

А.Ю.Базыкина, С.Ф.Доценко

*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЛИННЫХ ВОЛН В БУХТАХ И ЗАЛИВАХ**

Исследовано распространение одиночных поверхностных длинных волн в полукруглых бухтах модельной формы. В качестве примера рассмотрен Феодосийский залив с нерегулярной береговой чертой. Выявлены зоны наибольшего усиления волнового поля. Экстремальные поднятия уровня жидкости достигаются для волн с относительно малой начальной длиной волны; влияние последней на понижения уровня моря слабо выражено. Исследование представляет интерес для проблемы цунами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *поверхностные длинные волны, нелинейные волны, двумерное распространение в бухтах и заливах, экстремальные смещения уровня моря, численные решения*

При входе и последующем распространении волн в бухтах, заливах, районах нерегулярностей рельефа дна и береговой границы бассейна может происходить значительное усиление длинных волн. Это, в частности, относится к волнам типа цунами [1]. Хотя Азовское и Черное моря не являются цунамиопасными, однако их уровень сейсмоактивности не позволяет исключить генерацию здесь при подводных землетрясениях [2] относительно сильных волн цунами.

Рассмотрим бухту переменной глубины с открытым входом (рис.1, а). Распространение нелинейных длинных волн с учетом донного трения в двумерном случае описывается системой трех уравнений:

$$\begin{aligned} u_t + uu_x + vu_y + g\zeta_x &= -ku\sqrt{u^2 + v^2} / (h + \zeta), \\ v_t + uv_x + vv_y + g\zeta_y &= -kv\sqrt{u^2 + v^2} / (h + \zeta), \\ \zeta_t + [(h + \zeta)u]_x + [(h + \zeta)v]_y &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $u = u(x, y, t)$ и $v = v(x, y, t)$ – осредненные по глубине проекции горизонтальных скоростей на оси x и y соответственно; t – время, g – ускорение свободного падения; $\zeta = \zeta(x, y, t)$ – смещение свободной поверхности жидкости; $k = 2,6 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент донного трения.

В начальный момент времени жидкость в бухте находится в невозмущенном состоянии. За время T через открытую границу ($y = 0$) в бухту входит плоская волна. Для ее задания применяются граничные условия:

$$\zeta = a_0 \sin(\pi t / T), \quad v = \sqrt{g/h}\zeta \quad (0 \leq x \leq L, y = 0, 0 \leq t \leq T). \quad (2)$$

После полного входа волны в бухту ($t = T$) на жидкой границе задается условие свободного выхода волн:

$$v_t = Cv_y \quad (0 \leq x \leq L, y=0, t \geq T), \quad (3)$$

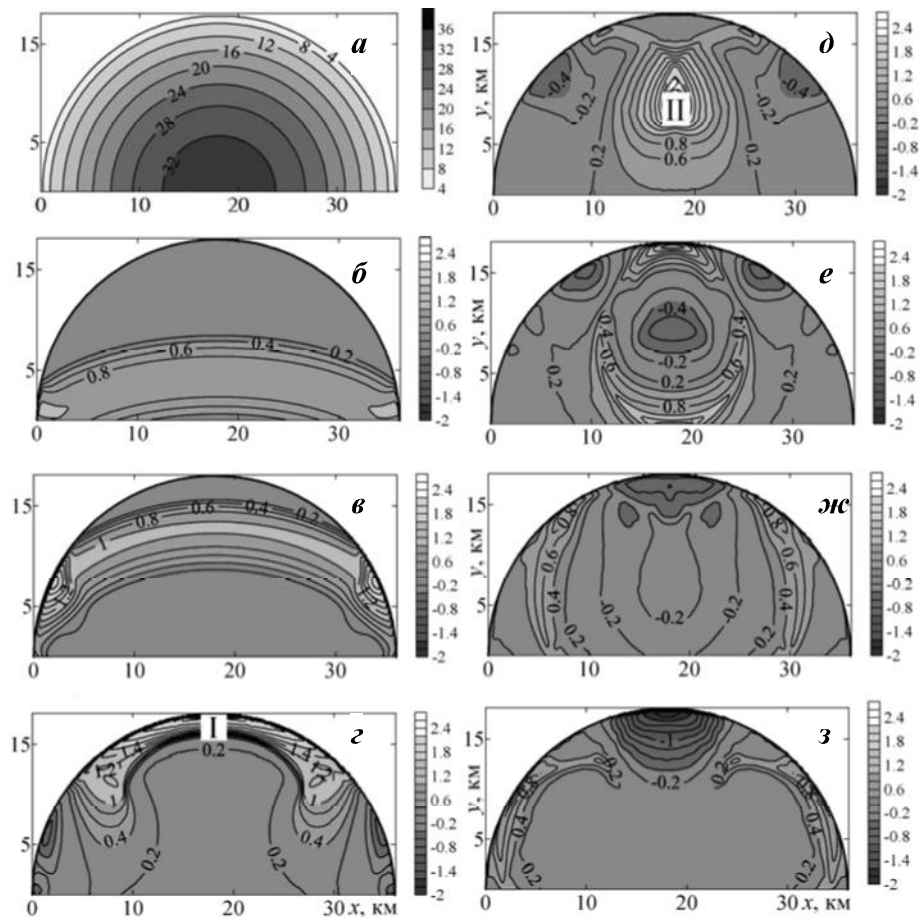
где $C = \sqrt{gh(x,0)}$ – локальная скорость распространения длинных волн.

На твердой береговой границе задается условие непротекания жидкости: $u = 0, v = 0$.

Численные расчеты выполнялись на сетке Аракавы «С» [3] с пространственными шагами $\Delta x = \Delta y = 100$ м и шагом по времени $\Delta t = 1$ с.

Рассмотрим распространения нелинейных одиночных длинных волн в мелководной бухте модельной геометрии, ограниченной полукруглой береговой чертой (рис.1).

Плоская волна входит через открытую границу, ее фронт изгибается, поскольку скорости в средней части волны и на ее концах различны (рис.1, б). У береговой черты наблюдается возникновение двух возвышений (рис.1, в) и расположенных вблизи них впадин (рис.1, г). При отражении волны от берега ее высота может достигать 2 м. Таким образом, первая зона усиления волн (I) находится у береговой черты. Отражаясь от стенок, волна собирается



Р и с . 1 . Батиметрия бухты (а); распространение одиночной нелинейной длинной волны в бухте (б – з). I и II – зоны наибольшего усиления волн. Начальная высота волны 1 м, длина 10 км.

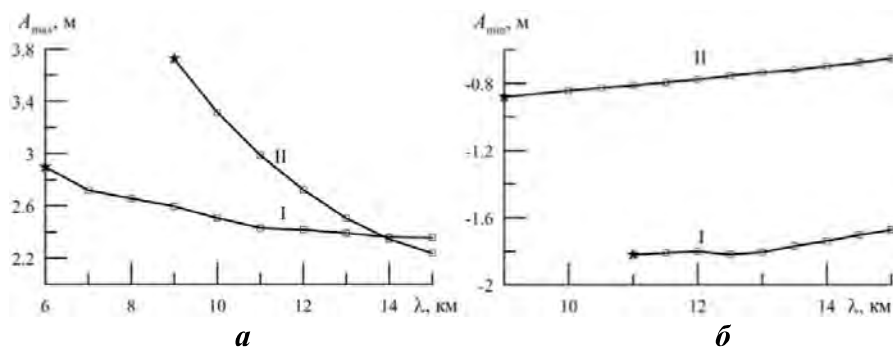


Рис. 2. Зависимости максимальных возвышений (а) и опусканий (б) уровня жидкости в бухте от начальной длины волны в I и II зонах усиления волн. Звездочка разделяет режимы обрушивающихся (слева от $\lambda \approx 9.5$) и необрушивающихся (справа от $\lambda \approx 9.5$) волн.

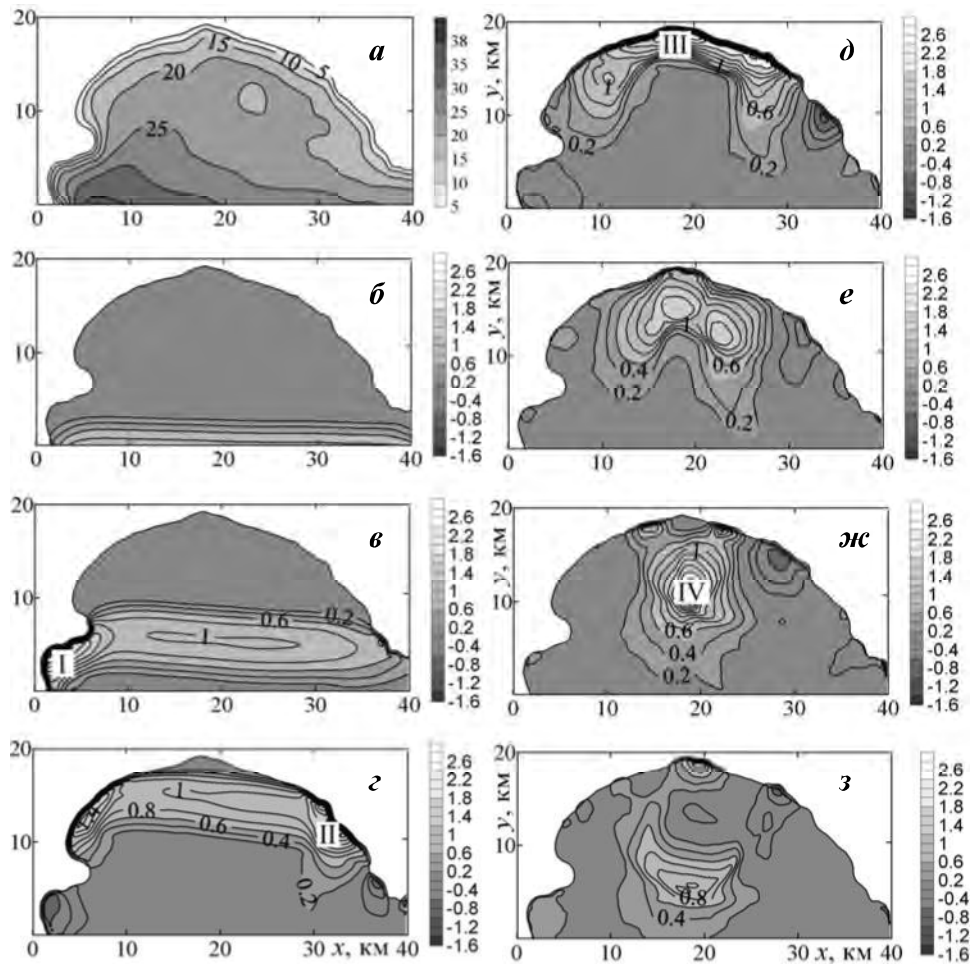
в центре бухты, концентрируя в нем большую часть своей энергии (рис.1, д). Центральная часть бухты является еще одной зоной усиления волн (II). При опускании поверхности жидкости образуется кольцевая волна, максимальная амплитуда которой направлена к выходу, а на месте возвышения (в зоне II) образуется волна понижения (рис.1, е). Впадины, которые распространялись вдоль береговой черты, образуют в зоне I максимальное понижение уровня свободной поверхности жидкости у берега (рис.1, ж, з).

На рис.2 для двух зон наибольшего усиления волн представлены зависимости максимальных поднятий (рис.2, а) и опусканий (рис.2, б) уровня жидкости от длины входящей в бухту волны.

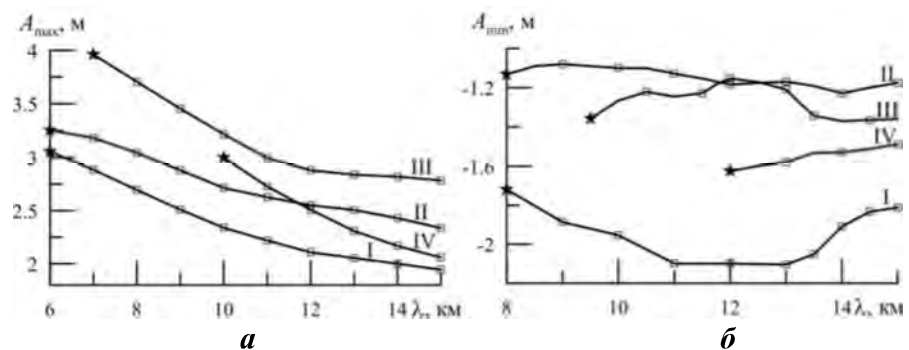
Рассмотрим распространение нелинейной одиночной длинной волны в Феодосийском заливе. Его батиметрия представлена на рис.3, а. Волна входит в бухту, ее фронт неравномерно изгибается (рис.3, б). У береговой черты возникает два возвышения (рис.3, в), причем слева волна усиливается значительно из-за выступающего мыса, высота волны достигает свыше 2 м. Это первая зона усиления волн в заливе (I). В дальнейшем особенности распространения волны подобны тем, которые наблюдались в модельной полукруглой бухте. По мере распространения волны ее высота растёт, при отражении от берега усиливается до 3 м (рис.3, д). У береговой черты были отмечены II и III зоны усиления волн. После отражения волна собирается в центральной части залива – IV зоне усиления (рис.3, ж), где возникает еще один максимум, направленный к выходу из залива (рис.3, з).

Зависимости максимальных поднятий и опусканий уровня жидкости от длины входящей в залив волны представлены на рис.4. Наиболее опасными оказались зоны I и III, так как в первой зоне опускания уровня максимальные во всем бассейне и достигают 2 м, а третья зона может усиливать волны до 4 м.

Выводы. В рамках нелинейной теории длинных волн численно решена задача о распространении одиночных волн в бухтах модельной и близкой к реальной геометрии. Установлено, что в модельной бухте существует две зоны усиления волн. При распространении волны в этих зонах возникают как существенные повышения (до 3 м и более), так и значительные понижения уровня моря (– 2 м).



Р и с . 3 . Батиметрия Феодосийского залива (*a*); распространение нелинейной одиночной длинной волны в заливе (*б – з*). I, II, III и IV – зоны наибольшего усиления волн. Начальная высота волны 1 м, длина 10 км.



Р и с . 4 . Зависимости максимальных возвышений (*a*) и опусканий (*б*) уровня жидкости в бухте от начальной длины волны в I, II, III и IV зонах усиления волн. Звездочка разделяет режимы обрушивающихся (слева от $\frac{\lambda}{2}$) и необрушивающихся (справа от $\frac{\lambda}{2}$) волн.

В Феодосийском заливе выявлены четыре наиболее опасные зоны локального усиления волн в заливе, в которых наблюдались экстремальные подъемы и понижения уровня моря. Численные расчеты показали, что максимальные высоты возникают при отражении волны от берега и могут достигать 4 м, а экстремальные понижения характерны для западной части бухты, у выступающего мыса, и могут достигать минус 2 м.

С уменьшением длины входящей в бухту волны максимальные высоты волн возрастают, а расстояние, пройденное волной до обрушения, сокращается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононкова Г.Е., Показеев К.В. Динамика морских волн.— М.: Изд-во МГУ, 1985. — 298 с.
2. Доценко С.Ф., Иванов В.А. Природные катастрофы Азово-Черноморского региона.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.— 174 с.
3. Вольцингер Н.Е., Клеванный К.А., Пелиновский Е.Н. Длинноволновая динамика прибрежной зоны.— Л.: Гидрометеиздат, 1989.— 271 с.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.

А. Yu. Bazykina, S.F. Dotsenko

NUMERICAL SIMULATION OF SURFACE WAVES PROPAGATION IN THE BAYS AND GULFS

The propagation of single surface long waves in a semicircular model bay is researched. The Feodosia Bay with an irregular coastline is reviewed as an example. Zones of the most amplification of the wave field are found. Extreme level is elevated for the waves with a relatively small initial wavelength; the influence of the last is weakly expressed on the sea level lowering. Research may arouse interest in connection with tsunami problem.

KEYWORDS: surface long waves, nonlinear waves, two-dimensional propagation in the bays and gulfs, extreme elevations of sea level, numerical solution