

С.Ф. Доценко, А.В. Ингеров

Характеристика волн цунами сейсмического происхождения в бассейне Черного моря по результатам численного моделирования

Выполнен численный анализ эволюции цунами в бассейне Черного моря. Расчеты проведены на сетке с шагом 500 м для 9 эллиптических зон генерации, расположенных в районах повышенной сейсмической активности. Показано, что положение очага цунами существенно влияет на распределение высот волн вдоль морского побережья. Как правило, наиболее интенсивные волны формируются на ближайшем к зоне генерации участке берега. В то же время отмечены случаи, когда наиболее интенсивны колебания уровня моря не в ближайших к сейсмическому источнику пунктах побережья, а на удаленных участках берега. В некоторых прибрежных пунктах экстремальные подъемы и понижения уровня моря могут превышать по абсолютной величине амплитуду начального смещения поверхности моря в очаге цунами в 1,5 – 2 раза.

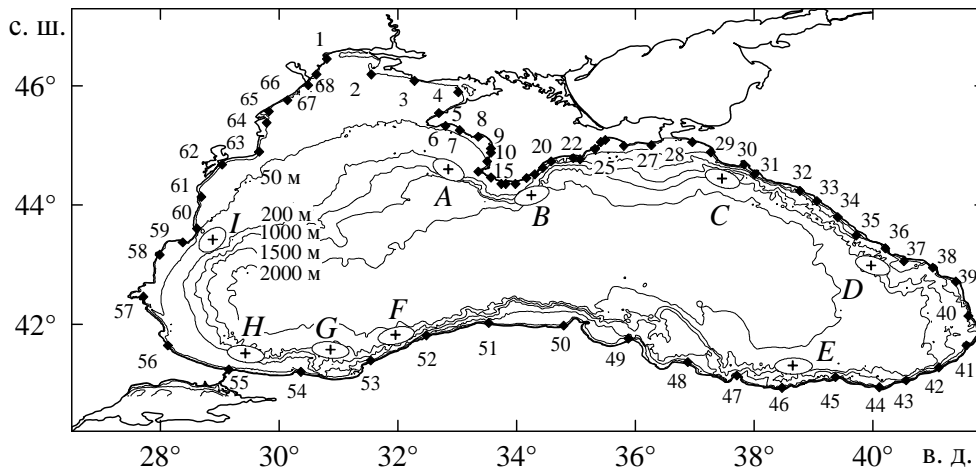
Ключевые слова: Черное море, цунами, уравнения длинных волн, численное моделирование, амплитудные характеристики волн.

Введение. Цунами – относительно редкое опасное природное явление в бассейне Черного моря. За последние две тысячи лет здесь отмечено около 20 случаев аномальных колебаний уровня моря, которые можно отнести к явлению цунами сейсмической природы [1, 2]. Цунами наблюдались вдоль всего побережья и вызывались землетрясениями как в море, так и на суше. Для четырех событий XX в. имеются инструментальные данные о колебаниях уровня моря во время цунами. Это события 1927 г. (два), 1939 и 1966 гг. вдоль крымского и кавказского участков побережья. Обобщенные данные о них содержатся в работе [3].

Цунамиопасность побережья Черного моря ранее изучалась численно как для отдельных районов [4 – 8], так и для Черноморского бассейна в целом [8 – 13]. Ниже изложены результаты численного анализа особенностей распространения цунами в Черном море из девяти зон наиболее вероятной сейсмической генерации волн. Расчеты в длинноволновом приближении выполнены на прямоугольной сетке с пространственным шагом 500 м. В отличие от предыдущих исследований существенно повышено пространственное разрешение модели и учтены эффекты асимметрии зоны генерации цунами.

Математическая модель. Рассмотрим бассейн, форма береговой черты и распределение глубин которого моделируют Черное море (рис. 1). Глубина бассейна задавалась на прямоугольной сетке 2397×1779 узлов с пространственным шагом 500 м. Расчетная область ограничена твердой береговой границей с вертикальной стенкой на глубине 5 м, исключая вход в Керченский пролив, где могут быть использованы условия свободного прохождения волн или твердой боковой границы.

© С.Ф. Доценко, А.В. Ингеров, 2013



Р и с. 1. Черное море. Буквами *A – I* отмечены эллиптические очаги генерации цунами при магнитуде $M = 7$, использованные в вычислительных экспериментах. Цифрами 1 – 68 отмечены пункты бассейна, для которых рассчитывались мареограммы

Для описания процесса распространения волн цунами используется нелинейная двумерная эволюционная модель поверхностных длинных волн с учетом квадратичного по скорости донного трения. Реакция Черного моря на подводное землетрясение моделируется известным начальным смещением жидкости при нулевом поле скорости.

В рамках этой модели волновое движение жидкости в полных потоках описывается системой трех уравнений [14]:

$$U_t + (U^2/D)_x + (UV/D)_y = -gD\zeta_x - gk^2 D^{-7/3} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (1)$$

$$V_t + (UV/D)_x + (V^2/D)_y = -gD\zeta_y - gk^2 D^{-7/3} V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (2)$$

$$\zeta_t + U_x + V_y = 0 \quad (3)$$

с условием скольжения на твердой береговой границе, означаящим равенство нулю нормальной к границе проекции полного потока жидкости:

$$(U, V)_n = 0. \quad (4)$$

На входе в Керченский пролив может применяться условие свободного прохождения волн (с юга на север):

$$V_t + CV_y = 0, \quad (5)$$

в данной работе используется условие (4).

Начальные условия задавались в виде

$$U = V = 0, \zeta = \zeta_0(x, y) \quad (t = 0). \quad (6)$$

В задаче (1) – (6) переменные x, y – зональная и меридиональная координаты; t – время; нижние индексы x, y, t означают частные производные по со-

ответствующим переменным. Искомые поля $U(x, y, t)$ и $V(x, y, t)$ – проекции вектора полного горизонтального потока жидкости на оси x и y соответственно, $\zeta(x, y, t)$ – распределение смещений свободной поверхности жидкости от горизонтального положения. Через $\zeta_0(x, y)$ обозначено начальное смещение поверхности жидкости в (6); $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t) > 0$ – полная (динамическая) глубина жидкости, $H(x, y)$ – глубина бассейна в невозмущенном состоянии; $C = \sqrt{gH(x, y)}$ – локальная скорость распространения длинных волн; g – ускорение свободного падения; $k = 0,013$ – параметр Маннинга.

Для решения задачи (1) – (6) применялся метод конечных разностей на разнесенных для U , V и ζ прямоугольных сетках (сетка C) с пространственным шагом $\Delta x = \Delta y = 500$ м [14, 15]. Для интегрирования по времени использовалась явно-неявная одношаговая схема. По результатам численных экспериментов шаг интегрирования по времени можно принять равным 1 с.

Начальное смещение свободной поверхности моря в эллиптической области с центром в точке (x_0, y_0) задавалось в виде знакопостоянного гладкого распределения

$$\zeta_0 = a_0 \cos^2(\pi r / 2) \quad (r \leq 1), \quad \zeta_0 = 0 \quad (r > 1), \quad (7)$$

где $r = 2\sqrt{(x_1/L)^2 + (y_1/W)^2}$, L, W – длины большой и малой осей эллиптической зоны генерации, $x_1 = (x - x_0) \cos \alpha + (y - y_0) \sin \alpha$, $y_1 = (y - y_0) \cos \alpha - (x - x_0) \sin \alpha$, α – угол наклона большой оси эллипса к оси x , отсчитываемый против часовой стрелки.

Оси эллиптической зоны генерации L и W (задаются в километрах) находились, в зависимости от магнитуды землетрясения M , по эмпирическим формулам для Евразийского региона [16]

$$L = W, \lg L = 0,24M - 0,16 \quad (M < 6,5), \\ \lg L = 0,6M - 2,5, \lg W = 0,15M + 0,42 \quad (M \geq 6,5).$$

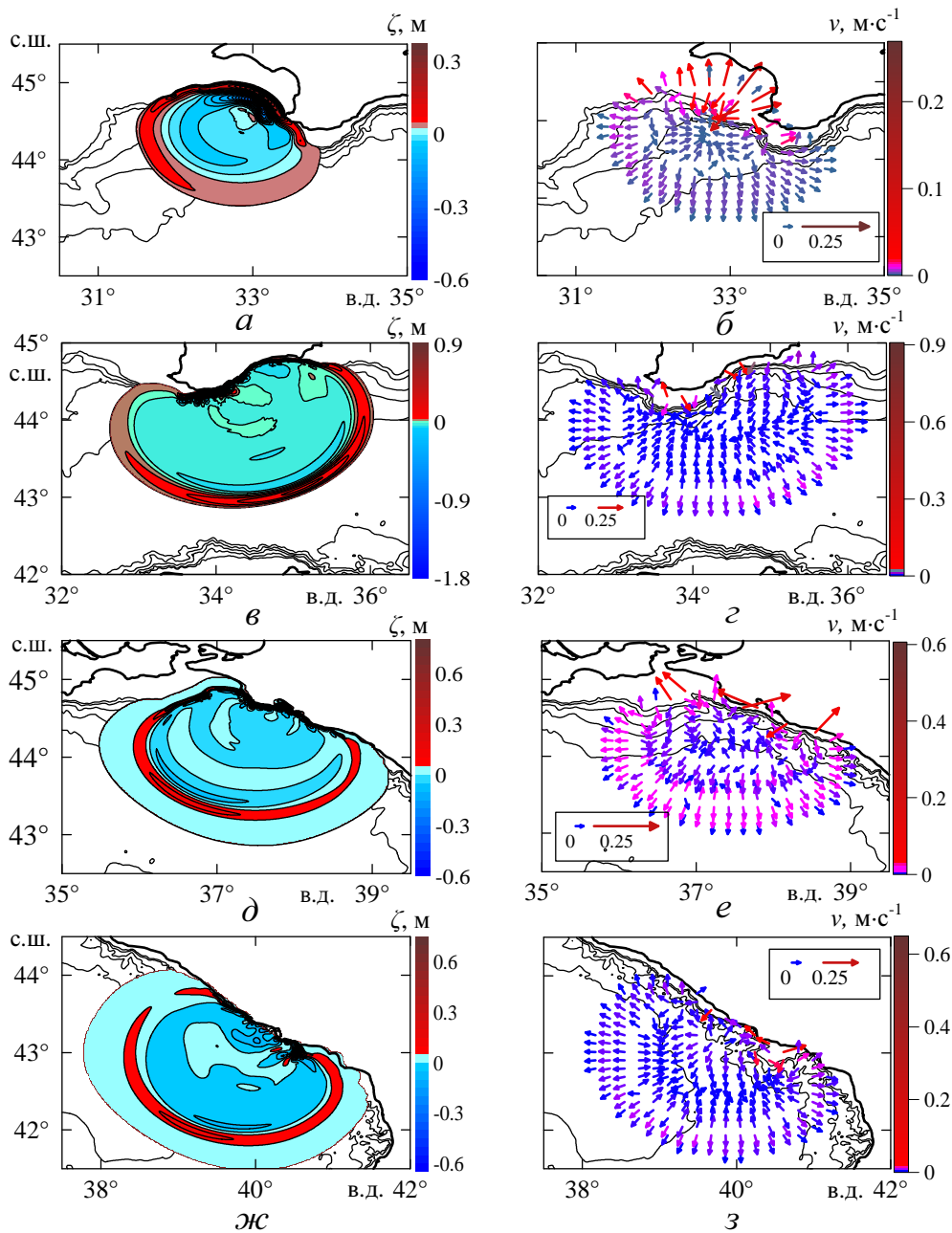
Максимальное смещение поверхности моря a_0 в зоне землетрясения принято равным 1 м, что соответствует полуэмпирической формуле из [17] для цунамических землетрясений Тихоокеанского региона с магнитудой $M = 7$.

Результаты численного анализа. Анализ цунами включал расчет эволюции пространственной структуры волновых полей в течение 5 ч. Распределения ζ и (u, v) существенно зависят от особенностей рельефа дна бассейна, орографии берегов, положения очага цунами и магнитуды землетрясения.

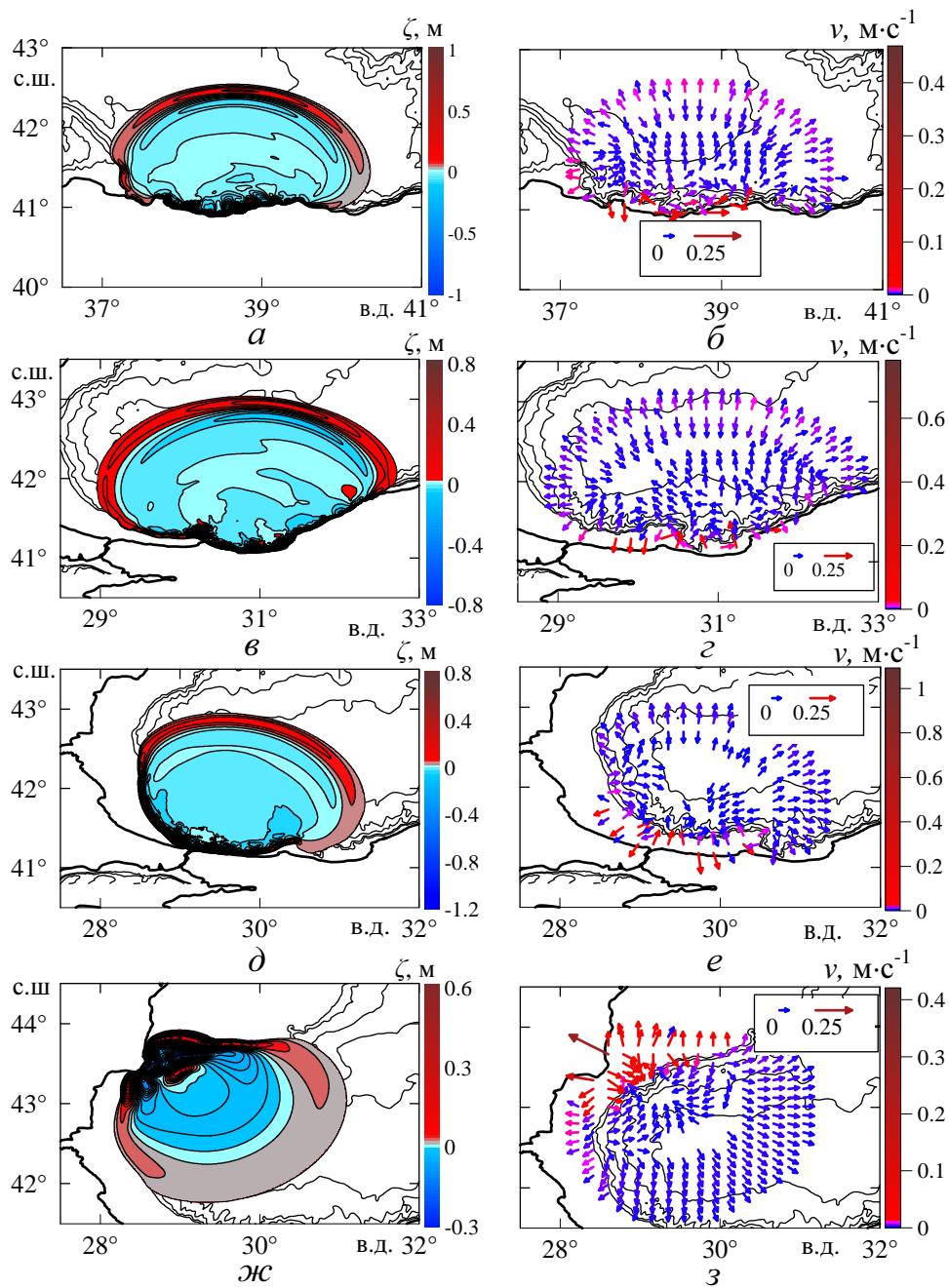
Численный анализ характеристик цунами выполнен для 9 эллиптических очагов цунами $A - I$ (рис. 1), расположенных в зонах повышенной сейсмической активности Черноморской впадины [18]. Мареограммы и найденные по ним параметры волн анализировались в пунктах 1 – 68 вдоль всей границы Черного моря.

Характерные случаи распространения цунами в Черном море из возможных эллиптических зон сейсмической генерации приведены на рис. 2 и 3. Начальная стадия эволюции цунами такая же, как и в бассейне постоянной глубины [19], а именно: при опускании центральной части начального поднятия

уровня моря формируется направленная волна цунами, высота которой наибольшая в направлениях, перпендикулярных продольной оси эллиптической зоны генерации. Этот эффект проявляется во всех случаях, представленных на рис. 2 и 3.



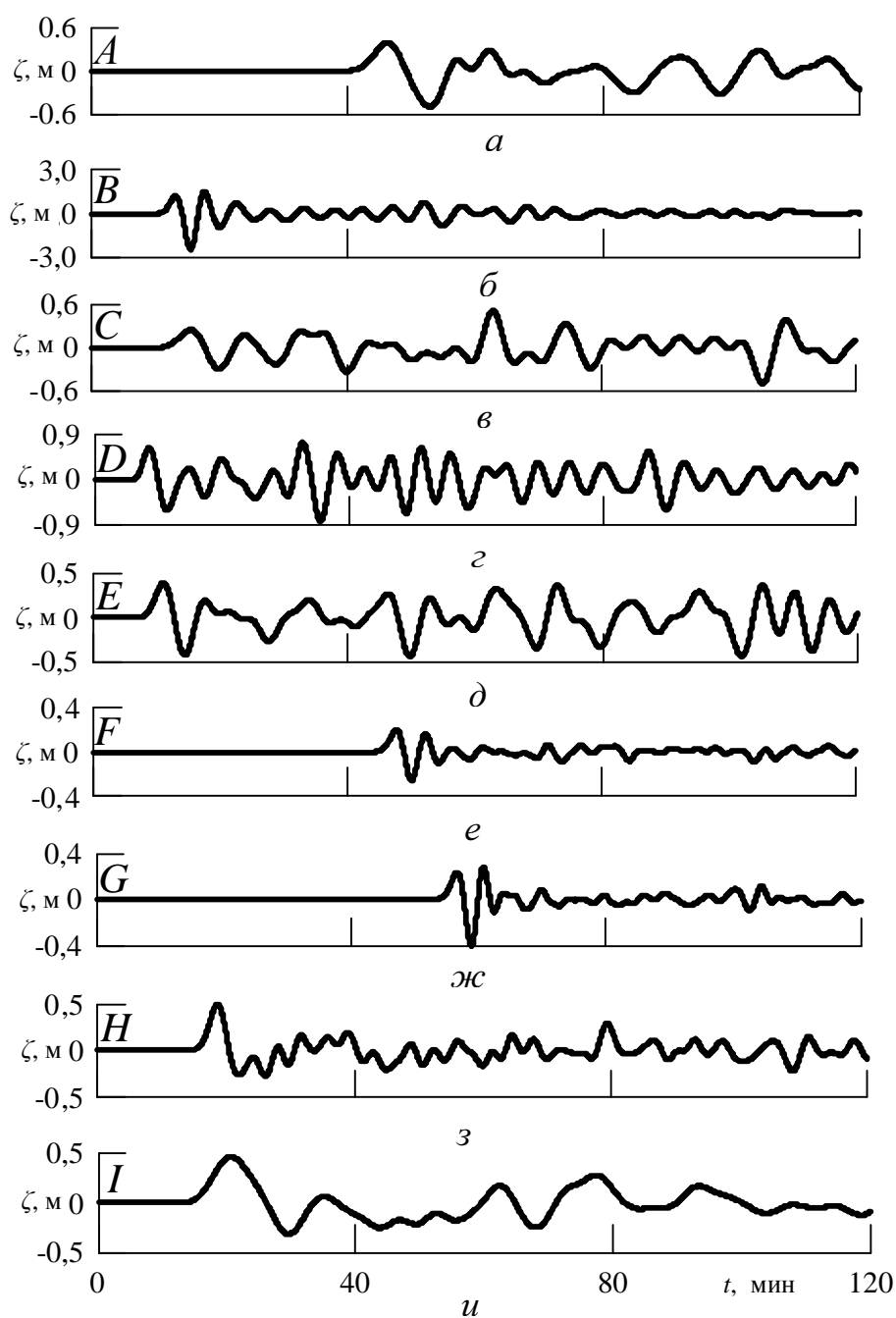
Р и с. 2. Карты эволюции волн цунами (*а, в, д, ж* – поля уровня моря; *б, г, е, з* – поля волновых скоростей) для зон генерации *A – а, б; B – в, г; C – д, е; D – ж, з* в момент времени $t = 15$ мин



Р и с. 3. Карты эволюции волн цунами (*а, в, д, ж* – поля уровня моря; *б, г, е, з* – поля волновых скоростей) для зон генерации *Е* – *а, б* ($t = 15$ мин); *Г* – *в, г* ($t = 18$ мин); *Н* – *д, е* ($t = 18$ мин); *И* – *ж, з* ($t = 27$ мин)

При дальнейшем развитии волнового процесса участки волн, распространяющихся к берегу, сжимаются по нормали к фронту и усиливаются, что обусловлено уменьшением глубины бассейна в направлении берега. Факти-

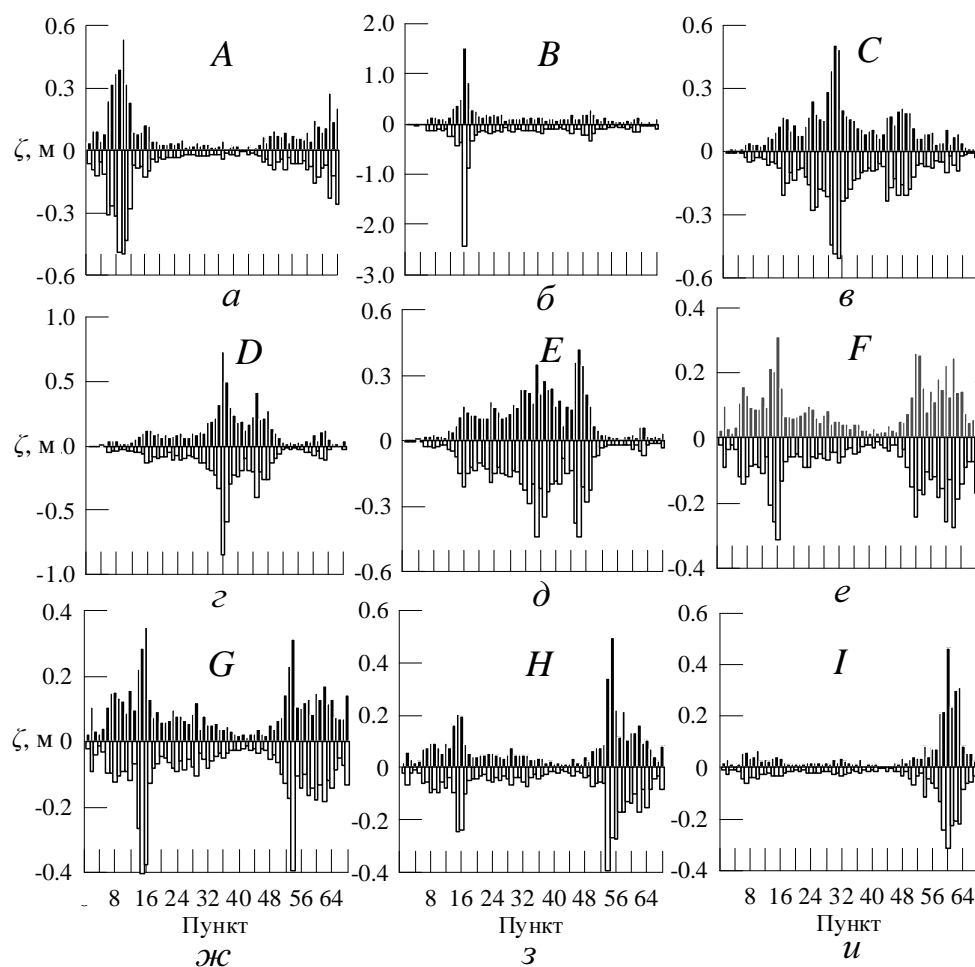
чески наблюдается захват волн шельфовой зоной, что характерно для цунами в Черном море.



Р и с. 4. Колебания уровня моря, сопутствующие цунами, при землетрясениях в очагах *A – I* в различных береговых пунктах: *a* – пункт 10; *б* – пункт 17; *в* – пункт 30; *г* – пункт 36; *д* – пункт 46; *е* – пункт 16; *ж* – пункт 16; *з* – пункт 55; *и* – пункт 60

Эти особенности эволюции проявляются и в полях волновых скоростей, которые наиболее интенсивны в прибрежной зоне Черного моря. Здесь величины волновых скоростей $v = \sqrt{U^2 + V^2} / D$ на временном интервале от начала процесса до 5 ч могут достигать (при магнитуде $M = 7$) больших значений: при излучении из очага $A - 1,05 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, из очага $B - 1,47 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, из очага $C - 0,7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, из очага $D - 1,09 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, из очага $E - 1,25 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, из очага $F - 0,93 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, из очага $G - 0,87 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, из очага $H - 1,05 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, из очага $I - 0,69 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Мареограммы, рассчитанные для различных пунктов побережья, позволяют оценить экстремальные характеристики смещений уровня и характерные периоды волн цунами. На рис. 4 приведены мареограммы для некоторых пунктов побережья. Четко прослеживается момент прихода волн в пункт наблюдений. Наиболее интенсивные волны, как уже отмечалось выше, наблюдаются, как правило, в ближайших к очагам цунами пунктах бассейна. Даже при достаточно редких для региона землетрясениях с магнитудой $M = 7$ не происходит возбуждения интенсивных колебаний уровня моря в выбранных пунктах.



Р и с. 5. Экстремальные подъемы (■) и понижения (□) уровня моря в пунктах 1 – 68 побережья при землетрясениях в очагах $A - I$ ($M = 7$)

Представляет интерес расчет экстремальных характеристик колебаний уровня в различных пунктах побережья Черного моря при землетрясениях в зонах А – I. Максимальные подъемы и понижения уровня моря во время цунами (для всех 9 модельных очагов) в 68 пунктах прибрежной зоны представлены на рис. 5. Экстремальные значения ζ могут достигать $1,5|a_0|$, понижения уровня моря могут превышать $2|a_0|$ (рис. 5, б).

Заключение. Нелинейная баротропная модель длинных волн с учетом квадратичного донного трения применена для численного анализа на сетке с шагом 500 м особенностей эволюции волн цунами в бассейне Черного моря. Рассмотрено распространение цунами из 9 эллиптических очагов, расположенных в зонах наиболее вероятной сейсмической генерации волн цунами. Анализировались как пространственная структура полей уровня и волновых скоростей, так и мареограммы в 68 пунктах морского побережья.

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, в отдельных случаях 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.

Для рассмотренной системы очагов наибольшую потенциальную опасность для украинской части Черноморского побережья представляют очаги цунами, расположенные в северо-восточной и северо-западной частях Черного моря. Более детально характеристики эволюции и усиления волн в этих районах рассмотрены в работах [4 – 8].

Наиболее заметное усиление волн отмечено при распространении в направлении берега из сейсмических источников в северо-восточной части Черного моря (Крымско-Кавказская сейсмоактивная зона). По данным работы [6], в районах Ялты, Гурзуфа, Геленджика, Джубги и Туапсе подъемы уровня моря при магнитуде $M = 7$ ($a_0 = 1$ м) достигают 2,0 – 2,9 м, что в немалой степени обусловлено близостью к этим пунктам зон сейсмической генерации цунами.

Заметные колебания уровня моря в ряде пунктов Южного берега Крыма возможны в результате захвата волн, распространяющихся в северо-западном, северном и северо-восточном направлениях. Для большинства рассмотренных очагов при магнитуде $M = 7$ подъемы и понижения уровня моря в пунктах побережья не превышали по величине начального подъема поверхности жидкости в зоне подводного землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никонов А.А.* Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Изв. РАН. Физика Земли. – 1997. – 33, № 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. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Характеристики черноморских цунами по данным измерений // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 1. – С. 21 – 31.
4. *Доценко С.Ф.* Оценки параметров волн цунами вдоль южного побережья Крымского полуострова // Там же. – 2005. – № 3. – С. 3 – 10.
5. *Доценко С.Ф.* Особенности распространения цунами в северо-западной части Черного моря // Там же. – 2005. – № 6. – С. 46 – 53.
6. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Численное моделирование распространения и усиления волн цунами у Крымского полуострова и северо-восточного побережья Черного моря // Там же. – 2010. – № 1. – С. 3 – 15.
7. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Численный анализ распространения и усиления цунами на северо-западном шельфе Черного моря // Там же. – 2010. – № 5. – С. 11 – 20.
8. *Пелиновский Е.Н., Зайцев А.И.* Оценка и картирование опасности цунами на Черноморском побережье Украины // Тр. Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – № 3(90). – С. 44 – 50.
9. *Engel M.* Hydrodynamisch-numerische ermittlung von bewegungsvorgängen im Schwarzen Meer // Mitteilungen des Instituts für Meerskunde der Universität Hamburg. – 1974. – № 22. – 72 s.
10. *Доценко С.Ф., Коновалов А.В.* Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование // Морской гидрофизический журнал. – 1995. – № 6. – С. 3 – 16.
11. *Зайцев А.И., Козелков А.С., Куркин А.А и др.* Моделирование цунами в Черном море // Изв. Академии инженерных наук Российской Федерации. Прикладная математика и механика. – М. – Н. Новгород: НГТУ, 2002. – 3. – С. 27 – 45.
12. *Yalçiner A., Pelinovsky E., Talipova T. et al.* Tsunami in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data // J. Geophys. Res. – 2004. – 109, № C12023. – 13 p.
13. *Куркин А.А.* Нелинейная и нестационарная динамика длинных волн в прибрежной зоне. – Н. Новгород: Нижегородский государственный технический университет, 2005. – 330 с.
14. *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.
15. *Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.* Основные океанологические задачи теории мелкой воды. – Л.: Гидрометеоздат, 1968. – 300 с.
16. *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.
17. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейная динамика волн цунами. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
18. *Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е.* Сейсмичность Черноморской впадины // Геофизический журнал. – 1991. – № 3. – С. 14 – 19.
19. *Доценко С.Ф.* Влияние остаточных смещений дна океана на эффективность генерации направленных волн цунами // Изв. РАН. ФАО. – 1995. – 31, № 4. – С. 570 – 576.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: sf_dotsenko@mail.ru

Материал поступил
в редакцию 03.02.12

АНОТАЦІЯ Виконаний чисельний аналіз еволюції цунамі в басейні Чорного моря. Розрахунки проведені на сітці з кроком 500 м для 9 еліптичних зон генерації, розташованих у районах підвищеної сейсмічної активності. Показано, що положення осередку цунамі істотно впливає на розподіл висот хвиль уздовж морського побережжя. Як правило, найбільш інтенсивні хвилі формуються на найближчій до зони генерації ділянці берега. В той же час відмічені випадки, коли найбільш інтенсивні коливання рівня моря не в найближчих до сейсмічного джерела пунктах побережжя, а на віддалених ділянках берега. У деяких прибережних пунктах екстремальні підйоми і пониження рівня моря можуть перевищувати за абсолютною величиною амплітуду початкового зсуву поверхні моря в осередку цунамі в 1,5 – 2 рази.

Ключові слова: Чорне море, цунамі, рівняння довгих хвиль, чисельне моделювання, амплітудні характеристики хвиль.

ABSTRACT Tsunami evolution in the Black Sea basin is numerically analyzed. The calculations are carried out on the grid with a 500m step for 9 elliptical generation zones located in the regions of heightened seismic activity. It is shown that distribution of waves' heights along the coast is strongly dependent on position of a tsunami source. As a rule, the most intensive waves are formed on the coast area nearest to the tsunami generation zone. At the same time, there are some cases when the most intensive sea level oscillations are observed on the remote parts of the coast but not on those closest to the seismic source. In some coastal points extreme rises and falls of sea level can exceed the initial displacement amplitude (the absolute value) of the sea surface in the tsunami source by 1.5 – 2 times.

Keywords: Black Sea, tsunami, equations of long waves, numerical modeling, amplitude characteristics of waves.