

**С.Ф.Доценко**, А.Ю.Базыкина, А.В.Ингеров

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь*

## **ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ТИПА ЦУНАМИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ**

Модель нелинейных поверхностных длинных волн применена для численного анализа особенностей распространения волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря. С высоким пространственным разрешением рассмотрены амплитудные характеристики одиночных поверхностных волн при выходе на мелководье и при распространении в бухтах. Оценено влияние на динамику волн донного трения и нелинейности, а также характеристик выходящей на шельф длинной волны. Рассчитаны условия обрушения волн при подходе к берегу.

Показано, что распределение высот волн в прибрежной зоне существенно зависит от положения сейсмического источника и его параметров. Наибольшей цунамиопасности подвержены ближайšie к источнику генерации участки черноморского побережья. Морские заливы могут также приводить к локальному усилению волнового поля вдоль побережья при входе в залив одиночных волн.

Определены и сопоставлены характеристики волн типа цунами для восточного побережья Черного моря, Крымского п-ова и северо-западной части моря, а также ряда заливов черноморского региона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *волны типа цунами, модель нелинейных длинных волн, распространение волн в Черном море, цунамиопасность черноморского побережья*

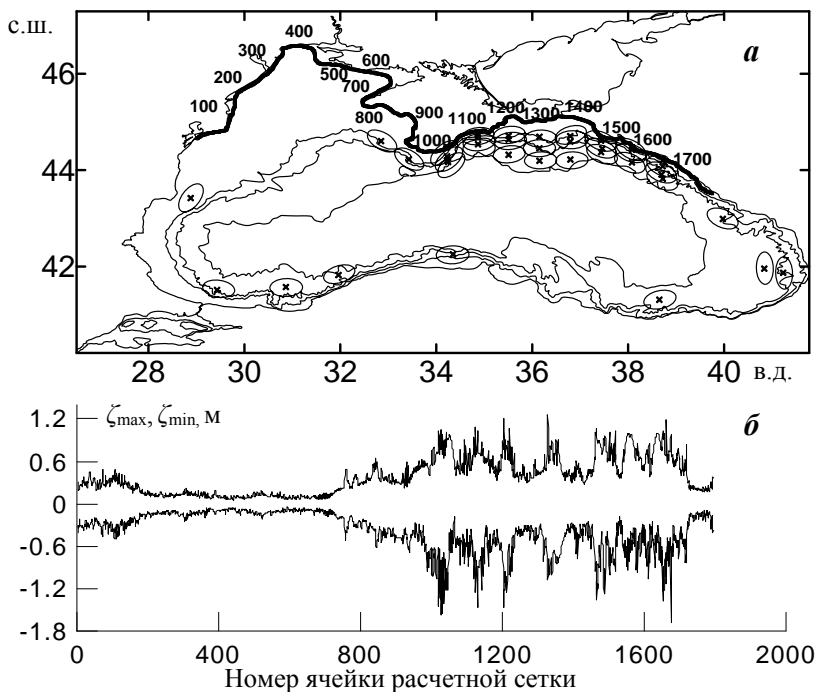
Все известные к настоящему времени черноморские цунами можно разделить на две группы. Первая из них содержит те события, которые в силу исторической давности и иных причин не были зарегистрированы инструментально, но описаны очевидцами, отмечены как разрушительные или значимые события для населения прибрежных районов в летописях и легендах. Во вторую группу входят события, при которых аномальные колебания уровня моря во время цунами были зафиксированы стандартными мареографами. Цунами наблюдались вдоль всего побережья Черного моря. Подавляющая часть из них была вызвана землетрясениями с эпицентрами в море, некоторые – землетрясениями на суше. Исторические свидетельства позволяют говорить о том, что цунами в районах Сухуми (20 г.), Севастополя (103 г.), Варны (543 г.), Босфора (557 г.), Евпатории (1341 г.), Фороса (1427 г.), у восточного берега моря (1909 г.) и на севере Турции (1598 г.) могли носить катастрофический характер и имели большие высоты (2 – 3 м). Эти цунами сопровождались значительными подъемами и понижениями уровня моря, что приводило к затоплению обширных территорий и ощутимому экономическому ущербу.

Наибольший интерес для количественной оценки параметров волн цунами в Черном море представляет вторая группа исторических событий, когда цунами были зарегистрированы инструментально. В [1 – 8] описаны характеристики четырех цунами по мареографическим данным. События были вызваны подводными землетрясениями 26 июня и 11 – 12 сентября

1927 г. к югу от Крымского п-ова с магнитудами  $M = 5,5$  и  $6,5$  соответственно, разрушительным землетрясением 26 декабря 1939 г. магнитудой  $M = 7,9 - 8,0$  с эпицентром на суше в 150 км от северо-восточного побережья Турции и подводным землетрясением 12 июня 1966 г. магнитудой  $M = 5,8$  в районе Анапы у северо-восточного берега моря. Цунами при этих событиях зарегистрированы несколькими мареографами вдоль крымского и кавказского побережья. На основе оцифрованных мареограмм были сформированы временные ряды колебаний уровня в пунктах регистрации с дискретностью 1 мин, рассчитаны спектры и получены амплитудные и частотные характеристики волн цунами [9]. Распределение высот черноморских цунами вдоль побережья моря очень неравномерно. Высота первой волны в пунктах наблюдения изменялась в диапазоне 0,6 – 52 см, а высота волн цунами в целом – от 2 до 52 см. Для большинства пунктов побережья видна заметная тенденция к увеличению высот волн с ростом магнитуды землетрясения. Как правило, цунами характеризуются первоначальным подъемом уровня моря, а первая волна не является наибольшей по высоте. Максимальные высоты зарегистрированных цунами в точках наблюдения не превышают 52 см, однако в некоторых пунктах побережья смещения уровня моря составили по визуальным оценкам 1 – 2 м.

Время распространения цунами до ближайших к зоне сейсмической генерации пунктов регистрации составило 9 мин, а до ближайших участков побережья волна распространялась за 5 мин и менее. Спектры колебаний уровня моря, как правило, имеют 1 – 2, реже 3 максимума, периоды волн цунами колеблются, в основном, в пределах 8 – 50 мин. Нередко спектры содержат и более низкочастотные пики, природа которых требует дальнейшего изучения. Можно предположить, что явлению цунами сопутствовали низкочастотные колебания уровня, обусловленные атмосферными процессами, сейшами или другими причинами. Обнаружена близость форм спектров для волн цунами в Новороссийске и Туапсе для всех цунамигенных землетрясений, хотя положение эпицентров для них принципиально различно. Нельзя исключать возможность генерации в этих районах цунами подводными оползнями.

Имеющиеся данные наблюдений не позволяют дать научно-обоснованные оценки цунамиопасности побережья Черного моря. Подобный анализ требует разработки региональных численных моделей. Для описания процесса распространения волн цунами использовалась нелинейная двумерная эволюционная модель поверхностных длинных волн с учетом квадратичного по скорости донного трения. Отклик Черного моря на подводное землетрясение моделировался известным начальным смещением жидкости, заданным в эллиптической области в виде знакопостоянного распределения, при нулевом поле скорости [10 – 12]. Оси эллиптической зоны генерации находились, в зависимости от магнитуды землетрясения  $M$ , по эмпирическим формулам для евразийского региона [13]. Расчет проводился на прямоугольной сетке с пространственным шагом 1000 м до глубины 5 м, модельные очаги цунами располагались в зонах повышенной сейсмоактивности. Регистрация колебаний уровня моря производилась в ячейках, образующих непрерывную границу вблизи 5 м изобаты и пронумерованных слева направо (рис. 1, *a*).



Р и с . 1 . Оценка цунамиопасности участка черноморского побережья: расчетная область со схемой сейсмических источников и граница, образованная ячейками расчетной сетки, в которых регистрировались колебания уровня моря (а); экстремальные подъемы и понижения уровня моря вдоль участка побережья (б).

Из результатов численного анализа следует, что положение зон генерации цунами существенно влияет на распределение высот волн вдоль побережья. На начальном этапе наибольшие высоты волн и величины волновых скоростей отмечаются в направлении, перпендикулярном большой оси эллиптической зоны генерации. В дальнейшем существенное влияние на распространение волн оказывает батиметрия бассейна. Рассмотренные зоны генерации цунами расположены на свале глубин, и поэтому в большинстве случаев наиболее интенсивные волны формируются в направлении ближайшего участка береговой черты. Это свойство волн проявляется тем заметнее, чем ближе зона генерации к берегу. Волна, распространяющаяся в направлении глубоководной части моря, нередко вызывает на противоположном участке побережья (с учетом рефракции волн) заметные колебания уровня моря, что является следствием ограниченности бассейна. В некоторых случаях амплитуды колебаний на противоположном берегу моря и в ближайших к зоне генерации береговых пунктах могут быть соизмеримы. На рис.1, б приведено распределение максимальных повышений и понижений уровня моря  $\zeta_{\max}$ ,  $\zeta_{\min}$  вдоль непрерывной границы для магнитуды  $M = 7$ .

Для рассмотренной системы очагов наиболее заметное усиление волн отмечено при распространении в направлении берега из сейсмических источников в северо-восточной части Черного моря (Крымско-Кавказская

сейсмоактивная зона). Заметные колебания уровня моря в ряде пунктов Южного берега Крыма возможны в результате захвата волн, распространяющихся в северо-западном, северном и северо-восточном направлениях.

#### **Распространение длинных волн в бухтах и заливах Черного моря.**

На распространение длинных волн в прибрежных районах морских бассейнов оказывают влияние изменение глубины бассейна, заливы, проливы и другие нерегулярности батиметрии и границы бассейна [14, 15]. 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.

При выходе волн цунами на мелководье их скорость резко уменьшается, и вместе с этим возрастают их амплитуды. Ограниченность пространства при входе волн в узкие бухты, заливы или устья рек приводит к еще большему возрастанию высот волн. Особенность подхода к берегу и размеры элементов волн цунами в значительной мере зависит от конфигурации береговой черты. Наиболее опасными являются бухты и заливы, сужающиеся к мелководной вершине залива и уменьшающиеся по глубине. Поперечное сечение бухты резко уменьшается, в результате чего волна поднимается и обрушивается на берег. Такие бухты и заливы наиболее опасны при подходе волн цунами к побережью.

В рамках модели нелинейных длинных волн численно исследовано распространение волн типа цунами в бухтах Черного моря, имеющих различную конфигурацию. Движение нелинейных длинных волн в двумерном случае описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - k \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h + \zeta}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - k \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h + \zeta}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial[(h + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(h + \zeta)v]}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

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;  $k = 0,0026$  – коэффициент донного трения.

В начальный момент времени жидкость в бухте находится в невозмущенном состоянии. Через открытую границу ( $y = 0$ ) в расчетную область, которая включает в себя бухту и прилегающую к ней акваторию моря, входит плоская волна, заданная при помощи граничных условий:

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

На жидких границах задается условие свободного выхода волн:

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

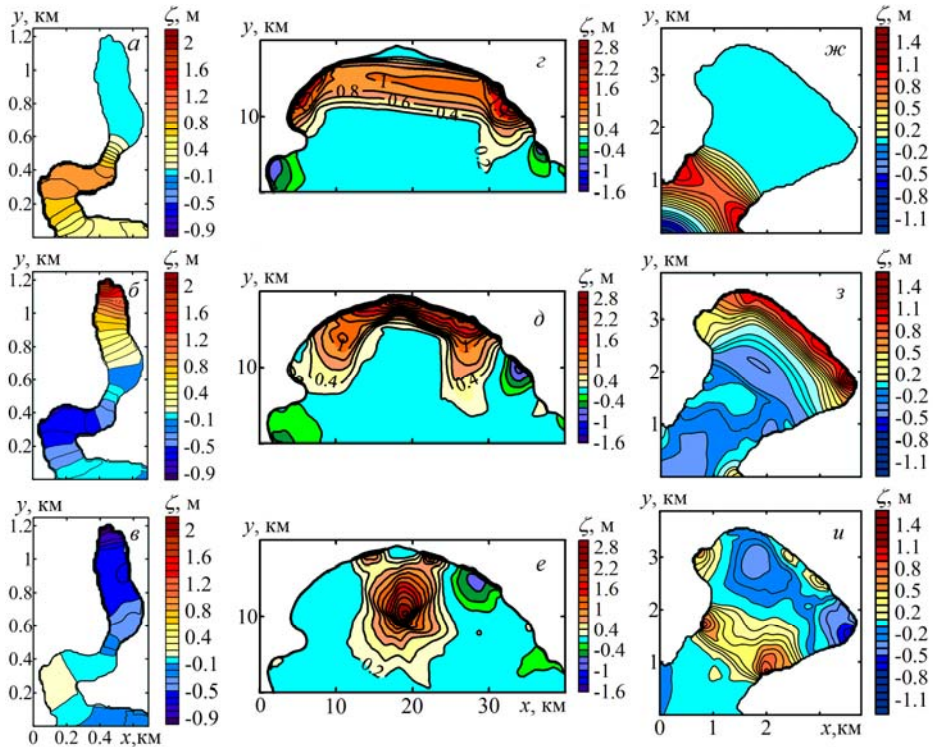
$$\frac{\partial v}{\partial t} - C_2 \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (x=0, \quad 0 \leq y \leq M, \quad t \geq T), \quad (3)$$

где  $C_1 = \sqrt{gh(y)}$ ,  $C_2 = \sqrt{gh(x)}$  – локальные скорости распространения длинных волн;  $L$  и  $M$  – ширина жидкой границы бухты вдоль оси  $x$  и  $y$  соответственно.

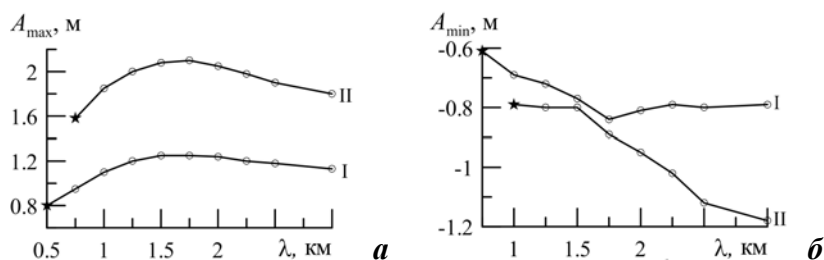
На твердой береговой границе задается условие непротекания жидкости:  $u = 0, v = 0$ .

Примером бухты, сильно ограничивающей связь с открытой частью Черного моря, является Балаклавская бухта, которая врезана вглубь расщелины скального массива в северном направлении на расстояние до 1500 м. Глубина в вершине бухты составляет 5 – 10 м и до 35 м на горловине. Конфигурация береговой черты разделяет бухту на две части – южную глубоководную, сообщающуюся с открытой частью моря, и северную мелководную, практически застойную часть. Известно, что во время цунами 1927 г. в Балаклавской бухте уровень моря упал на один метр ниже обычного значения, а затем превысил его более чем на метр [16].

Рассмотрим распространение длинной волны типа цунами в Балаклавской бухте. Численное моделирование выполнялось на равномерной сетке с шагами по координатам  $\Delta x = \Delta y = 5$  м и шагом по времени  $\Delta t = 0,1$  с. Начальная высота и длина волны равны 0,5 м и 1 км соответственно. В бухту входит волна повышения, которая усиливается в наиболее изогнутой узкой



Р и с. 2. Распространение нелинейной длинной волны в Балаклавской бухте (а – в); Феодосийском заливе (z – e); Геленджикской бухте (жс – и).



Р и с . 3 . Зависимости максимальных смещений уровня моря в Балаклавской бухте от начальной длины волны в зонах наибольшего локального усиления: максимальные возвышения (а); экстремальные понижения (б) уровня моря. Звездочка разделяет режимы обрушивающихся (слева от нее) и необрушивающихся (справа от нее) волн.

области бухты до 1 м, частично отражается, а частично проходит в более мелководную область (рис.2, а – в) При достижении вершины бухты высота волны возрастает до 2 м. Следующая за волной повышения волна понижения также частично отражается и частично проходит в более мелководную область, при этом понижения уровня достигают – 1 м. Из-за узости и изогнутости бухты наблюдаются довольно продолжительные колебания уровня моря вдоль ее акватории с частичным выходом волн в ее более глубоководную зону.

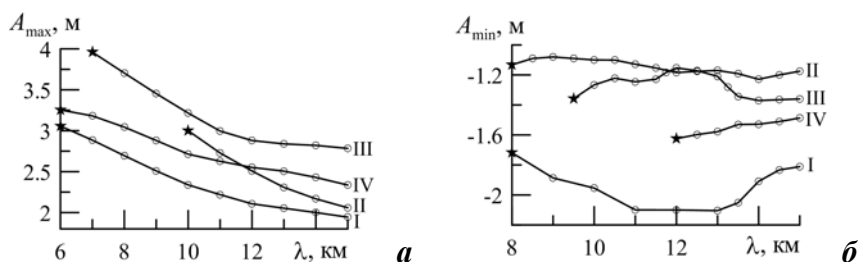
Экстремальные горизонтальные скорости волны отмечены в средней части бухты как в наиболее узкой, а также в мелководной области при подходе к вершине бухты и могут достигать 1,85 м/с.

На рис.3 представлены зависимости экстремальных возвышений и понижений уровня моря в средней части Балаклавской бухты (I) и в вершине бухты (II) от длины волны. Расстояние, пройденное нелинейной волной до обрушения, сокращается при уменьшении начальной длины волны.

Рассмотрим распространение длинной волны типа цунами в Феодосийском заливе. Залив широкой дугой глубоко вдается в сушу и обладает ровным пологим дном. Глубина у входа составляет 30 – 36 м.

Для моделирования распространения волны использовалась равномерная сетка с пространственными шагами  $\Delta x = \Delta y = 100$  м и шагом по времени  $\Delta t = 1$  с. Начальная высота и длина волны равны 1 м и 10 км соответственно. Волна входит в залив, ее фронт изгибается, вдоль береговой черты возникают два возвышения, причем слева волна усиливается более значительно вследствие резкого изменения глубины и выступающего в море мыса; высота волны достигает здесь 2 – 3 м (рис.2, з). По мере распространения волны ее высота растет и при отражении от берега достигает 3 м. Вдоль береговой черты отмечены две зоны наибольшего локального усиления волн (рис.2, д). Отраженная волна усиливается в средней части, где возникает еще один локальный максимум (рис.2, е), и распространяется в направлении выхода из залива. В этих зонах усиления наблюдается также увеличение горизонтальных скоростей волны до 1,47 м/с.

На рис.4 приведены зависимости экстремальных повышений и понижений уровня моря от начальной длины волны для четырех зон усиления волн в заливе. Максимальные высоты волн возрастают с уменьшением длины вхо-



Р и с . 4. Зависимости максимальных смещений уровня моря в Феодосийском заливе от начальной длины волны в зонах наибольшего локального усиления: максимальные возвышения (а); экстремальные понижения (б) уровня моря. Звездочка разделяет режимы обрушивающихся (слева от нее) и необрушивающихся (справа от нее) волн.

дящей в бухту волны. Расстояние, пройденное волной до обрушения, сокращается при уменьшении длины волны на входе в бухту.

Не так опасны волны типа цунами в широких бухтах с узким входом, где высота волны в вершине бухты в несколько раз меньше, чем на входе в бухту, за счет увеличения ее поперечного сечения. Бухты, имеющие узкий вход и расширяющуюся акваторию, не успевают пропустить весь объем воды, поэтому часть волны отражается обратно в море. Поступивший в бухту с волной объем воды растекается по акватории бухты, в результате чего высота ее снижается и тем больше, чем шире акватория бухты. В таких бухтах снижается опасность разрушений волнами прибрежных сооружений.

В качестве примера рассмотрим распространение волны типа цунами в Геленджикской бухте. Численное моделирование выполнялось на равномерной сетке с шагами по координатам  $\Delta x = \Delta y = 5$  м и шагом по времени  $\Delta t = 0,1$  с. Начальная высота и длина волны соответственно равны 1 м и 2 км. Волна входит в бухту через узкое горло, попадая в широкую часть бухты, где амплитуда и горизонтальные скорости волны уменьшаются. При распространении волны в Геленджикской бухте усиления амплитудных характеристик наблюдаются в узкой части бухты и при отражении от берега (рис.2, ж – и). При этом высота волны возрастает до 1,5 м, а горизонтальные скорости могут достигать 1,8 м/с.

**Выводы.** Модель нелинейных поверхностных длинных волн применена для численного анализа особенностей распространения волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря. Показано, что распределение высот волн в прибрежной зоне существенно зависит от положения сейсмического источника и его параметров. Наибольшей цунамиопасности подвержены ближайшие к источнику генерации участки черноморского побережья.

Предварительный анализ, проведенный для рассмотренной системы сейсмических источников, показал, что наиболее заметные повышения и понижения уровня моря характерны для северо-восточной части Черного моря, включая южный и восточный участки побережья Крыма. Северо-западная часть моря подвержена воздействию цунами значительно слабее.

По результатам численных экспериментов на сетке с высоким пространственным разрешением рассмотрены амплитудные характеристики

одиночных поверхностных волн при выходе на мелководье и при распространении в бухтах и заливах Черного моря.

Численный анализ показал, что максимальные высоты волн возрастают с уменьшением длины входящей в бухту волны. Расстояние, пройденное волной до обрушения, сокращается при уменьшении длины волны на входе в бухту.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Фундаментальная океанология», № 0827-2014-0010).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никонов А.А.* Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Изв. РАН. Физика Земли.– 1997.– 61, № 1.– С.86-96.
2. *Соловьева О.Н., Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В.* Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения // Океанология.– 2004.– 44, № 5.– С.679-685.
3. *Yalçiner A., Pelinovsky E., Talipova T., Kurkin A., Kozelkov A., Zaitsev A.* Tsunami in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data // J. Geophys. Res.– 2004.– 109, C12023.– 13 p.
4. *Григораш З.К.* Черноморские цунами 1927 г. по мареографическим записям // Тр. МГИ АН СССР.– 1959.– 17.– С.59-67.
5. *Григораш З.К., Корнева Л.А.* Волны цунами, сопровождавшие Анапское землетрясение 12 июля 1966 г. // Океанология. –1969.– 9, вып.6.– С.988-995.
6. *Григораш З.К., Корнева Л.А.* Мареографические данные о цунами в Черном море при Турецком землетрясении в декабре 1939 г. // Океанология.– 1972.– 12, вып.3.– С.417-422.
7. *Григораш З.К.* Обзор удаленных мареограмм некоторых цунами в Черном море // Тр. СахКНИИ ДВО АН СССР.– 1972.– вып.29.– С.271-278.
8. *Доценко С.Ф.* Черноморские цунами // Изв. АН. Физика атмосферы и океана.– 1994.– 30, № 4.– С.513-519.
9. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Характеристики черноморских цунами по данным измерений // Морской гидрофизический журнал.– 2007.– № 1.– С.21-31.
10. *Liu P.L.-F., Cho Y.-S., Briggs M.J. et al.* Runup of solitary waves on a circular island // J. Fluid Mech.– 1995.– 302.– P.259-285.
11. *Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.* Основные океанологические задачи теории мелкой воды.– Л.: Гидрометеиздат, 1968.– 300 с.
12. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Характеристика волн цунами сейсмического происхождения в бассейне Черного моря по результатам численного моделирования // Морской гидрофизический журнал.– 2013.– № 3.– С.25-34.
13. *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.
14. *Кононкова Г.Е., Показеев К.В.* Динамика морских волн.– М.: Изд-во МГУ, 1985.– 298 с.
15. *Мурти Т.С.* Сейсмические морские волны цунами.– Л.: Гидрометеиздат, 1981.– 447 с.
16. *Шнюков Е.Ф., Митин Л.И., Цемко В.П.* Катастрофы в Черном море.– Киев: Манускрипт, 1994.– 296 с.



S.F.Dotsenko, A.Yu.Bazykina, A.V.Ingerov

## PECULIARITIES OF THE PROPAGATION OF THE TSUNAMI-TYPE WAVES IN THE BLACK SEA COASTAL ZONE

The model of nonlinear surface long waves is used for the numerical analysis of the tsunami-type wave propagation in the Black Sea coastal zone. With high spatial resolution are considered amplitude characteristics of single surface waves in shallow water and in case of the propagation in bays. The effect on the wave dynamics of bottom friction and nonlinearity, and the characteristics of the long wave on the shelf were estimated. Conditions of wave breaking near the shore were calculated.

It is shown that the distribution of wave heights in the coastal zone substantially depends from the seismic source position and its parameters. The areas of the Black Sea coast, which are located nearby the generation source, are the most tsunami dangerous. Sea gulfs may also lead to the intensification of the local wave field along the coast with the propagation of single waves in the gulf.

The tsunami-type waves characteristics in the eastern Black Sea coast of the Crimean peninsula and the northwestern part of the sea, as well as a number of bays of the Black Sea region were determined and compared.

**KEYWORDS:** tsunami-type waves, model nonlinear long wave model, wave propagation in the Black Sea, tsunami dangerous of the Black Sea coast