

Распространение поверхностных длинных волн типа цунами в бухтах переменной глубины

© 2016 А.Ю. Базыкина, С.Ф. Доценко

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

Поступила в редакцию 22.03.2016 г.

Выполнено численное исследование закономерностей распространения одиночных длинных волн в бухтах модельной и реальной геометрии. Найдены зоны усиления волн в бухте, одна из которых расположена вблизи области наката волны на берег (напротив входа в бухту), а другая – в средней части бассейна. При распространении волны в этих зонах возникают как существенные повышения, так и значительные понижения уровня моря. При сужении входа в бухту и увеличении длины входящей волны происходит уменьшение максимальных повышений и понижений. В качестве реального водоема рассмотрен Феодосийский залив Черного моря. Выявлено четыре зоны наибольшего усиления волн в заливе. В этих зонах прослеживаются максимальные подъемы и экстремальные понижения уровня моря, которые имеют тенденцию к увеличению с уменьшением длины входящей в бухту волны.

Ключевые слова: нелинейные длинные волны, квадратичное донное трение, распространение волн в бухтах, бухты модельной геометрии, Феодосийский залив, численные решения.

Введение. На распространение длинных волн в прибрежных районах морских бассейнов оказывают влияние изменение глубины бассейна, заливы, проливы и другие нерегулярности батиметрии и границ бассейна [1, 2]. Анализ особенностей распространения и усиления волн представляется важным не только для изучения общих физических закономерностей эволюции волн типа цунами, но и для совершенствования методов прогнозирования и цунамирайонирования побережья Мирового океана.

Одномерное распространение длинных волн в каналах, проливах и бухтах с учетом изменения геометрических параметров водоемов исследовалось во многих работах (см., например, [1, 2]). В [3 – 6] в рамках одномерной модели даны численные и аналитические оценки амплитудных характеристик волн в каналах и проливах. В работах [7, 8] исследовались зависимости максимальных высот и горизонтальных скоростей волн от глубины канала параболического поперечного сечения. В одномерных задачах используются осредненные поперек сечения канала смещение свободной поверхности жидкости и горизонтальная скорость. Такие задачи просты в реализации и позволяют описать характер распространения длинных волн в каналах и бухтах. Однако в них не учитывается рельеф дна в поперечном сечении, который может существенно повлиять на процесс распространения волн в мелководных каналах, бухтах и заливах. В бухтах с формой поперечного сечения, отличной от прямоугольной, появляются новые особенности процесса эволюции волн. В таких случаях сложно найти аналитическое решение, учитываю-

шее эффекты поперечного сечения бассейна. Это требует использования численных методов.

Численно исследовано двумерное распространение волны цунами в канале [9] и через пролив прямоугольного поперечного сечения [10], однако батиметрия поперечного сечения реальных бухт и проливов имеет более сложную форму. Множество работ посвящено численному описанию распространения длинных волн в реальных бассейнах [11, 12].

При исследовании распространения волн цунами в бассейнах различной батиметрии необходимо учитывать многообразие форм боковых границ океанов и морей. Значительное усиление волн может происходить в бухтах и заливах, имеющих специфическую форму, и характер распространения волн бывает сложно предугадать. В замкнутых и полузамкнутых водоемах могут наблюдаться сейшевые колебания [13, 14] и разнообразные захваченные волны [15]. Часто заливы имеют форму, близкую к полукруглой. В Черном море это, в частности, Феодосийский залив и Геленджикская бухта.

Ниже проводится исследование распространения нелинейных длинных волн в полузамкнутых бухтах модельной геометрии. Помимо этого, в качестве реальной акватории рассмотрен Феодосийский залив. Выявлены наиболее опасные зоны усиления волн в заливе, рассчитаны зависимости максимальных подъемов и понижений уровня моря от длины входящей в залив волны типа цунами.

Математическая постановка задачи. В горизонтальной плоскости Oxy рассмотрим бухту модельной геометрии, ограниченную береговой чертой полукруглой формы (рис. 1, *a*). Глубина бухты максимальна у входа и составляет 36 м, убывая к берегу. Минимальная глубина вдоль побережья бухты принималась равной 4 м. Исследуем распространение одиночной волны в такой бухте. Нелинейная динамика длинных волн в двумерном случае с учетом квадратичного донного трения описывается системой трех уравнений

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

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; $h(x, y)$ – невозмущенная глубина жидкости; $k = 2,6 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент квадратичного донного трения.

В начальный момент времени жидкость в бухте находится в невозмущенном состоянии:

$$u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = \zeta(x, y, 0) = 0. \quad (2)$$

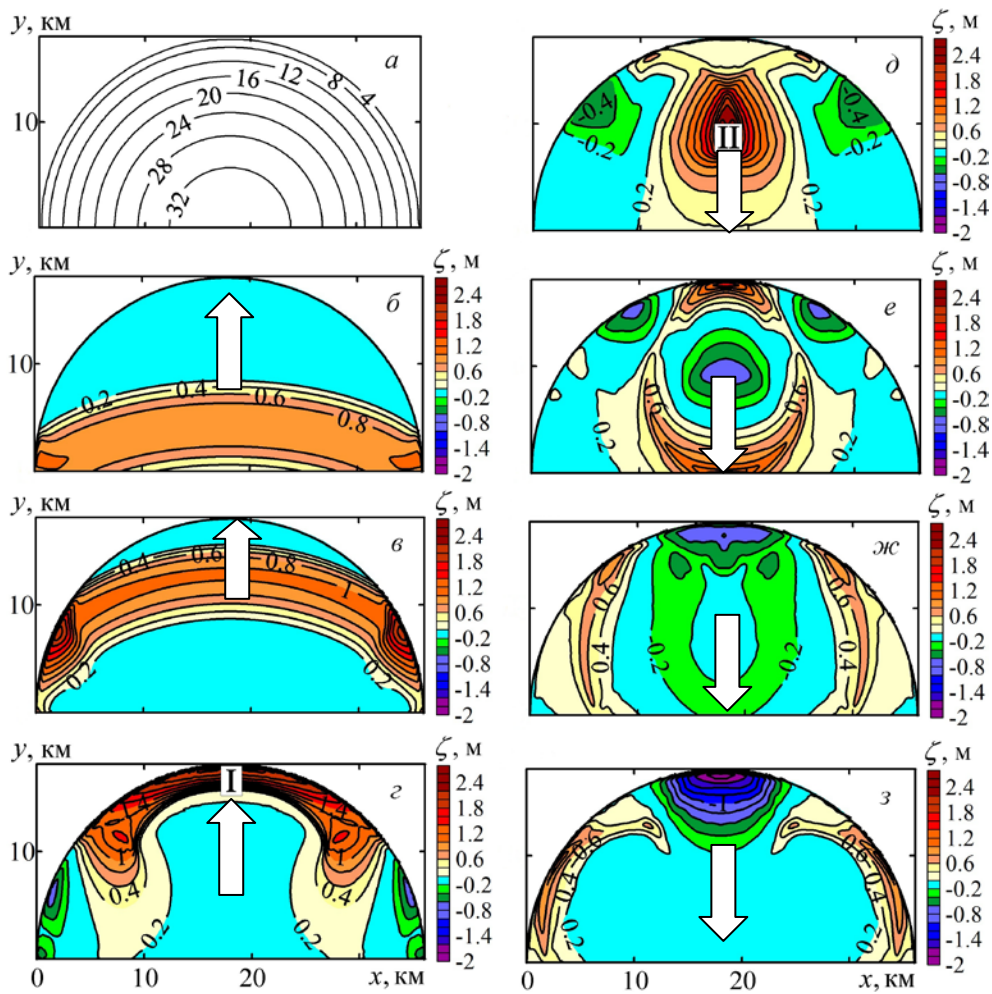


Рис. 1. Трансформация нелинейной длинной волны при распространении в модельной бухте: рельеф дна (а) и структура волнового поля в моменты времени 500 с (б), 1000 с (в), 1500 с (г), 2100 с (д), 2500 с (е), 2900 с (ж), 3200 с (з). Длина волны при входе в бухту 10 км

Через открытую границу ($0 \leq x \leq L, y = 0$) в бухту входит плоская волна в форме полусинусоиды, которая моделируется посредством граничных условий

$$\zeta = a_0 \sin(\pi Ct / \lambda), \quad v = g / C \zeta \quad (0 \leq x \leq L, y = 0, 0 \leq t \leq \lambda / C), \quad (3)$$

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

После полного входа волны в бухту на жидкой границе принято условие свободного выхода волн

$$v_t - Cv_y = 0 \quad (0 \leq x \leq L, y = 0, t \geq \lambda / C). \quad (4)$$

На твердой береговой границе задается условие непротекания жидкости

$$u = 0, \quad v = 0. \quad (5)$$

Начальная высота волны a_0 принята равной 1 м.

Распространение нелинейных длинных волн в бухтах модельной геометрии. Рассмотрим мелководную бухту, ограниченную полукруглой береговой чертой (рис. 1, *a*). Исследуем особенности распространения нелинейных длинных волн в такой бухте. При численном моделировании применена равномерная сетка с пространственными шагами $\Delta x = \Delta y = 100$ м и шагом по времени $\Delta t = 1$ с.

Плоская волна длиной 10 км входит в рассматриваемую бухту через открытую границу (стрелками указано направление распространения волны). Происходит изгиб ее фронта, как видно из рис. 1, *б*. По мере распространения волны в бухте возникают два возвышения в мелководной области вдоль береговой черты (рис. 1, *в*). Вблизи волн повышения образуются четко прослеживаемые впадины, при отражении волны от берега ее высота значительно возрастает (рис. 1, *з*). Здесь располагается первая зона усиления волны (I), высота которой превышает 2 м. Волна, отразившись от берега, формирует локальный подъем уровня моря в средней части, концентрируя в ней основную энергию (рис. 1, *д*); здесь расположена вторая зона усиления волн в бухте (II). В ее окрестности глубины более существенны по сравнению с глубинами первой зоны усиления волн; высота волны может достигать 3 м и более. После опускания этого возвышения образуется кольцевая волна (рис. 1, *е*), направленная к выходу. В области второго максимума следом за волной повышения происходит опускание поверхности моря (рис. 1, *е*). Что касается двух впадин, распространяющихся вдоль береговой черты, то они образуют понижение уровня моря в зоне первоначального наката на берег (рис. 1, *ж, з*). Со временем волна полностью покидает акваторию бухты.

На рис. 2 показаны распределения уровня моря при распространении волны в бухтах с различной шириной входа в момент отражения волны от береговой черты (рис. 2, *a, б, в*) и при возникновении локального максимума в средней части бухт (рис. 2, *г, д, е*). В бухте с частично ограниченным входом волна излучается как кольцевая, ее фронт по форме повторяет очертания берега. С уменьшением ширины входа в бухту локальная максимальная высота волны также уменьшается. Подойдя к берегу, волна усиливается, а ее длина уменьшается. Положение второго максимума, который образуется в средней части бухты, при сужении входа в бухту смещается по направлению к этому входу. Существенных понижений уровня моря в такой бухте не наблюдается.

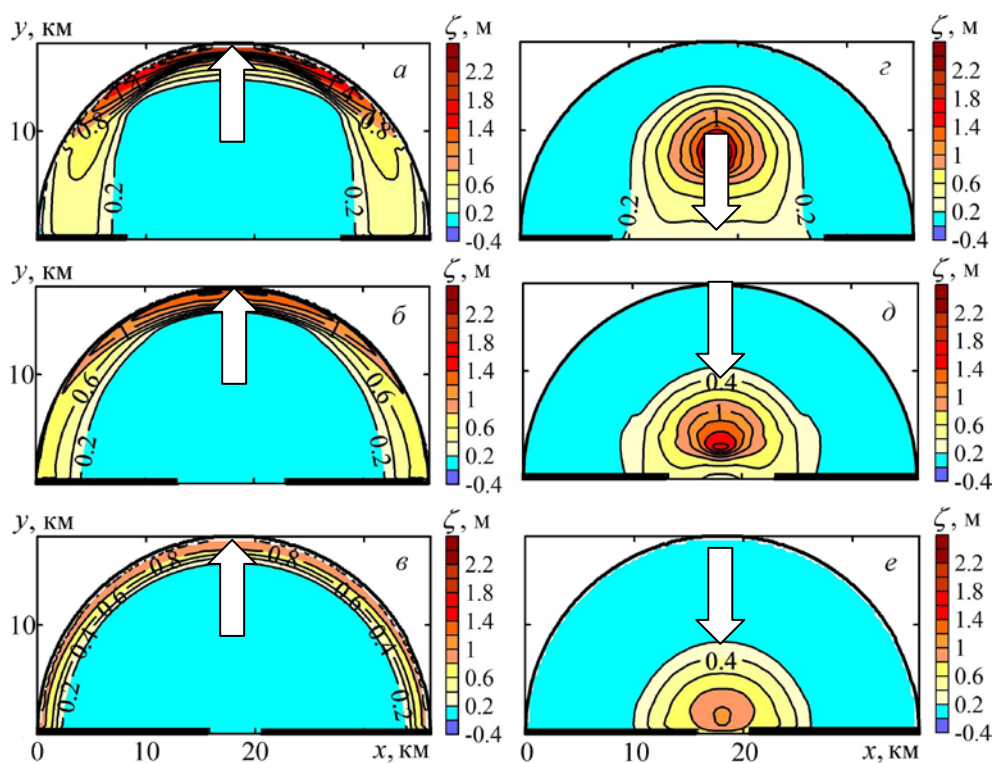


Рис. 2. Распространение нелинейной длинной волны в бухтах с различной шириной входа: *a, б, в* – в моменты максимального наката волны на боковую границу бухт с шириной входа 20, 10 и 5 км соответственно; *z, д, е* – в моменты выхода волны из бухт

Таким образом, в бухте существуют две зоны локального экстремального усиления волн. Оценим высоту волны, распространяющейся в бухтах с различной шириной входа. На рис. 3 представлены зависимости максимальных подъемов уровня моря от начальной длины волны для первого (вдоль береговой черты) (рис. 3, *a*) и второго (в средней части бухты) (рис. 3, *б*) локальных максимумов соответственно.

Зависимости наибольших понижений уровня моря от длины входящей в бухту волны показаны на рис. 4. Амплитуда волны уменьшается с ростом длины волны. Известно, что учет квадратичного придонного трения в уравнениях движения приводит к уменьшению амплитуды волны тем сильнее, чем меньше глубина бухты. Также численные расчеты показали, что учет донного трения может увеличивать расстояние, которое волна проходит до обрушения.

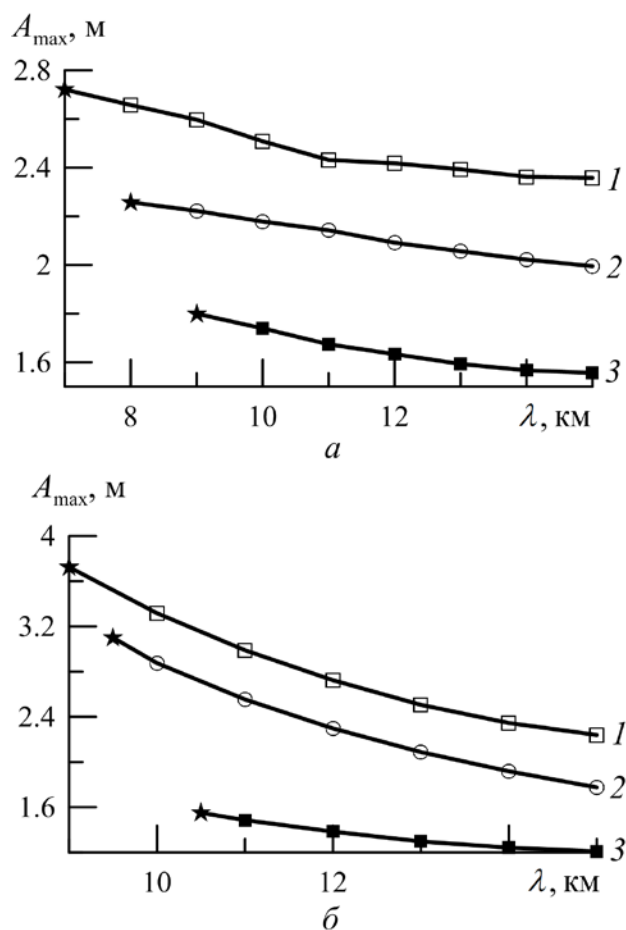


Рис. 3. Максимальные подъемы уровня моря в зависимости от начальной длины волны в двух зонах наибольшего локального усиления: *a* – в зоне I; *б* – в зоне II. Для кривых 1, 2, 3 ширина входа в бухту составляет 40, 20, 10 км соответственно. Звездочка разделяет режимы обрушивающихся (слева от нее) и необрушивающихся (справа от нее) волн

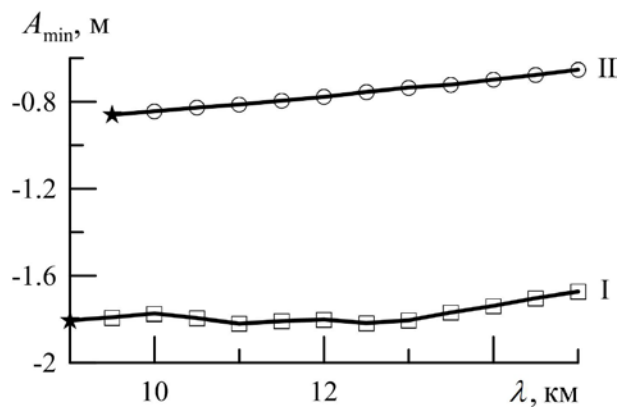


Рис. 4. Экстремальные понижения уровня моря в зонах I и II в зависимости от начальной длины волны

Распространение длинных волн в Феодосийском заливе. Феодосийский залив находится на юго-востоке Крымского побережья Черного моря, глубина у входа составляет 20 – 30 м. На рис. 5, *a* показано распределение глубин в Феодосийском заливе. Минимальная глубина у берега принималась равной 4 м. Форма и батиметрия залива напоминают уже рассмотренную ранее модельную бухту (рис. 1, *a*).

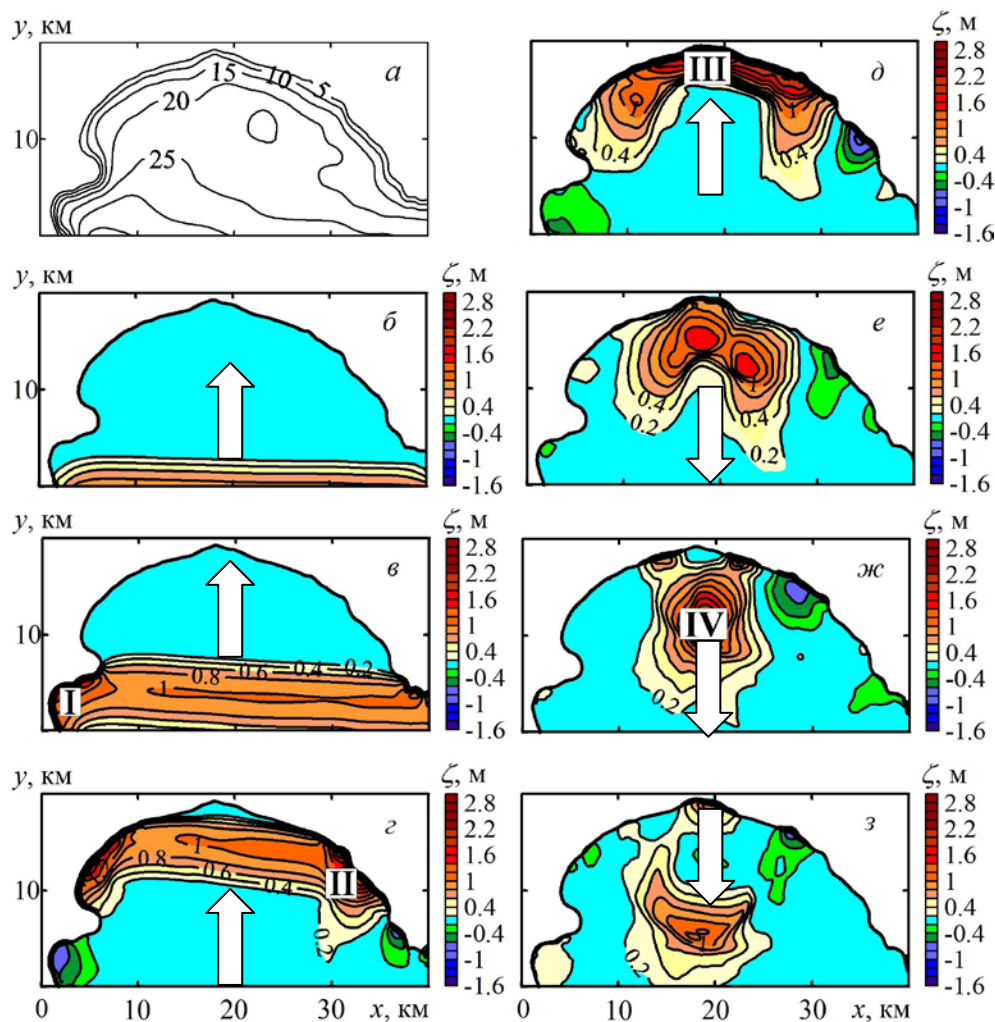


Рис. 5. Распространение нелинейной длинной волны в Феодосийском заливе Черного моря: рельеф дна (*a*) и распределение смещений уровня моря в моменты времени 200 с (*б*), 610 с (*в*), 1200 с (*з*), 1400 с (*д*), 1550 с (*е*), 2030 с (*ж*), 2300 с (*з*). Длина волны при входе в бухту 10 км

Рассмотрим распространение нелинейной одиночной длинной волны в Феодосийском заливе. Ее начальная длина равна 10 км. Волна входит в залив, ее фронт изгибается (рис. 5, *б*, стрелки указывают направление распространения волны). Вдоль береговой черты возникают два возвышения (рис. 5, *в*), причем слева волна усиливается значительно вследствие более резкого из-

менения глубины и наличия выступающего мыса; высота волны достигает здесь 2 – 3 м. Это первая зона локального усиления волн в заливе (I).

По мере распространения волны ее высота растет и при отражении от берега достигает 3 м (рис. 5, з, д). Вдоль береговой черты отмечены две зоны наибольшего локального усиления волн (II, III). Отраженная волна усиливается в средней части (рис. 5, ж), где возникает еще один локальный максимум (IV), распространяющийся в направлении выхода из залива (рис. 5, з).

Также проведены оценки экстремальных возвышений и понижений уровня моря в зависимости от длины входящей в залив волны (рис. 6). В зонах усиления I, II и IV волны могут достигать 3 м. Наиболее опасной оказалась зона III, которая находится у береговой черты залива. Максимальные высоты волн здесь могут достигать 4 м, причем с уменьшением длины волны ее максимальная высота увеличивается. Отметим также, что учтенное квадратичное донное трение привело к увеличению расстояния, пройденного волной до обрушения, и уменьшению высоты волны.

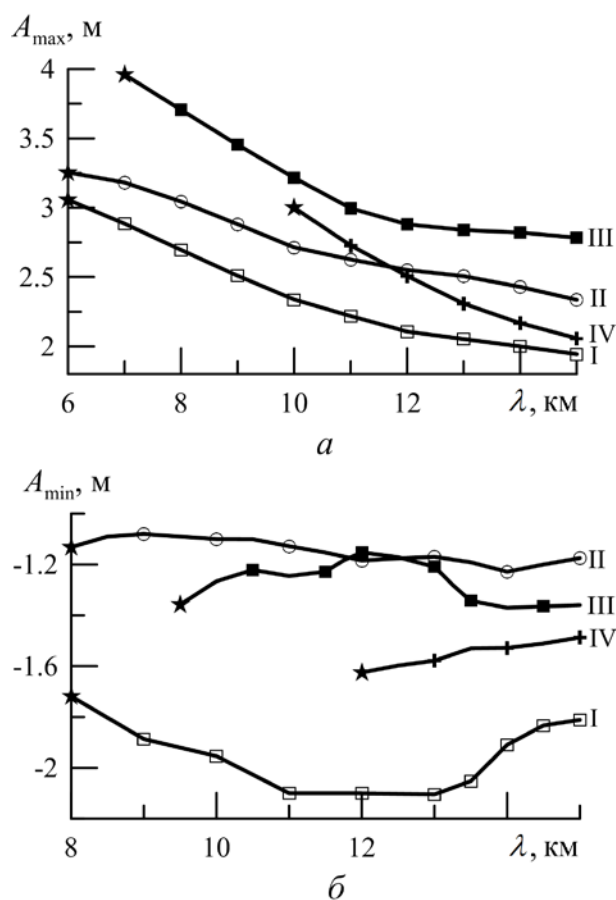


Рис. 6. Зависимости максимальных смещений уровня моря в Феодосийском заливе от начальной длины волны в зонах наибольшего локального усиления: *a* – максимальные возвышения; *б* – экстремальные понижения уровня моря. Звездочка разделяет режимы обрушивающихся (слева от нее) и необрушивающихся (справа от нее) волн

При распространении волны в Феодосийском заливе в указанных зонах усиления следом за волнами возвышения возникают впадины. Определены экстремальные понижения уровня моря в заливе (рис. 6): в первой зоне усиления они достигают -2 м, в остальных трех зонах максимальные понижения колеблются от -1 до $-1,6$ м в зависимости от длины входящей в залив волны.

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 бухте с широким входом плоская одиночная волна распространяется с образованием локальных возвышений и понижений уровня, а в частично закрытой бухте она излучается как кольцевая волна без существенного понижения уровня моря. В бухтах с различной шириной входа выявлены две наиболее опасные зоны усиления волн: зона отражения волны от берега и зона ее усиления в средней части бухты. В открытой бухте в зонах локального усиления наблюдаются существенные подъемы и понижения уровня моря, в то время как в бухте с частично ограниченным входом наиболее ярко выражены волны повышения уровня. Во второй зоне локального усиления наблюдаются самые большие высоты за все время распространения волны. При сужении входа в бухту максимальные высоты волн значительно уменьшаются.

Проанализировано распространение нелинейных длинных волн в Феодосийском заливе. В целом их динамика в заливе подобна динамике волн в ранее рассмотренной модельной бухте. В Феодосийском заливе выявлены четыре наиболее опасные зоны локального усиления волн, в которых наблюдались экстремальные подъемы и понижения уровня моря. Численные расчеты показали, что максимальные высоты возникают при отражении волны от берега и могут достигать более 3 м, а экстремальные понижения возникают в западной части бухты, у выступающего мыса, и могут достигать 2 м.

Таким образом, максимальные высоты волн возрастают с уменьшением длины входящей в бухту волны. Расстояние, пройденное волной до обрушения (в силу нелинейных эффектов), сокращается при уменьшении длины волны на входе в бухту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононкова Г.Е., Показеев К.В. Динамика морских волн. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 298 с.
2. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны цунами. – Л.: Гидрометеоздат, 1981. – 447 с.
3. 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.
4. Доценко С.Ф., Ракова И.Н. Распространение длинных поверхностных волн в каналах переменного поперечного сечения // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 2. – С. 3 – 17.
5. Базыкина А.Ю., Доценко С.Ф. Амплитудные и энергетические характеристики длинных волн в проливе Босфор // Докл. НАН Украины. – 2015. – № 2. – С. 77 – 82.

6. *Базыкина А.Ю., Доценко С.Ф.* Применение каналовой модели для описания распространения одиночных волн типа цунами в канале переменного поперечного сечения // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 1. – С. 29 – 41.
7. *Didenkulova I., Pelinovsky E.* Runup of tsunami waves in U-shaped bays // Pure Appl. Geophys. – 2011. – № 168. – С. 1239 – 1249.
8. *Didenkulov O., Didenkulova I., Pelinovsky E.* Parameterization of run-up characteristics for long bell-shaped solitary waves propagating in a bay of parabolic cross-section // Proc. Eston. Acad. Sci. – 2015. – 64, № 3. – P. 234 – 239.
9. *Доценко С.Ф., Санникова Н.К.В.* Численный анализ распространения волны цунами из одного бассейна в другой через пролив прямоугольного поперечного сечения // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 6. – С. 3 – 16.
10. *Доценко С.Ф., Санникова Н.К.В.* Анализ двумерного распространения волн цунами из эллиптического очага в прямолинейный канал // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2011. – Вып. 25. – Т. 2. – С. 419 – 428.
11. *Harris M.W., Nicolsky D.J., Pelinovsky E.N. et al.* Runup of nonlinear long waves in trapezoidal bays: 1-D analytical theory and 2-D numerical computations // Pure Appl. Geophys. – 2015. – 172, issue 3. – P. 885 – 899.
12. *Lovholt F., Glimsdal S., Linett P. et al.* Simulating tsunami propagation in fjords with long-wave models // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2015. – 15, issue 3. – P. 657 – 669.
13. *Rabinovich A.B.* Seiches and harbor oscillations // Handbook Coast. Ocean Engineer. – Singapoure: World Scientific Publ., 2009. – 9. – P. 193 – 236.
14. *Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 174 с.
15. *Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б. и др.* Волны в пограничных областях океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 280 с.

Propagation of tsunami-like surface long waves in the bays of a variable depth

A.Yu. Bazykina, S.F. Dotsenko

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

Regularities of single long waves' propagation in the semi-closed bays of model and real geometry are numerically studied. The zones of waves' amplification in the bay are found; one of them is located near the wave running-up on the beach (in front of the bay entrance) and the other – in the middle part of the basin. Wave propagation in these zones is accompanied both by significant rise and considerable fall of the sea level. Narrowing of the bay entrance and increase of the entering wave length result in decrease of the sea level maximum rises and falls. The Feodosiya Gulf in the Black Sea is considered as a real basin. Four zones of the strongest wave amplification in the gulf are revealed. The sea level maximum rises and extreme falls which tend to grow with decrease of the entering wave length are observed in these zones.

Keywords: nonlinear long waves, quadratic bottom friction, wave propagation in the bays, bays of model geometry, Feodosiya Gulf, numerical solutions.