varphi_{i,j}^{n+1} + \frac{\varphi_{i+1,j}^{n+1} + \varphi_{i-1,j}^{n+1} + \varphi_{i,j+1}^{n+1} + \varphi_{i,j-1}^{n+1}}{4 \cdot 32}.$$

Результаты численного анализа. При смещении участка дна бассейна (9), (10) формируется локальное возмущение жидкости. Для кратковременных подвижек форма свободной поверхности при $t = T$ практически повторяет остаточные деформации дна бассейна $\zeta = h_0(x, y)$ [10, 11]. Ниже значение $T = 5$ с и подвижку дна можно считать мгновенной. В процессе эволюции начального возмущения жидкости образуется волна цунами, пространственная структура и интенсивность которой вблизи берега зависят от положения очага цунами и параметров канала.

Вне зависимости от положения зоны деформаций дна G по отношению к входу в канал (см. рис. 1), наблюдается направленность распространения волн: волны наибольшей амплитуды излучаются в направлениях перпендикулярных большей оси очага цунами, то есть по направлению ко входу в канал и в направлении глубоководной части бассейна [12].

Трансформацию пространственной структуры волны для двух положений очага цунами относительно входа в канал иллюстрирует рис. 2. При смещении эллиптического участка дна в центральной части материкового

склона при $t = T$ формируется вытянутое вдоль изобат поднятие свободной поверхности жидкости (см. рис. 2, *а, ж*). При опускании его центральной части образуется асимметричная кольцевая волна с наибольшей амплитудой на участках, ориентированных к берегу и от него (см. рис. 2, *б, з*). Волна, излученная в глубоководную часть бассейна, выходит через открытые участки границы $F1-F6, F5-F6, F4-F5$.

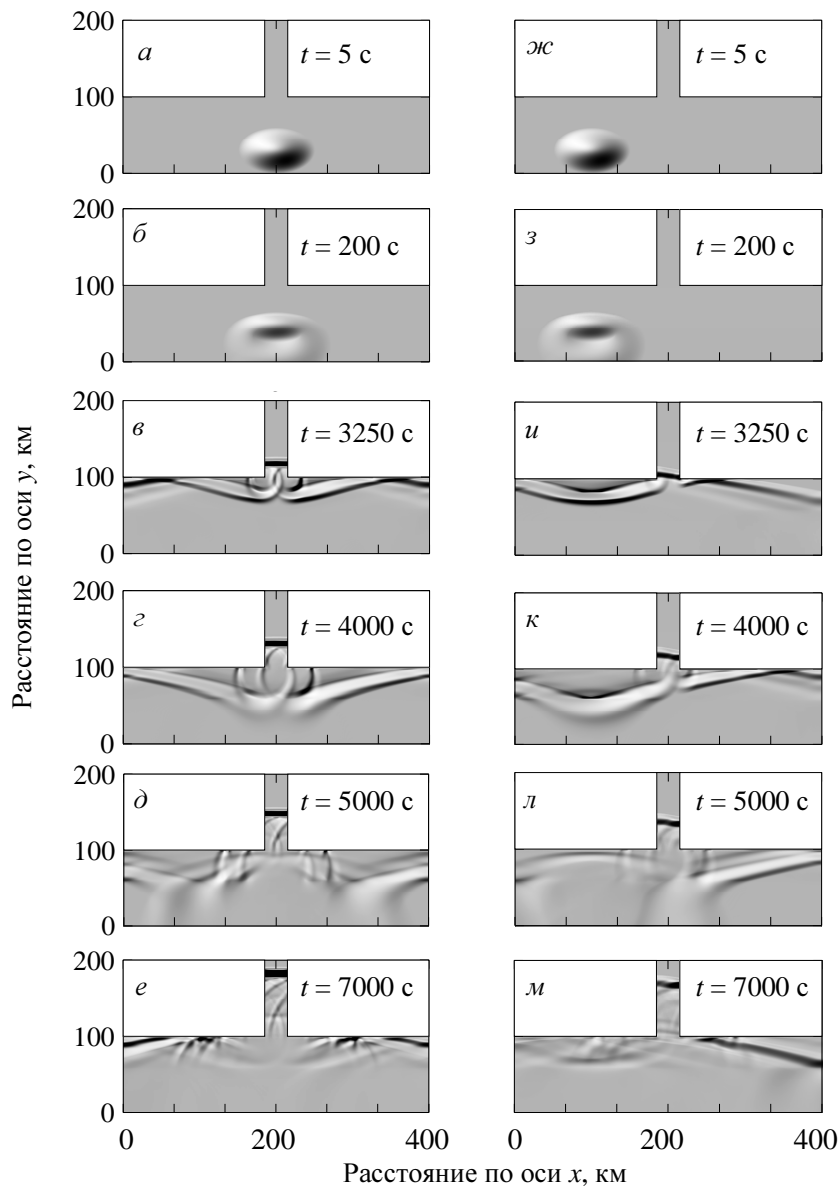


Рис. 2. Распространение волны цунами из эллиптической зоны генерации: (*а – е*) – очаг цунами располагается напротив входа в канал; (*ж – м*) – очаг сдвинут влево параллельно берегу на расстояние $2L = 100$ км. Моменты времени указаны на рисунках (*а – м*). Ширина канала (см. рис. 1, *а*) $B = 30$ км.

Наибольшую высоту имеет волна, распространяющаяся в сторону береговой черты. Она включает головную волну повышения и следующую за ней волну понижения свободной поверхности жидкости. Из-за уменьшения скорости распространения и рефракции длина волны уменьшается, высота увеличивается, а гребень стремится стать параллельным береговой черте (см. рис. 2, *в, и*) [1].

В случае расположения зоны генерации цунами непосредственно напротив канала при подходе к нему продолжается усиление волны. В результате ее отражения от боковых стенок $F1-F2$, $F3-F4$ формируется знакопеременная отраженная волна, распространяющаяся в отрицательном направлении оси y , а также две захваченные шельфом знакопеременные волны, распространяющиеся вдоль твердой границы бассейна в противоположных (относительно входа в канал) направлениях (см. рис. 2, *в*). Эффект вдольберегового распространения волн ранее описан в работах [1, 12]. Передний фронт волны проходит в канал и распространяется по нему (см. рис. 2, *д, е*). В дальнейшем волна выходит из расчетной области через открытый участок границы $S2-S3$.

В случае расположения очага цунами слева от канала динамика волн несколько иная. В результате отражения волны от боковой стенки $F1-F2$ образуется знакопеременная отраженная волна, распространяющаяся в отрицательном направлении оси y , и две захваченные шельфом знакопеременные волны, распространяющиеся вдоль твердой боковой границы в противоположных направлениях, как и в случае очага цунами напротив канала (см. рис. 2, *и*). Распространяющаяся вправо знакопеременная захваченная шельфом волна достигает входа в канал, частично проходит в него и частично продолжает свое распространение вдоль правой береговой стенки (см. рис. 2, *к – м*).

Профили свободной поверхности вдоль левой и правой границ канала, а также вдоль его центральной оси позволяют описать пространственную структуру волнового поля в зоне канала. Они представлены на рис. 3 для двух значений ширины канала. Очаг цунами расположен на материковом склоне и сдвинут влево от входа в канал параллельно берегу на расстояние двух его длин.

В случае относительно узкого канала в нем фактически распространяется волна повышения; существенных отличий в форме волны у левой, правой границ канала и вдоль центральной линии канала практически нет (см. рис. 3, *а – з*).

В более широком канале распространяется знакопеременная волна с головной волной повышения и следующей за ней волной понижения свободной поверхности жидкости. Форма волн у границ канала и вдоль его оси различна. Наибольшую высоту имеет волна, распространяющаяся у правой границы канала; со временем высота волны не убывает. У левой границы канала образуется возвышение поверхности жидкости, которое сменяется в последующем понижением уровня. С небольшой задержкой такие же колебания поверхности жидкости происходят и у правой границы (см. рис. 3, *д – з*). Задержку можно объяснить косым падением волны цунами на вход в канал.

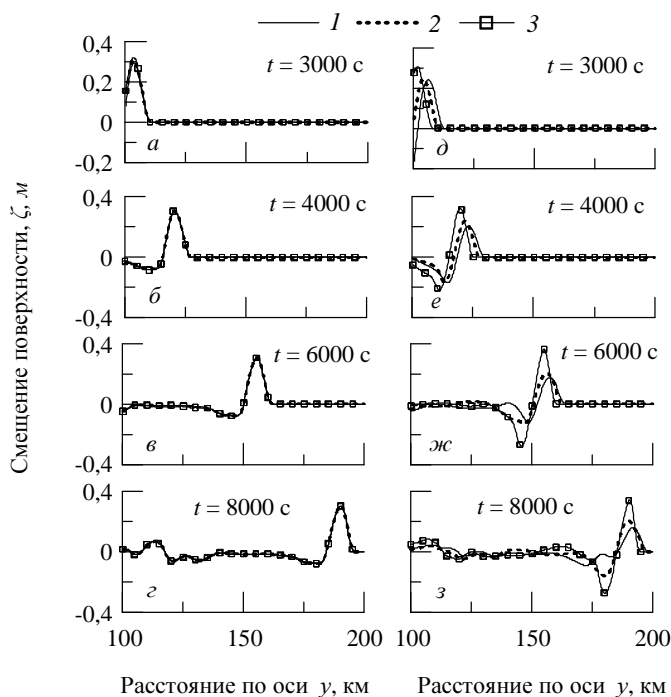


Рис. 3. Профили волн вдоль левой границы (кривые 1), средней линии канала (кривые 2), правой границы канала (кривые 3). Очаг цунами сдвинут влево параллельно берегу на расстояние $2L = 100$ км. Ширина канала B составляет 5 км ($a - з$) и 30 км ($д - з$).

Большой интерес представляют оценки амплитудных характеристик волн на входе, в средней части и на выходе из канала. Наибольшие по высоте волны цунами у берега образуются, при прочих равных условиях, в случае смещений дна в зоне материкового склона. Аналогичная зависимость от положения зоны генерации прослеживается и для высот волн в канале постоянного сечения.

Сказанное иллюстрирует рис. 4. Расчеты экстремальных смещений ζ вдоль оси y проведены для очагов, смещенных друг относительно друга на $\Delta y_0 = 5$ км.

Сравнение приведенных на рис. 4 зависимостей показывает, что чем больше смещение очага цунами относительно канала вдоль берега, тем меньше по абсолютной величине максимальные повышения поверхности жидкости на входе, в середине и выходе из канала. Для очагов, расположенных напротив входа в канал $F2-F3$, максимальные высоты волн достигаются в случае положения зоны генерации на материковом склоне. Для сдвинутых по оси x относительно канала очагов, экстремальные смещения поверхности жидкости возрастают с удалением очага цунами от боковой границы бассейна $F1-F2$, при этом максимальные высоты волн наблюдаются на входе в канал.

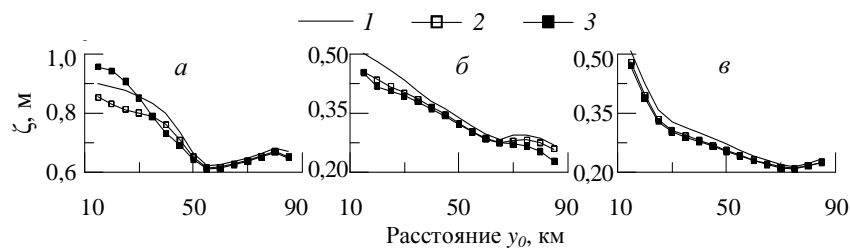


Рис. 4. Максимальные подъемы поверхности жидкости на входе в канал (кривые 1), в средней его части (кривые 2) и на выходе из канала (кривые 3) ($B = 5$ км) в зависимости от положения центра очага цунами y_0 на оси y и его смещения вдоль берега по отношению к входу в канал: a – очаг расположен непосредственно напротив входа в канал; b – очаг сдвинут влево на длину очага L ; v – очаг сдвинут влево на $2L$.

Описанную зависимость высот волн от сдвига очага цунами вдоль оси x можно объяснить следующим образом. В случае, когда очаг цунами расположен напротив канала, в него входит участок головной волны цунами. Горизонтальный сдвиг очага относительно входа в канал приводит к тому, что в него входит волна, образовавшаяся при отражении от боковой границы бассейна $F1-F2$.

Естественно ожидать зависимости высот волн цунами в канале от его ширины. На рис. 5 приведены зависимости максимального подъема ζ свободной поверхности жидкости на входе, в средней части и на выходе из канала в зависимости от ширины канала B , а также от положения очага цунами (на материковом склоне) относительно входа в канал (аналогично рис. 4). Если зона генерации цунами располагается напротив входа в канал, то увеличение ширины канала сопровождается уменьшением максимальных подъемов поверхности жидкости на входе, в середине и на выходе из канала. В этом случае максимальные повышения уровня жидкости наблюдаются на входе в канал, а минимальные – в его средней части.

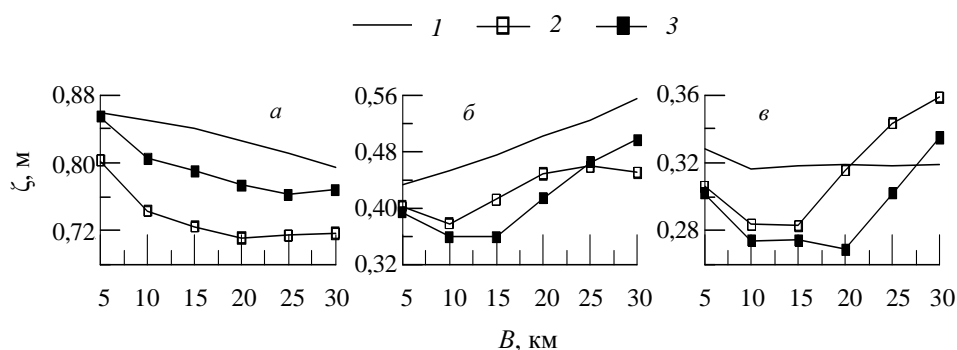


Рис. 5. Максимальные подъемы поверхности жидкости на входе в канал (кривые 1), в средней его части (кривые 2), на выходе из канала (кривые 3) в зависимости от ширины B канала для трех положений очага цунами: a – очаг расположен напротив канала; b – очаг сдвинут влево на длину очага L ; v – очаг сдвинут влево на $2L$.

Заключение. В рамках теории нелинейных длинных волн численно решена задача о распространении волны цунами из бассейна, включающего шельф и материковый склон, в прямолинейный канал постоянной глубины. Эллиптическая зона деформаций дна располагается на материковом склоне.

Показано, что ширина канала и расположение очага цунами по отношению к входу в канал влияют на структуру и амплитудные характеристики волны, как в бассейне, так и в канале. Максимальные высоты цунами на входе, в канале и на выходе из него наблюдаются для зон деформаций дна на материковом склоне непосредственно напротив входа в канал.

Для очагов цунами, расположенных напротив входа в канал, волна в канале близка к плоской (мало изменяется поперек канала). Аналогичная ситуация имеет место для сдвинутых относительно входа в канал очагов, но каналов относительно малой ширины. При увеличении ширины канала и смещении очага цунами от входа в канал влево возникает асимметрия волнового поля в канале с максимальными высотами волн у правой границы.

Анализ интенсивности цунами в канале в зависимости от расстояния очага до береговой границы показал, что для очагов цунами, находящихся напротив входа в канал, максимальные высоты волн достигаются в случае положения зоны генерации на материковом склоне. Для сдвинутых вдоль берега очагов экстремальные смещения поверхности жидкости возрастают с удалением очага цунами от боковой границы бассейна, при этом максимальные высоты волн наблюдаются на входе в канал.

Если зона генерации цунами располагается напротив входа в канал, то увеличение ширины канала сопровождается уменьшением максимальных подъемов поверхности жидкости на входе, в средней части и на выходе из канала. В этом случае максимальные повышения уровня жидкости наблюдаются на входе в канал, а минимальные – в средней части канала.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины в рамках научного украинско-российского проекта № 05-05-10 (У) (Постановление Президиума НАН Украины от 26.05.2010 № 155).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны цунами. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 447 с.
2. Gusiakov V.K. Tsunami runup values in Russia, tsunamis of 4 October 1994 // Tsunami Newsletter. – 1995. – vol. 27, № 1. – P. 2.
3. Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. – М.: Наука, 1974. – 308 с.
4. Liu P.L.-F., Cho Y.-S., Briggs M.J. et al. Runup of solitary waves on a circular island // J. Fluid Mech. – 1995. – vol. 302. – P. 259-285.
5. Марчук Ан.Г., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Численное моделирование волн цунами. – Новосибирск: Наука, 1983. – 175 с.
6. Вольцингер Н.Е., Клеванный К.А., Пелиновский Е.Н. Длинноволновая динамика прибрежной зоны. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.

7. 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.
8. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
9. Kowalik Z. Basic relations between tsunamis calculation and their physics – II // Science of Tsunami Hazards. – 2003. – vol. 21, № 3. – P. 154-173.
10. Kajiwara K. Tsunami source, energy and directivity of wave radiation // Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ. – 1970. – vol. 48, № 5. – P. 835-870.
11. Доценко С.Ф. Влияние остаточных смещений дна океана на эффективность генерации направленных волн цунами // Известия РАН, серия: Физика атмосферы и океана. – 1995. – том 31, № 4. – С. 570-576.
12. Доценко С.Ф. Закономерности распространения цунами на шельфе Черного моря из эллиптической зоны генерации // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 6. – С. 18-27.

Материал поступил в редакцию 14.11.2011 г.

АНОТАЦІЯ У рамках нелінійної теорії довгих поверхневих хвиль методом кінцевих різниць виконано аналіз розповсюдження хвиль цунамі з басейну, що займає в плані півплощин, в прямолінійний канал постійного прямокутного поперечного перерізу. Осередок цунамі має еліптичну форму і розташовується в області, що включає шельфову зону і материковий схил.

Встановлено, що на характеристики хвилі, що пройшла у канал, впливають його ширина і положення осередка цунамі за відношенням до входу у канал. Максимальні висоти хвиль у каналі реалізуються для осередків цунамі, розташованих на материковому схилі навпроти входу у канал. Висоти хвиль у каналі збувають за збільшенням зсуву зони генерації відносно входу у канал паралельно границі басейна.

ABSTRACT In the frame of the nonlinear theory of long surface waves a numerical analysis by finite difference method of the tsunami wave propagation from the basin, which occupies a half-plane, to the straight channel of constant rectangular cross section was carried out. The tsunami source has an elliptical shape and is located in the area, which includes the shelf and the continental slope.

It is found that the characteristics of wave transmitted into the channel are affected by the width and the position of the tsunami source with respect to the entrance of the channel. The maximum wave heights in the channel are achieved for the tsunami source generating zones located on the continental slope in front of the channel entrance. Wave heights in the channel decrease if the generation zone shifts parallel to the basin boundary with respect to the channel entrance.