



УДК 551.466.61

**А. Ю. Базыкина, С. Ф. Доценко**

## **Амплитудные и энергетические характеристики длинных волн в проливе Босфор**

*(Представлено академиком НАН Украины В. Н. Еремеевым)*

*Каналовая теория линейных длинных волн применена для расчета амплитуд и энергии поверхностных волн при распространении в канале переменного поперечного сечения. Форма канала отражает черты прол. Босфор. Выполнен численный анализ максимальной высоты волн в проливе при распространении одиночных волн из Мраморного моря в Черное и наоборот, а также изменений со временем потенциальной, кинетической и полной энергий волнового поля.*

Морской пролив — водное пространство между двумя участками суши, соединяющее смежные бассейны или их части. Обычно проливы являются зонами интенсивных течений и волн, что говорит о необходимости всестороннего изучения динамики вод в таких акваториях Мирового океана.

Прол. Босфор — сейсмически активный регион и поэтому здесь существует потенциальная опасность генерации цунами, вызванных как подводными, так и сухопутными землетрясениями. За полторы тысячи лет здесь отмечено более 15 сейсмических событий [1], включая землетрясение 557 г., вызвавшее цунами высотой 2–3 м, и цунамигенное землетрясение 1509 г. с магнитудой 7,5–9 [2]. Сильные волны высотой до 3 м, вызванные землетрясением с магнитудой 7,4, зарегистрированы 17 августа 1999 г. в близком к прол. Босфор Измитском заливе [3].

К сожалению, это не последнее сильное сейсмическое событие вдоль Северо-Анатолийского разлома [4]. Следующее возможно в течение 25–50 лет в районе Стамбула.

Ниже рассматривается распространение поверхностных длинных волн в канале, моделирующем прол. Босфор. Анализируется изменение параметров волн при распространении из Мраморного моря в Черное и наоборот.

Для описания эволюции линейных длинных волн в проливе использовалась каналовая модель [5, 6], которая успешно применяется в теории приливов [7, 8], при моделировании длинных волн в каналах [9], приливных волн в устьях рек [10], поверхностных [11]

---

© А. Ю. Базыкина, С. Ф. Доценко, 2015



Рис. 1. Географическое положение прол. Босфор

и внутренних [12] сейш (двухслойная жидкость). Достоинство каналовой модели — замена двумерной волновой 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), для задания геометрии которого использовано 54 поперечных сечения вдоль оси  $x$  (средняя линия канала). По ним находились кусочно-линейные распределения максимальной глубины пролива  $H(x)$  ( $a$  на рис. 2), локальной полуширины зеркала  $b(x)/2$  (см.  $b$ ) и площади поперечных сечений  $S(x)$ , найденные методом трапеций (см.  $e$ ).

Длина пролива, соединяющего Мраморное и Черное моря,  $L = 31,5$  км, максимальная ширина — 3600 м (на севере), минимальная ширина — 790 м, глубина фарватера от 33 до 80 м. Входу в прол. Босфор из Мраморного моря соответствует точка  $x = 0$ , выходу в Черное море — точка  $x = L$  (см. рис. 1).

В линейном приближении рассмотрим задачу об эволюции в проливе одиночного начального смещения свободной поверхности жидкости в его центральной части, а также распространение одиночной длинной волны в проливе из Мраморного моря в Черное и наоборот.

Каналовая модель длинных волн оперирует с осредненными поперек канала горизонтальной скоростью течения  $u = u(x, t)$  ( $t$  — время) и смещением свободной поверхности жидкости  $\zeta = \zeta(x, t)$ . Движение жидкости в проливе 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.

В случае одиночного смещения свободной поверхности при  $t = 0$  жидкость в проливе неподвижна, ее свободная поверхность отклонена от горизонтального положения, а условия

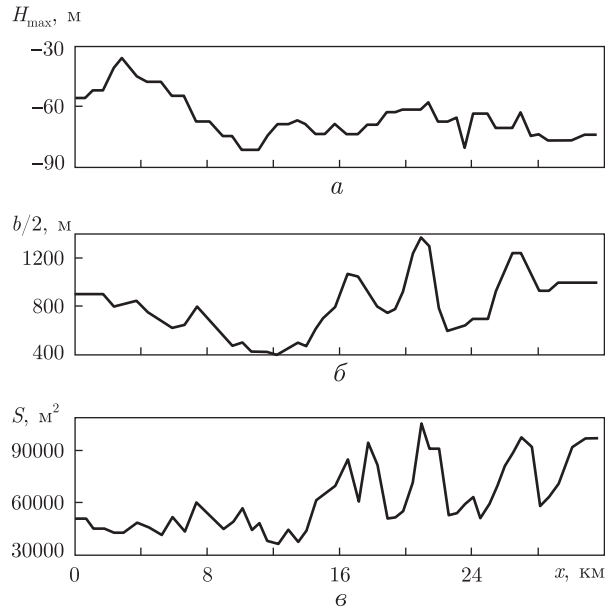


Рис. 2. Распределения вдоль оси  $x$  максимальной глубины  $H$  (а), полуширины зеркала  $b/2$  (б) и площади поперечного сечения  $S$  (в) пролива

на концах пролива моделируют свободный выход волн:

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} - C_0 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x = 0, t \geq 0), \quad \frac{\partial u}{\partial t} + C_1 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x = L, t \geq 0), \quad (3)$$

где  $x_0$  — центр начального смещения свободной поверхности;  $C_0 = C(0)$ ;  $C_1 = C(L)$ ;  $C(x) = \sqrt{gS(x)/b(x)}$  выступает в роли локальной скорости распространения поверхностных длинных волн;  $L$  — длина пролива;  $\lambda$  — начальная ширина волны. Параметры зоны начального возмущения жидкости должны удовлетворять условию  $\lambda/2 \leq x_0 \leq L - \lambda/2$ , гарантирующему расположение области начального возмущения жидкости внутри пролива.

При рассмотрении задачи о распространении одиночной волны в проливе из Мраморного моря в Черное и из Черного моря в Мраморное в начальный момент времени жидкость в канале покоится. Задача о распространении волны из Мраморного моря в Черное описывается посредством соотношений

$$\zeta = a_0 \sin(\pi\tau), \quad u = \sqrt{\frac{gb}{S}}\zeta \quad (x = 0, 0 \leq t \leq T), \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - C_0 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x = 0, t \geq T), \quad \frac{\partial u}{\partial t} + C_1 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (x = L, t \geq 0) \quad (5)$$

вход одиночной волны в пролив через левую границу и ее выход через правую, где  $\tau = t/T$ ;  $T = \lambda/C_0$ . При рассмотрении распространения одиночной волны через прол. Босфор из Черного моря в Мраморное на границах пролива условия свободного входа и выхода волны задаются аналогичным образом (с учетом иного направления распространения волны).

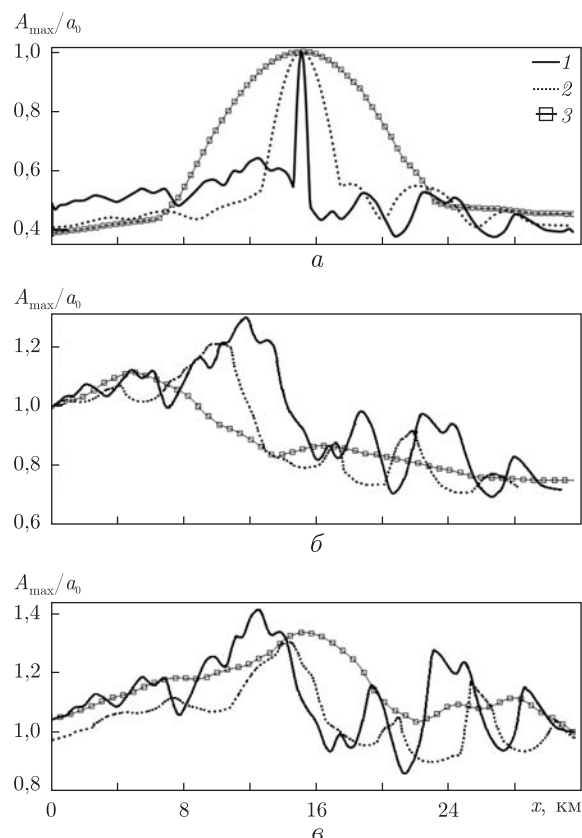


Рис. 3. Распределение вдоль пролива максимально возможных высот волн  $A_{\max}/a_0$ : при эволюции одиночного поднятия с центром в точке  $x_0 = 15$  км (а), распространяющихся из Мраморного моря в Черное (б) и из Черного моря в Мраморное (в).

Условные обозначения: 1 —  $\lambda = 2$  км; 2 —  $\lambda = 10$  км; 3 —  $\lambda = 20$  км

Все три задачи решались методом конечных разностей по явной/неявной схеме на сдвинутых на полшага по  $x$  относительно друг друга равномерных сетках для полей  $u$  и  $\zeta$  с 5000–10000 шагами по координате  $x$  и с шагом по времени до значения  $\Delta t = 0,1$  с [13].

Чтобы оценить энергетические характеристики длинных волн в прол. Босфор, запишем выражения для потенциальной  $e_p$  и кинетической  $e_k$  энергий, которые содержатся в конечном объеме жидкости, ограниченном поверхностью моря, дном и вертикальными боковыми стенками:

$$e_p = 0,5\rho g \int_0^L b(x)\zeta^2(x) dx, \quad e_k = 0,5\rho \int_0^L S(x)u^2(x) dx, \quad (6)$$

где  $\rho$  — плотность воды. Полная энергия равна сумме энергий  $e = e_p + e_k$ .

**Результаты численного анализа.** Рассмотрим распространение в прол. Босфор локального смещения поверхности жидкости. В процессе его эволюции формируются две волны, бегущие в противоположные стороны (а на рис. 3). Благодаря изменениям геометрии пролива происходит трансформация этих волн. Она зависит от начальной ширины (вдоль оси пролива) области возмущений жидкости. Представленные на рис. а распределения вдоль оси прол. Босфор максимально возможных подъемов свободной поверхности

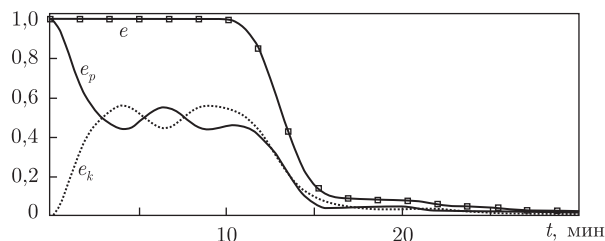


Рис. 4. Изменение со временем потенциальной  $e_p$ , кинетической  $e_k$  и полной  $e$  энергий волнового поля, нормированных на полную энергию волн при  $t = 0$

нормированы на высоту начального смещения жидкости  $a_0$ . Расчеты высот волн  $A_{\max}/a_0$  выполнены для трех значений ширины начального подъема участка свободной поверхности жидкости  $\lambda$ , равной 2, 10, 30 км.

Во всех точках пролива максимальные высоты волн не превысили  $a_0$ . С ростом длины волны максимальная высота волн, движущихся по направлению к Черному морю, возрастает. В Мраморное море распространяется волна, высота которой растет с уменьшением ширины начального смещения поверхности жидкости. От таких волн могут пострадать, например, плотно застроенный район Стамбула Канлыджа (см. рис. 1).

Распределения максимально возможных вдоль прол. Босфор высот поверхностных волн различной длины при их распространении из Мраморного моря в Черное иллюстрирует *б* на рис. 3. Видно, что на некоторых участках высота волн возрастает в 1,3 раза, однако с ростом длины волны наблюдается некоторое ослабление волнового процесса, причем влияние изменений геометрических параметров пролива на их амплитудные характеристики ослабевает. Рис. 3, *в* дает оценки максимальных высот волн, распространяющихся из Черного моря в Мраморное. Для волн длиной  $\lambda = 2$  км распределения максимальных высот волн качественно аналогичны (см. *б*, *в*), однако более интенсивные волны распространяются в направлении Мраморного моря.

Нерегулярные распределения высот волн в проливе зависят от соотношения между длиной волны и характерным масштабом нерегулярностей геометрических характеристик канала. Усиление волн связано с локальным уменьшением ширины пролива, увеличением глубины и уменьшением площади поперечного сечения пролива.

Численно найдены изменения со временем потенциальной  $e_p(t)$ , кинетической  $e_k(t)$  и полной  $e(t) = e_p(t) + e_k(t)$  энергий волнового поля, нормированных на полную начальную энергию  $e(0)$  в случае смещений жидкости шириной  $\lambda = 10$  км (рис. 4). В начальный момент времени потенциальная энергия имеет максимальное значение, а кинетическая равна нулю. В момент времени  $t \approx 11$  мин волны выходят из зоны пролива, согласно условиям свободного выхода (2), (3).

Таким образом, в рамках теории длинных волн численно рассмотрена задача об эволюции локального смещения поверхности жидкости в центральной части канала, моделирующего прол. Босфор, а также задачи об усилении поверхностных волн в процессе их распространения из Мраморного моря в Черное и из Черного моря в Мраморное.

Для всех трех задач распределения максимальных высот волн качественно аналогичны, однако с ростом длины волны наблюдается некоторое ослабление волновой активности в проливе.

В случае эволюции смещения поверхности жидкости ее возмущения высоты не превышают начального смещения уровня моря  $a_0$ , а волны, движущиеся из одного морского

бассейна в другой, на некоторых участках усиливаются до полутора раз. Локальное усиление волн связано с локальным уменьшением ширины, увеличением глубины и уменьшением площади поперечного сечения пролива. В условиях канала, моделирующего прол. Босфор, вычислительные эксперименты не обнаружили значительного усиления длинных поверхностных волн.

1. Parsons T. Recalculated probability of  $M \geq 7$  earthquakes beneath the Sea of Marmara, Turkey // J. Geophys. Res. – 2004. – 10, No B05304. – 21 p.
2. Шнюков Е. Ф., Митин Л. И., Цемко В. П. Катастрофы в Черном море. – Киев: Манускрипт, 1994. – 296 с.
3. Altinok Y., Tinti S., Alpar B. et al. The tsunami of August 17, 1999. – in Izmit Bay, Turkey // Natural Hazards. – 2001. – 24. – P. 133–146.
4. Доценко С. Ф., Иванов В. А. Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ – Гидрофизика”, 2010. – 174 с.
5. Ламб Г. Гидродинамика. – Москва; Ленинград: Гостехиздат, 1947. – 928 с.
6. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. – Москва: Физматгиз, 1963. – 584 с.
7. Шулейкин В. В. Физика моря. – Москва: Наука, 1968. – 1083 с.
8. Рэзонский В. Б. Приливные движения. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. – 244 с.
9. Черкесов Л. В. Поверхностные и внутренние волны. – Киев: Наук. думка, 1973. – 247 с.
10. Стокер Дж. Волны на воде. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1959. – 618 с.
11. Defant A. Physical oceanography. Vol. 1. – New York: Pergamon Press, 1961. – 745 p.
12. 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, No 6. – P. 1207–1231.
13. Вольцингер Н. Е., Пясковский Р. В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1968. – 300 с.

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 23.09.2014

**О. Ю. Базикіна, С. П. Доценко**

### **Амплітудні та енергетичні характеристики довгих хвиль у протоці Босфор**

*Каналова теорія лінійних довгих хвиль застосована для розрахунку амплітуд і енергії поверхневих хвиль при поширенні в каналі змінного поперечного перерізу. Форма каналу відображає особливості прот. Босфор. Виконано числовий аналіз максимальної висоти хвиль у протоці при поширенні самотніх хвиль з Мармурового моря до Чорного і навпаки, а також змін із часом потенційної, кінетичної та повної енергій хвильового поля.*

**A. Yu. Bazykina, S. F. Dotsenko**

### **Amplitude and energy characteristics of long waves in the Bosphorus Strait**

*The channel theory of linear long waves is used to calculate the amplitude and the energy of surface waves in their propagation in a channel with variable cross-section. The channel geometry is similar to that of the Bosphorus Strait. The numerical analysis of the maximum wave heights in the strait during the propagation of single waves from the Marmara Sea to the Black Sea and vice versa and the changes of the potential, kinetic, and total energies of the wave field in time is carried out.*