

Применение каналовой модели для описания распространения одиночных волн типа цунами в канале переменного поперечного сечения

© 2015 А.Ю. Базыкина, С.Ф. Доценко

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: sf_dotsenko@mail.ru*

Поступила в редакцию 25.06.2014 г.

Каналовая модель линейных длинных волн применена для описания распространения одиночных волн в канале переменного поперечного сечения, моделирующем пролив Босфор. Выполнен численный анализ максимальной высоты и волновой скорости для волн, движущихся из Мраморного моря в Черное и наоборот, а также для случая эволюции начального смещения жидкости при различном его положении в проливе. Рост высоты волны и волновой скорости взаимосвязан с уменьшением ширины пролива и площади его поперечных сечений. При распространении волн из Черного моря в Мраморное усиление волн более значительное, чем при их распространении в обратном направлении. В случае волн, распространяющихся из зоны генерации цунами на среднем участке пролива, наибольшие подъемы поверхности жидкости не превышают по абсолютной величине начального смещения морской поверхности.

Ключевые слова: волны цунами, пролив Босфор, каналовая теория длинных волн, численные решения, распространение волны в проливе, усиление волн.

Введение. Морские проливы представляют собой водное пространство между двумя участками суши, соединяющее смежные водные бассейны или их части и используемое для судоходства. Как правило, проливы и примыкающие к ним морские акватории являются зонами интенсивных течений и волновых процессов, что говорит о необходимости всестороннего изучения динамики вод в таких районах Мирового океана, где судоходство связано с немалым риском.

Зона пролива Босфор – место столкновения двух материковых плит, она сейсмически активна, там всегда существует вероятность подземных толчков. Поэтому опасность цунами здесь не должна игнорироваться. Такие волны могут быть вызваны как подводными землетрясениями, так и землетрясениями на суше. В работе [1] представлена карта исторических землетрясений региона Черного моря и его обрамлений, произошедших до 1900 г. Показано, что в районе Босфора наблюдались землетрясения с магнитудой свыше 5.

Так, в Босфоре в 557 г. отмечено цунами, которое сопровождалось волнами высотой 2 – 3 м [2].

В связи с плотной застройкой побережья, ведущейся хозяйственной деятельностью и существованием расположенных у моря зон отдыха катастрофические последствия может иметь цунами высотой 0,5 м. Поэтому и возрастает потребность в детальном изучении возможных наибольших высот этих волн.

В данной работе рассматривается распространение поверхностных длинных волн в канале, моделирующем пролив Босфор. Анализируется изменение характеристик волн при распространении из Черного моря в Мраморное и наоборот. Для описания эволюции линейных длинных волн в проливе приме-

нена каналовая теория, в которой в качестве основных переменных используются осредненные поперек зеркала канала смещения свободной поверхности и средняя горизонтальная скорость течения в поперечном сечении пролива [3, 4].

Каналовая теория длинных волн нашла свое применение в теории приливов [5, 6], при описании распространения волн типа цунами в каналах переменного сечения [7], приливных волн в устьях рек [8], поверхностных [9] и внутренних (двухслойная жидкость) [10] сейш и др. Несомненное достоинство каналовой теории волн – замена двумерной задачи одномерной.

Математическая постановка задачи. В горизонтальной плоскости Ox_1y_1 (x_1, y_1 – декартовы координаты точки на плоскости) рассматривается криволинейный канал (рис. 1), поперечное сечение которого $S = S(x)$ и ширина зеркала $b = b(x)$ непрерывно изменяются вдоль оси канала по известным законам, где x – криволинейная координата вдоль средней линии канала. Через $H = H(x)$ обозначим максимальную глубину канала в его поперечном сечении в точке x .

В линейном приближении рассмотрим три варианта задачи по распространению длинной волны в проливе: задача I – распространение одиночной волны вдоль пролива из точки $x = 0$ (Мраморное море) и выходящей из него в противоположном конце, обозначенном как точка $x = L$ (Черное море); задача II – распространение одиночной волны, входящей в пролив в точке $x = L$ (Черное море) и выходящей из него в противоположном конце в точке $x = 0$ (Мраморное море); задача III – эволюция одиночного начального смещения свободной поверхности жидкости в центральной части пролива.

Для описания распространения поверхностной волны воспользуемся каналовой теорией длинных волн [3, 4]. Она является одномерной аппроксимацией модели длинных волн и оперирует осредненной по поперечному сечению канала горизонтальной скоростью $u = u(x, t)$ (t – время) и осредненным вдоль поперечного сечения зеркала пролива по координате y смещением свободной поверхности жидкости $\zeta = \zeta(x, t)$.

В рамках этого подхода линейное движение жидкости в канале описывается системой двух уравнений

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial (Su)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения. Исключение продольной скорости u из системы (1) приводит к одномерному волновому уравнению с зависящими от координаты x коэффициентами:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - \frac{g}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) = 0. \quad (2)$$

Величина

$$C(x) = \sqrt{\frac{gS(x)}{b(x)}}$$

выступает в роли локальной скорости распространения длинных волн в канале переменного сечения.

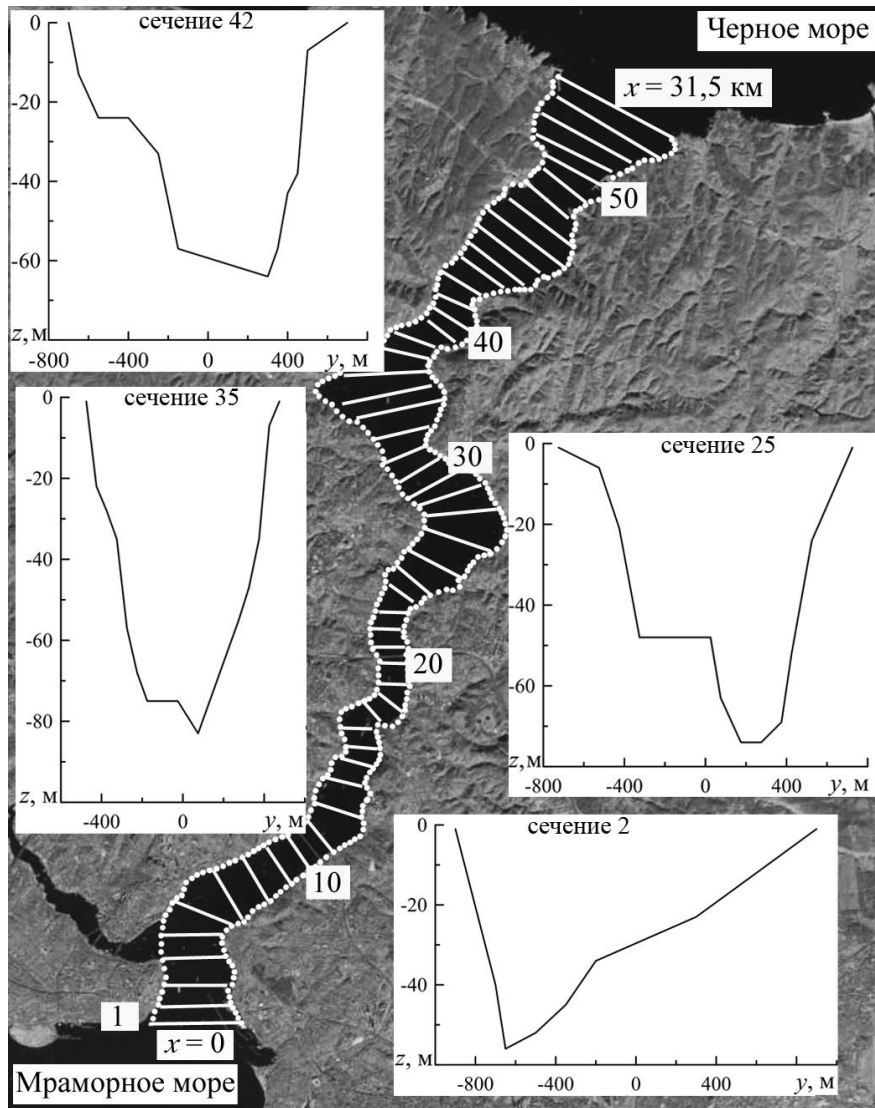


Рис. 1. Пролив Босфор с указанием положений 54 поперечных сечений и распределений глубины (на врезках) в сечениях 2, 25, 35 и 42

Начальные условия для системы уравнений (1) требуют задания полей u и ζ в начальный момент времени $t = 0$. Будем считать, что при $t = 0$ жидкость в канале для задач I и II находится в невозмущенном состоянии, т. е.

$$u(x,0) = \zeta(x,0) = 0, \quad (3)$$

а для задачи III – возмущена, но неподвижна, т. е.

$$u(x,0) = 0, \quad \zeta(x,0) = \zeta_0(x). \quad (4)$$

Задачи I, II и III, указанные выше, отличаются заданием граничных условий на концах канала, а именно задача I моделирует вход одиночной волны в пролив через левую границу, если задать:

$$\zeta = a_0 \sin(\pi\tau_1), \quad u = \sqrt{\frac{gb}{S}} \zeta \quad (x=0, 0 \leq t \leq T_1), \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - C_0 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x=0, t > T_1), \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + C_1 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x=L, t \geq 0), \quad (7)$$

где a_0 – максимальное начальное смещение свободной поверхности жидкости; $\tau_1 = \frac{t}{T_1}$; $C_0 = C(0)$; $C_1 = C(L)$; $T_1 = \lambda / C_0$, λ – начальная ширина волны.

В задаче II граничные условия воспроизводят вхождение одиночной волны в пролив через правую границу, если:

$$\zeta = a_0 \sin(\pi\tau_2), \quad u = -\sqrt{\frac{gb}{S}} \zeta \quad (x=L, 0 \leq t \leq T_2), \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + C_1 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x=L, t > T_2), \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - C_0 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x=0, t \geq 0), \quad (10)$$

где $\tau_2 = \frac{t}{T_2}$; $T_2 = \lambda / C_1$.

В задаче III форма свободной поверхности в начальный момент времени задается в виде одиночного однознакового смещения, целиком находящегося в зоне пролива, а условия на концах пролива моделируют свободный выход волн:

$$\zeta = a_0 \cos^2\left(\frac{\pi(x-x_0)}{\lambda}\right) \quad (t=0, 0 \leq x \leq L, |x-x_0| \leq \frac{1}{2}\lambda), \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - C_0 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x=0, t \geq 0), \quad (12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + C_1 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x=L, t \geq 0). \quad (13)$$

Параметры области начального смещения жидкости должны удовлетворять условию $\lambda/2 \leq x_0 \leq L - \lambda/2$, которое гарантирует расположение области начального возмущения жидкости внутри зоны канала.

Все три начально-краевые задачи, а именно задача I, включающая систему уравнений (1) и граничные условия (5) – (7), задача II, включающая уравнения (1) и граничные условия (8) – (10), и задача III, включающая систему уравнений (1), начальные условия (4), (11) и граничные условия (12), (13), решались численно методом конечных разностей по явно-неявной схеме на

сдвинутых на полшага по координате x относительно друг друга равномерных сетках для полей u и ζ [11].

Длина пролива, соединяющего Черное и Мраморное моря, $L = 31,5$ км, максимальная ширина – 3600 м (на севере), наименьшая ширина – 790 м, глубина фарватера от 33 до 80 м. В Босфоре существует двухслойное течение, состоящее из потока распресненной воды в верхнем слое из Черного моря в Мраморное, движущегося на юг со скоростью $1,5 - 2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, и соленого нижнего течения из Мраморного моря в Черное, имеющего скорость $0,9 - 1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Соленое течение продолжается в Черном море в виде глубинного потока.

Для задания геометрии пролива использовано 54 поперечных сечения вдоль оси x . Распределения глубины в некоторых из них показаны на врезках на рис. 1. По форме сечений находилась локальная ширина зеркала пролива $b(x)$. Площади поперечных сечений $S(x)$, входящие в систему уравнений длинных волн (1), рассчитывались методом трапеций. Для определения параметров канала в промежуточных точках выполнялась линейная интерполяция.

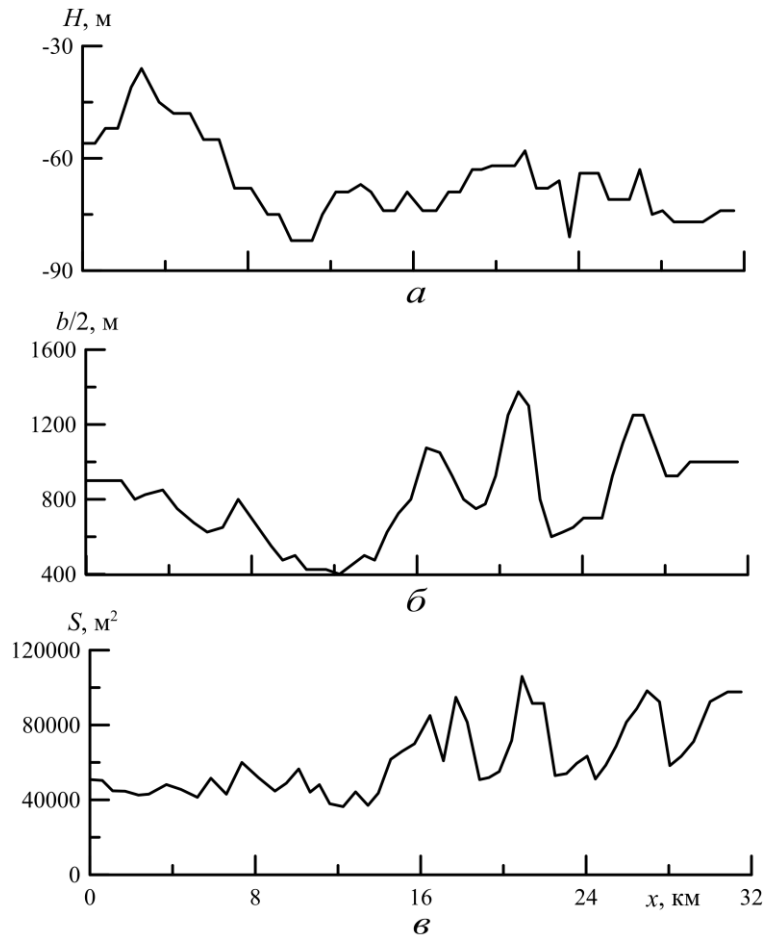


Рис. 2. Распределения вдоль оси пролива Босфор максимальной глубины (а), полуширины зеркала (б) и площади поперечного сечения (в)

На рис. 2 представлены найденные этим способом кусочно-линейные распределения максимальной глубины пролива $H(x)$ (рис. 2, *a*), полуширины зеркала пролива $b(x)/2$ (рис. 2, *б*) и площади его поперечного сечения $S(x)$ (рис. 2, *в*). Входу в пролив Босфор из Мраморного моря соответствует точка $x = 0$, выходу из пролива в Черное море – точка $x = L$. Изменения вдоль пролива всех геометрических параметров нерегулярны и характеризуются участками возрастания и убывания.

При численной реализации конечно-разностного алгоритма использована равномерная сетка с 5000 – 10000 шагов по координате x и с шагом по времени t до 0,1 с.

Распространение одиночной волны из Мраморного моря в Черное и наоборот. Одиночная волна, вошедшая в пролив из Мраморного моря, распространяется с переменной локальной скоростью $C(x)$, изменяя свою высоту (рис. 3).

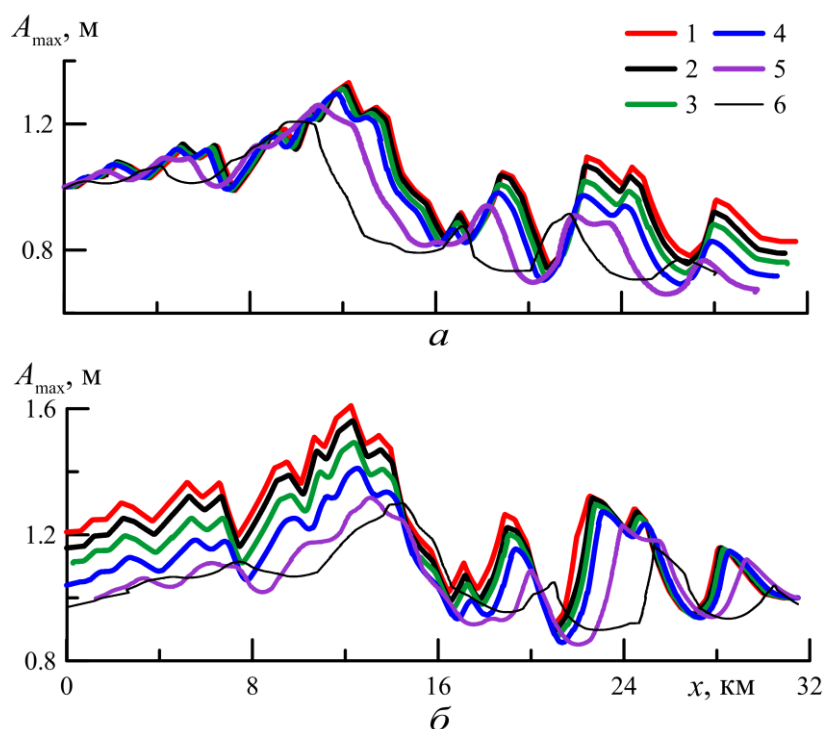


Рис. 3. Изменение вдоль оси пролива максимально возможных высот волн, распространяющихся из Мраморного моря в Черное (*a*) и из Черного моря в Мраморное (*б*), при различных первоначальных длинах волн: 1 – расчет по приближенной формуле (18), приведенной ниже; 2 – $\lambda = 0,5$ км; 3 – $\lambda = 1$ км; 4 – $\lambda = 2$ км; 5 – $\lambda = 5$ км; 6 – $\lambda = 10$ км (исходная высота волны 1 м)

Найденные численно при всех $t > 0$ распределения вдоль пролива максимально возможных высот поверхностных волн показаны на рис. 3, *a* для пяти значений начальной длины входящей в пролив волны. Заметим, что длина исходной волны определяется как ширина начального смещения жидкости на

высоте $1/3a_0$. Как следует из этого рисунка, распределения высот волн зависят от начальной длины волны, т. е. фактически от соотношения между длиной волны λ и характерным масштабом изменения геометрических параметров канала. Наблюдается тенденция роста в целом максимальных высот волн в проливе при уменьшении длины. На отдельных участках происходит увеличение высоты волны в 1,3 раза. Как правило, локальное усиление длинных волн связано с локальным уменьшением ширины пролива и площади его поперечных сечений.

Аналогичная связь высот волн и локальной геометрии поперечных сечений проявляется в каналах для гармонических по времени волн [12]. Чем длиннее волна, тем менее значимо влияние на нее изменений формы пролива, хотя в целом для всех пяти значений длины волны характер изменения высот волн по координате x качественно одинаков.

Рассмотрено также изменение максимальной высоты длинной волны при распространении в проливе из Черного в Мраморное море. Для пяти значений длины волны на входе в пролив (Черное море) распределения максимальных высот волн вдоль пролива представлены на рис. 3, б. Они зависят от длины входящей в него волны. Как и в предыдущем случае, наблюдается увеличение максимально возможных высот волн при уменьшении длины. На отдельных участках пролива происходит увеличение высоты в 1,5 раза.

Представляет интерес рассмотрение распространения в проливе достаточно коротких по сравнению с неоднородностями поперечных сечений пролива (но длинных с точки зрения теории длинноволновых процессов) поверхностных волн. Такой подход применительно к каналам переменного прямоугольного сечения изложен, например, в работе [13].

Для канала прямоугольного сечения $S(x) = b(x)H(x)$ уравнение (2) сводится к виду

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - g \left(\frac{dH}{dx} + \frac{H}{b} \frac{db}{dx} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - gH \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} = 0. \quad (14)$$

Для преобразования уравнения (14) к дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами выполним замену искомой функции по формуле

$$\zeta(x, t) = A(x)\Phi[t, \theta(x)], \quad (15)$$

где $A(x)$, $\Phi[t, \theta]$, $\theta(x)$ – неизвестные функции. Подставив зависимость (15) в уравнение (14), получим

$$\begin{aligned} & A \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - g \left(\frac{dH}{dx} + \frac{H}{b} \frac{db}{dx} \right) \left(\Phi \frac{dA}{dx} + A \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dx} \right) = \\ & = gH \left[\Phi \frac{d^2 A}{dx^2} + 2 \frac{dA}{dx} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dx} + A \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \frac{d^2 \theta}{dx^2} + A \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

Это равенство сводится к волновому уравнению с постоянными коэффициентами при выполнении трех дифференциальных соотношений [13]:

$$\frac{d^2 A}{dx^2} + \frac{1}{Hb} \frac{d(Hb)}{dx} \frac{dA}{dx} = 0, \quad (16)$$

$$2Hb \frac{d\theta}{dx} \frac{dA}{dx} + \frac{d}{dx} \left(Hb \frac{d\theta}{dx} \right) A = 0, \quad (17)$$

$$gH \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 = 1.$$

Проинтегрировав уравнение (16) по x с учетом одномерного уравнения эйконала (17), получим закон сохранения (закон Грина [3, 5]):

$$AH^{\frac{1}{4}} b^{\frac{1}{2}} = \text{const.}$$

Для канала прямоугольного сечения и волн, распространяющихся из Мраморного в Черное море, этот закон можно записать в виде

$$A(x) = A(0) \left[\frac{b(0) S(0)}{b(x) S(x)} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (18)$$

Аналогичная зависимость справедлива для волн, распространяющихся из Черного в Мраморное море. Зная закон изменения высоты волны (18), можно посредством первого из уравнений длинных волн (1) найти приближенное выражение для амплитуды волновой скорости в случае волн вида (15) в канале с медленно изменяющейся геометрией поперечных сечений:

$$U(x) \approx \pm \frac{g}{C} A(x). \quad (19)$$

На рис. 3 рассчитанные кривые 2 – 6 дополнены зависимостями (18) для максимальных высот длинных волн, распространяющихся из Мраморного моря в Черное и наоборот. Распределения высот волн A_{\max} вдоль пролива в случае относительно коротких волн (0,5 и 1 км) мало отличаются от рассчитанных по аналитической формуле (18) вне зависимости от направления распространения волны. С увеличением длины волны это различие становится более существенным. Заметим, что различие распределений высот волн увеличивается с ростом пройденного волнами расстояния от точки входа в пролив. Высоты более длинных поверхностных волн менее чувствительны к изменениям геометрических параметров пролива. В целом наибольшие высоты волн приходятся на участки пролива, где его ширина и площадь поперечного сечения наименьшие.

Также выполнены численные расчеты изменения вдоль пролива максимальной и минимальной усредненных по поперечным сечениям горизонтальных скоростей. При распространении волны из Мраморного моря в Черное преобладает волновое течение положительного направления (рис. 4, а). Если волна входит в канал из Черного моря, то знак волновой скорости изменяется на противоположный (рис. 4, б). Для относительно коротких волн (0,5 – 1 км) распределение скорости вдоль пролива описывается приближенной формулой (19), которая позволяет оценить максимальную волновую скорость для

волн, распространяющихся из Мраморного моря в Черное, и минимальную волновую скорость для волн, распространяющихся из Черного моря в Мраморное.

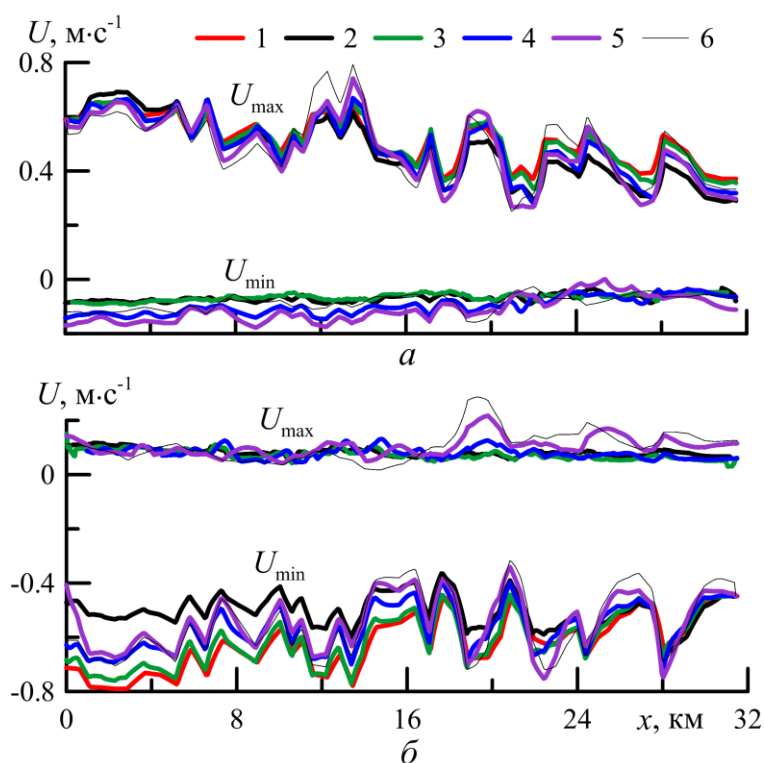


Рис. 4. Изменение вдоль оси пролива максимальных U_{\max} и минимальных U_{\min} возможных горизонтальных скоростей в волнах, распространяющихся из Мраморного моря в Черное (а) и из Черного моря в Мраморное (б) при различных длинах входящей волны: 1 – расчет по приближенной формуле (19); 2 – $\lambda = 0,5$ км; 3 – $\lambda = 1$ км; 4 – $\lambda = 2$ км; 5 – $\lambda = 5$ км; 6 – $\lambda = 10$ км (исходная высота волны 1 м)

Заметим, что волновые скорости по своей величине таковы, что они могут существенно увеличивать или уменьшать скорости основного течения. Этот эффект усиливается с ростом высоты входящей в пролив волны и может приводить к кардинальным изменениям направления фонового течения.

Представляет интерес анализ возможного усиления волны в результате прохождения через пролив из одного морского бассейна в другой. На рис. 5 приведены найденные численно зависимости высот волн на выходе из пролива в Мраморное ($A_{\max}(0)$) или Черное ($A_{\max}(L)$) моря для длин волн в диапазоне 1 – 20 км. При прохождении волн из Черного моря в Мраморное происходит более заметное усиление волн по сравнению со случаем их распространения в противоположном направлении. Тем не менее численные расчеты не выявили значительного усиления или ослабления поверхностных волн после прохождения пролива Босфор в любом направлении.

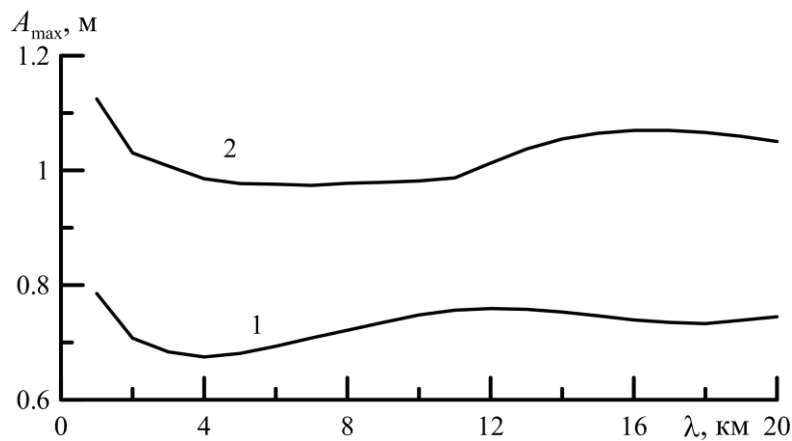


Рис. 5. Зависимость отношения максимальных высот волн на концах пролива от длины λ входящей в пролив волны при ее распространении из Мраморного моря в Черное (1) и из Черного моря в Мраморное (2) (исходная высота волны 1 м)

Эволюция локального возмущения свободной поверхности жидкости в центральной части пролива Босфор. Рассмотрим эволюцию начального смещения поверхности жидкости в проливе. Этот процесс описывается задачей III, включающей уравнения (1) с начальными (4), (11) и граничными (12), (13) условиями. В процессе эволюции формируются две волны, распространяющиеся в противоположные стороны от зоны начального возмущения жидкости. Вследствие изменения геометрических параметров пролива происходит трансформация этих волн, которая зависит от ширины начального возмущения жидкости и положения зоны генерации в проливе. При достижении волнами открытых границ пролива наблюдается их свободный выход в Мраморное и Черное моря в соответствии с условиями (12) и (13).

На рис. 6 представлены распределения вдоль канала максимально возможного подъема свободной поверхности (6, а), максимальной (6, б) и минимальной (6, в) горизонтальных скоростей волнового течения в проливе Босфор. Высота начального подъема уровня принята равной 1 м, ширина зоны возмущений принималась $\lambda = 5; 10; 15; 20$ км. Вычислительные эксперименты проведены для нескольких положений зон начального возмущения жидкости вдоль пролива Босфор. Они показали, что при смещении зоны генерации из центральной части пролива в направлении Черного моря наблюдается усиление волн, выходящих в Мраморное море. Напротив, при смещении зоны генерации волн в противоположном направлении происходит ослабление волн у черноморской границы пролива.

Максимально возможные высоты волн цунами наблюдаются в области начального возмущения жидкости и имеют тенденцию к уменьшению при удалении от зоны генерации волн. Высоты волн не превышают начального смещения свободной поверхности жидкости a_0 . Чем меньше ширина начального возмущения жидкости по сравнению с пространственными неоднородностями пролива, тем сильнее характеристики волны реагируют на изменение геометрии канала. По причине продольной неоднородности пролива вы-

соты волн справа и слева от зоны генерации различны и в значительной степени определяются геометрией пролива.

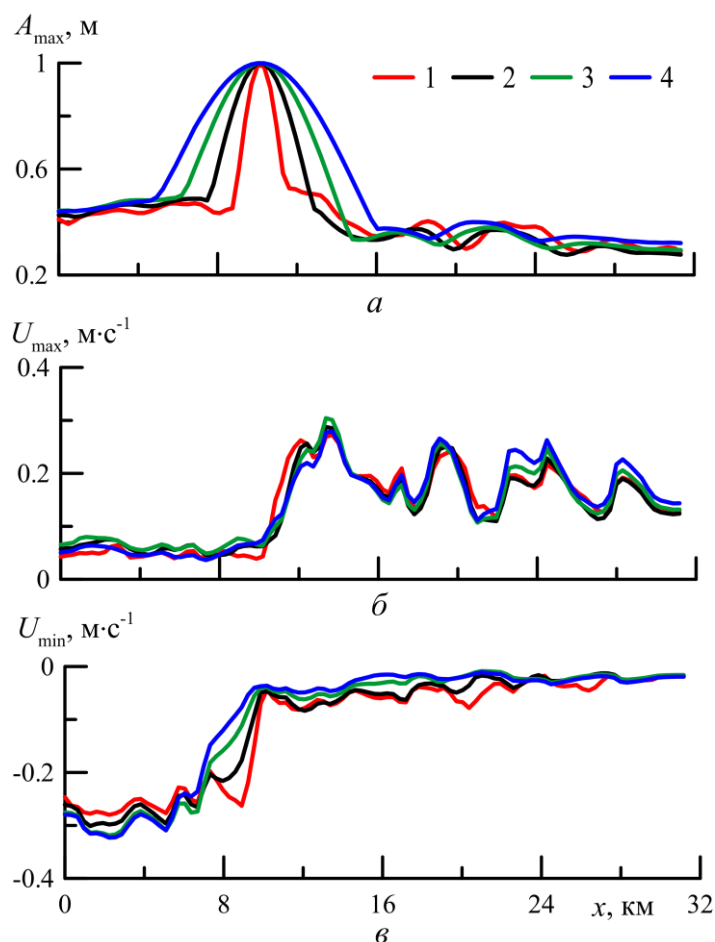


Рис. 6. Распределение вдоль оси пролива максимально возможных высот волн (*a*), максимальных (*б*) и минимальных (*в*) горизонтальных волновых скоростей при эволюции одиночного поднятия поверхности жидкости шириной 5, 10, 15 и 20 км (кривые 1 – 4 соответственно) с центром в точке $x_0 = 10$ км (исходная высота волны 1 м)

Волновая скорость знакопеременна для волн, распространяющихся в противоположных направлениях из зоны генерации (рис. 6, *б*, *в*). При начальном возвышении поверхности жидкости, равном 1 м, для случаев, показанных на рис. 6, волновая скорость изменяется в диапазоне $[-0,323 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}, 0,304 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}]$.

Заключение. Мраморное и Черное моря относятся к морским бассейнам, в которых наблюдались и потенциально возможны волны цунами [14, 15]. Хотя волны цунами – явление не столь частое для этих морей, не лишены интереса оценки параметров волн типа цунами в проливе при их распространении

нии из Мраморного моря в Черное и наоборот, а также при эволюции начального смещения поверхности жидкости в центральной части пролива. Эти вопросы рассмотрены в рамках каналовой теории длинных поверхностных волн с использованием методов численного моделирования.

В случае распространения волны из одного морского бассейна в другой распределения максимально возможных высот волн в проливе качественно похожи и определяются изменениями его геометрии. При распространении одиночной волны из Мраморного моря в Черное ее высота возрастает в 1,3 раза, а при прохождении волны из Черного моря в Мраморное ее высота в 1,5 раза больше исходного значения a_0 . С ростом длины волны в проливе ее максимальная высота убывает.

Что касается горизонтальных скоростей волнового течения, то при распространении волны из Мраморного в Черное море (и из Черного в Мраморное) максимальная волновая скорость может достигать значения $0,79 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ($0,29 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$), минимальная составляет $-0,18 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ($-0,75 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) при начальной высоте волны $a_0 = 1 \text{ м}$. То есть волновые скорости могут быть соизмеримы или даже превышать значения скоростей фоновых течений в проливе.

В случае распространения волн типа цунами, вызванных начальным смещением поверхности жидкости, характеристики волн, бегущих в Черное или Мраморное моря, различны из-за продольной асимметрии в изменениях геометрических параметров пролива. Более интенсивные волны и сопутствующие им волновые скорости наблюдаются в направлении Мраморного моря.

В целом для условий пролива Босфор вычислительные эксперименты не выявили значительного усиления длинных поверхностных волн. Обычно высоты волн в проливе не превышают начального смещения свободной поверхности жидкости a_0 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kalafat D.* B.U. Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute seismology laboratory // CSEM/EMSC Newsletter. – 2003. – № 19, April. – P. 5 – 7.
2. *Шнюков Е.Ф., Митин Л.И., Цемко В.П.* Катастрофы в Черном море. – Киев: Манускрипт, 1994. – 296 с.
3. *Ламб Г.* Гидродинамика. – М., Л.: Гостехиздат, 1947. – 928 с.
4. *Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. – М.: Физматгиз, 1963. – 584 с.
5. *Шулейкин В.В.* Физика моря. – М.: Наука, 1968. – 1083 с.
6. *Ржонсницкий В.Б.* Приливные движения. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 244 с.
7. *Черкесов Л.В.* Поверхностные и внутренние волны. – Киев: Наукова думка, 1973. – 247 с.
8. *Стокер Дж.* Волны на воде. – М.: Иностранная лит-ра, 1959. – 618 с.
9. *Defant A.* Physical oceanography. Vol. 1. – New York: Pergamon Press, 1961. – 745 p.
10. *Lemmin U., Mortimer C.H.* Tests of an extension to internal seiches of Defant's procedure for determination of surface seiche characteristics in real lakes // Limnol. Oceanogr. – 1986. – 31, № 6. – P. 1207 – 1231.

11. *Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.* Основные океанологические задачи теории мелкой воды. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 300 с.
12. *Доценко С.Ф., Ракова И.Н.* Распространение длинных поверхностных волн в каналах переменного поперечного сечения // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 2. – С. 3 – 17.
13. *Диденкулова И.И., Пелиновский Д.Е., Тюгин Д.Ю. и др.* Бегущие длинные волны в водных прямоугольных каналах переменного сечения // Вестник МГОУ. Сер. «Естественные науки». – 2012. – № 5. – С. 89 – 93.
14. *Hébert H., Schindelé F., Altinok Y. et al.* Tsunami hazard in the Marmara Sea (Turkey): numerical approach to discuss active faulting and impact on the Istanbul coastal areas // Mar. Geol. – 2005. – 215, № 1. – P. 23 – 43.
15. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Характеристики черноморских цунами по данным измерений // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 1. – С. 21 – 31.

Application of a channel model for describing propagation of tsunami-like single waves in a channel with variable cross-section

A.Yu. Bazykina, S.F. Dotsenko

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: sf_dotsenko@mail.ru*

Channel model of surface long waves is used to describe propagation of single linear waves in the channel of variable cross-section which simulates the Bosphorus. Numerical analysis is done both for the maximum height and wave velocity of the waves propagating from the Sea of Marmara to the Black Sea and vice versa, and for the case of evolution of the initial fluid displacement at its various location in the strait. Growth of a wave height and velocity is correlated with decrease of the strait width and its cross-sections' areas. When the waves propagate from the Black Sea to the Marmara their intensification is more significant than that at their movement in the opposite direction. In the case when the waves propagate from the tsunami generation zone in the strait middle part, the highest rises of the fluid free surface do not exceed the absolute value of the sea surface initial displacement.

Keywords: tsunami waves, Bosphorus Strait, channel theory of long waves, numerical solutions, wave propagation in a strait, wave intensification.