

Численный анализ распространения и усиления волн цунами на северо-западном шельфе Черного моря

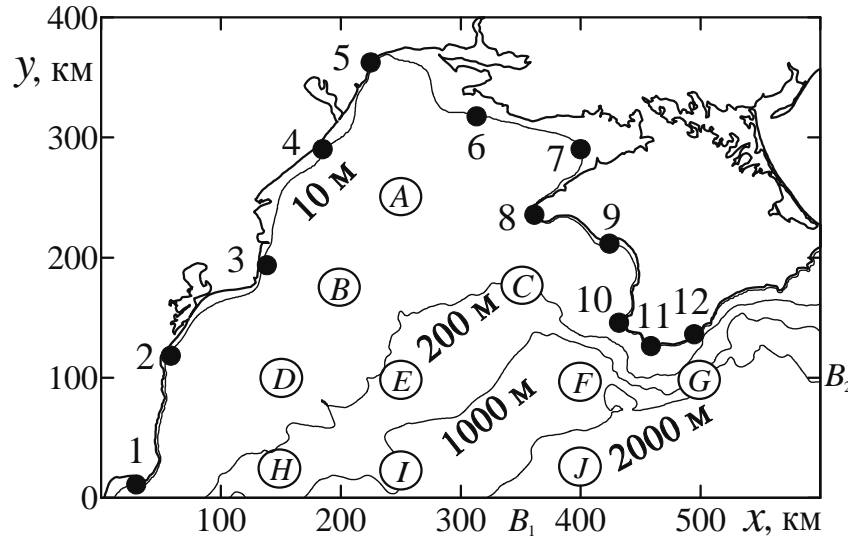
Выполнен численный анализ распространения длинных волн в северо-западной части Черного моря. Рассмотрено 10 возможных зон сейсмической генерации цунами. Расчеты выполнены на сетке с шагом 500 м. Показано, что положение очага цунами существенно влияет на распределение высот волн вдоль побережья. Как правило, наиболее интенсивные волны формируются у ближайшего участка берега. Землетрясения в Южнобережной сейсмической зоне не могут привести к цунамиопасности в западной части моря. Только сильные землетрясения в северо-западной части способны вызывать заметные колебания уровня Черного моря. Период цунами в районе Одессы составляет около 1 ч и зависит от магнитуды землетрясения, в районе Севастополя он в 2 – 3 раза меньше. В большинстве пунктов побережья экстремальные подъемы и понижения уровня моря не превышают по абсолютной величине начального смещения поверхности моря в очаге цунами. Для отдельных участков побережья Румынии и западного побережья Крыма наблюдается некоторое усиление волн, излученных из зон генерации, расположенных в более глубоководной части исследуемого района. С ростом магнитуды землетрясения усиление волн у берега становится более значительным.

Введение. Цунами – сравнительно редкое явление в Черном море. За последние две тысячи лет здесь отмечено только около 20 случаев аномальных колебаний уровня моря, которые можно отнести к явлению цунами сейсмогенной природы [1, 2]. Цунами наблюдались практически вдоль всего Черноморского побережья и вызывались землетрясениями в море и на суше. Для четырех событий прошлого века имеются инструментальные данные о колебаниях уровня моря во время цунами 1927 (два события), 1939 и 1966 гг. вдоль крымского и кавказского участков побережья моря. Обобщенные данные о них содержатся в работе [3].

В северо-западной части Черного моря цунами практически не наблюдались. Даже отголоски инструментально зарегистрированных событий здесь не зафиксированы. В значительной степени это обусловлено слабой сейсмичностью этой части Черноморской котловины [4]. Кроме этого, как показано в работе [5], сильный захват волн близлежащими к очагам цунами участками шельфа значительно ослабляет передачу волновой энергии из Крымской (Южнобережной) сейсмоактивной зоны в западную и северо-западную части моря.

Ниже изложены результаты численного анализа особенностей распространения и усиления волн цунами в северо-западной части моря. Для различных магнитуд событий рассмотрено излучение волн цунами из нескольких гипотетических круговых очагов генерации в этой части Черного моря. Использована нелинейная модель длинных волн с квадратичным по скорости донным трением. Расчеты выполнены на прямоугольной сетке с пространственными шагами 500 м. Численный анализ распространения цунами в бассейне Черного моря проводился также в работах [6 – 13].

Математическая модель эволюции цунами. Рассмотрим северо-западную часть Черного моря, показанную на рис. 1. Эта часть Черноморского бассейна (расчетная область) существенно отличается от других, благодаря широкой зоне с глубинами менее 200 м. Глубина бассейна задана на прямоугольной сетке с пространственными шагами 500 м. Расчетная область ограничена как твердой береговой границей, так и жидкими прямолинейными границами: зональной южной $B_1 = \{(x, y): 0 \leq x \leq 600 \text{ км}, y = 0\}$ и меридиональной восточной $B_2 = \{(x, y): x = 600 \text{ км}, 0 \leq y \leq 204 \text{ км}\}$.



Р и с. 1. Район исследования в Черном море (буквами *A, B, ..., J* помечены зоны генерации цунами для магнитуды $M = 7$, использованные в вычислительных экспериментах; цифрами отмечены пункты: 1 – Балчик, 2 – Констанца, 3 – Сулина, 4 – Цареградское Гирло, 5 – Одесса, 6 – Тендровская коса, 7 – Каркинитский залив, 8 – м. Тарханкут, 9 – Евпатория, 10 – Севастополь (Херсонесский маяк), 11 – м. Сарыч, 12 – Ялта)

Для описания процесса распространения пространственной волны цунами применена нелинейная эволюционная модель поверхностных длинных волн, учитывающая донное трение. Реакция жидкости на подводное землетрясение моделировалась начальным возмущением среды в виде смещения свободной поверхности жидкости при нулевом поле скорости.

Длинноволновые движения моря в рамках этой модели описываются системой трех уравнений:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{D} \right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

На твердой береговой границе задается условие непротекания (скольжения)

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = 0. \quad (4)$$

На восточной жидкой границе B_2 (рис. 1) расчетной области используется условие свободного выхода линейных волн

$$\frac{\partial U}{\partial t} + C \frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

на южной жидкой границе B_1 (рис. 1) оно задается в форме

$$\frac{\partial V}{\partial t} - C \frac{\partial V}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

Начальные условия задачи имеют вид

$$U = V = 0, \quad \zeta = \zeta_0(x, y) \quad (t = 0). \quad (7)$$

В задаче (1) – (7) переменные x, y – зональная и меридиональная координаты; t – время; $\mathbf{V} = (U, V)(x, y, t)$ – вектор полного горизонтального потока жидкости с проекциями U и V на оси x и y соответственно; $\zeta(x, y, t)$ – смещение поверхности жидкости от горизонтального положения; $\zeta_0(x, y)$ – начальное смещение свободной поверхности жидкости; $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t) > 0$ – полная (динамическая) глубина жидкости, учитывающая конечные смещения уровня моря; \mathbf{n} – внутренняя нормаль к границе расчетной области; $C = \sqrt{gH(x, y)}$ – локальная скорость распространения длинных волн; g – ускорение свободного падения; $k = 0,013$ – параметр Маннинга.

Задача (1) – (7) решалась методом конечных разностей на прямоугольной сетке типа C с пространственными шагами $\Delta x = \Delta y = 500$ м (число узлов 1201×801). На границе расчетной области глубина бассейна $H = 5$ м. Применена явно-неявная одношаговая по времени схема [14]. По результатам вычислительных экспериментов шаг интегрирования по времени $\Delta t = 1$ с.

Начальное смещение свободной поверхности, вызванное подводным землетрясением, задавалось сосредоточенным в круговой области радиуса R . Он определялся через большую L и малую W оси эллиптического очага цунами по формуле $R = \sqrt{LW} / 2$ (эквивалентный круговой очаг). Для нахождения длин осей эллипса L и W использованы эмпирические зависимости от магнитуды землетрясения M , предложенные в работе [15] на основе анализа данных для Евразийского региона:

$$L = W, \quad \lg L = 0,24M - 0,16 \quad (M < 6,5),$$

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

L и W задаются в километрах.

Максимальное смещение поверхности моря a_0 (в метрах) в зоне подводного землетрясения находилось по эмпирической формуле [16]

$$\lg a_0 = 0,8M - 5,6 \quad (6,7 \leq M \leq 8,5),$$

полученной по данным о ряде цунамигенных землетрясений в Тихом океане.

Начальное возмущение свободной поверхности моря в круговой области бассейна радиуса R с центром в точке (x_0, y_0) моделировалось гладким смещением

$$\zeta_0 = a_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R}\right) \quad (r \leq R), \quad \zeta_0 = 0 \quad (r > R),$$

где $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$.

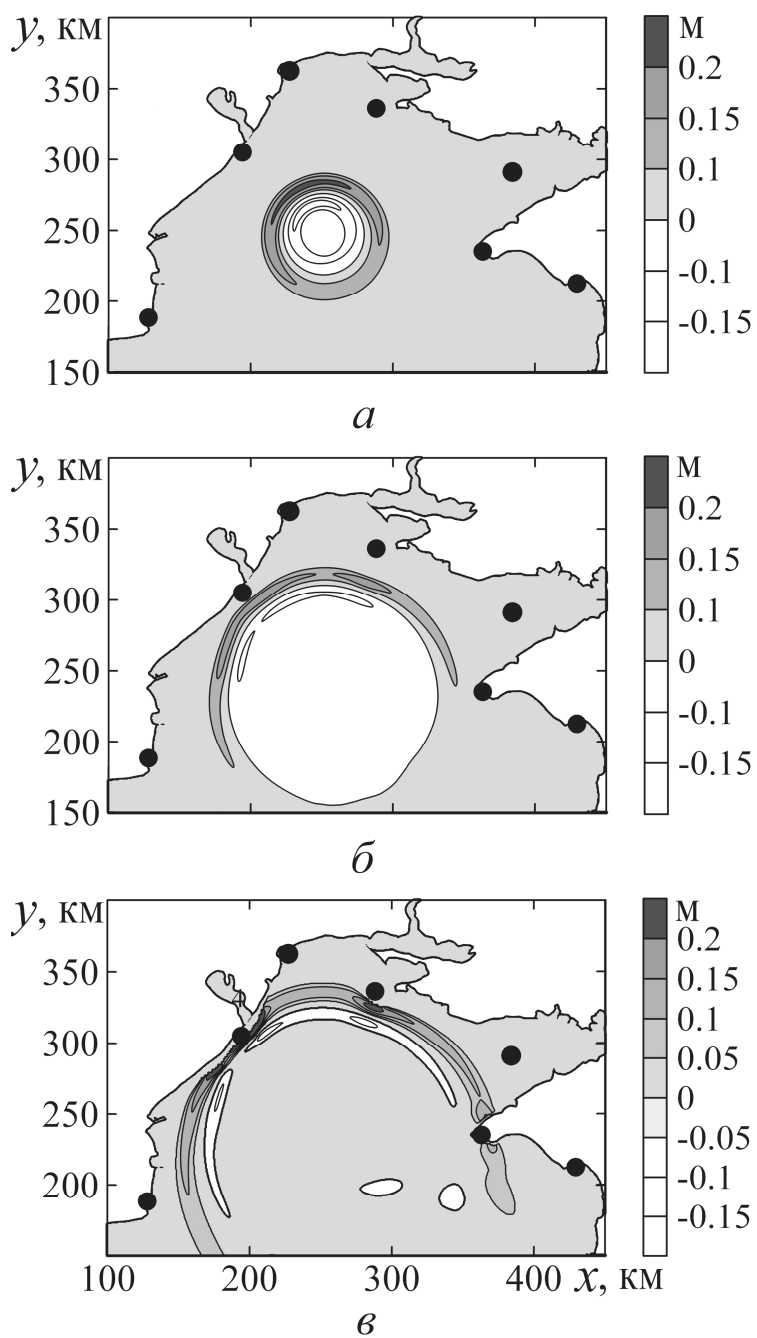
Результаты анализа волн цунами. Пространственная структура волн цунами существенно зависит от особенностей рельефа дна бассейна, положения и радиуса кругового очага цунами, интенсивности начального возмущения. Для линейной модели высоты волн цунами пропорциональны амплитуде a_0 начального смещения уровня моря, для нелинейной модели зависимость от a_0 является более сложной.

Численный анализ характеристик цунами выполнен для 10 возможных положений круговых очагов цунами A, B, \dots, J различной магнитуды в северо-западной части Черного моря (рис. 1). Характеристики волн анализировались в 12 точках бассейна, начиная с Болгарского побережья и заканчивая Южным берегом Крыма. Положение очага цунами A (глубина моря около 35 м) соответствует землетрясению 7 мая 2008 г. с магнитудой $M = 4,9$, очага G – цунамигенному землетрясению 11 сентября 1927 г. с магнитудой $M = 6,5$ [17].

Процесс распространения цунами в северо-западной части моря из очага A иллюстрирует рис. 2. Начальная стадия эволюционного процесса качественно такая же, как и в бассейне постоянной глубины [18]. При опускании центральной части начального поднятия свободной поверхности жидкости формируется знакопеременная кольцевая волна (рис. 2, *a*). В дальнейшем волна, излученная к югу в открытую часть моря, ослабевает за счет пространственной расходимости. Затухание этой волны происходит быстрее, чем для волн, распространяющихся в северном направлении.

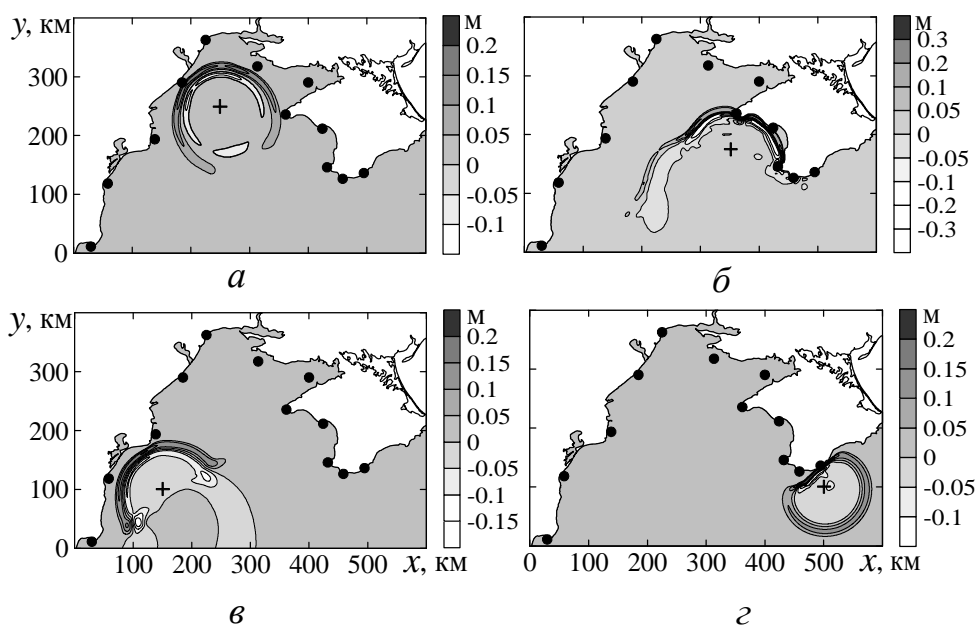
Глубина северо-западного шельфа медленно убывает по направлению к берегу, и по этой причине происходит некоторая концентрация энергии волн, распространяющихся к побережью (рис. 2, *б, в*). При подходе к берегу волны трансформируются в серповидные с наибольшими высотами в направлении Цареградского Гирла (пункт 4) и Тендровской косы (пункт 6). Однако в целом по результатам вычислительных экспериментов не отмечено усиление излученных из очага A волн цунами при подходе к берегу, что можно объяснить медленным и не очень значительным изменением глубины моря в этом

направлении. Очевидно преобладание ослабления волн за счет их пространственной расходимости.



Р и с. 2. Распространение волны цунами из зоны генерации А ($M = 7$): а – $t = 30$ мин, б – $t = 70$ мин, в – $t = 90$ мин (изолинии смещений уровня моря даны с интервалом 0,05 м)

Положение очага цунами на северо-западном шельфе существенно влияет на распределение высот волн вдоль побережья. Батиметрия этого района приводит к определенной направленности распространения доминирующих волн из рассматриваемых зон сейсмической генерации цунами. В соответствии с рис. 3 во всех представленных четырех случаях наиболее интенсивные волны локализируются в направлении ближайшего участка побережья северо-западной части Черного моря. В частности, для очага *C* волны наибольшей высоты распространяются в направлении Каламитского залива, как это отмечалось ранее в работе [5].

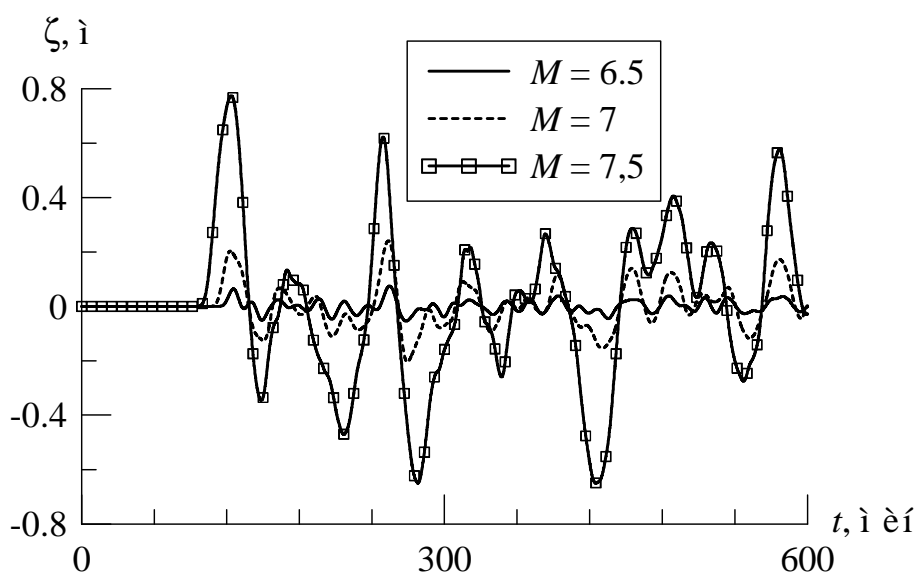


Р и с. 3. Пространственная структура волн цунами, распространяющихся из различных зон генерации: *a* – очаг *A*, $t = 70$ мин; *б* – очаг *C*, $t = 40$ мин; *в* – очаг *D*, $t = 50$ мин; *г* – очаг *G*, $t = 8$ мин (изолинии смещений поверхности моря даны с интервалом 0,05 м; центры круговых очагов цунами помечены крестиками; $M = 7$)

Здесь уместно отметить, что излученные из зоны генерации *G* волны практически не могут достичь западного и северо-западного участков побережья Черного моря. Основная причина – сильный захват волновой энергии шельфовой зоной Крымского п-ова (топографический захват волн). Поэтому подводные землетрясения в Южнобережной зоне повышенной сейсмической активности не могут вызвать интенсивные колебания уровня в западной части Черного моря. Именно это свойство волнового процесса позволяет объяснить отсутствие заметных аномалий в колебаниях уровня моря в районе

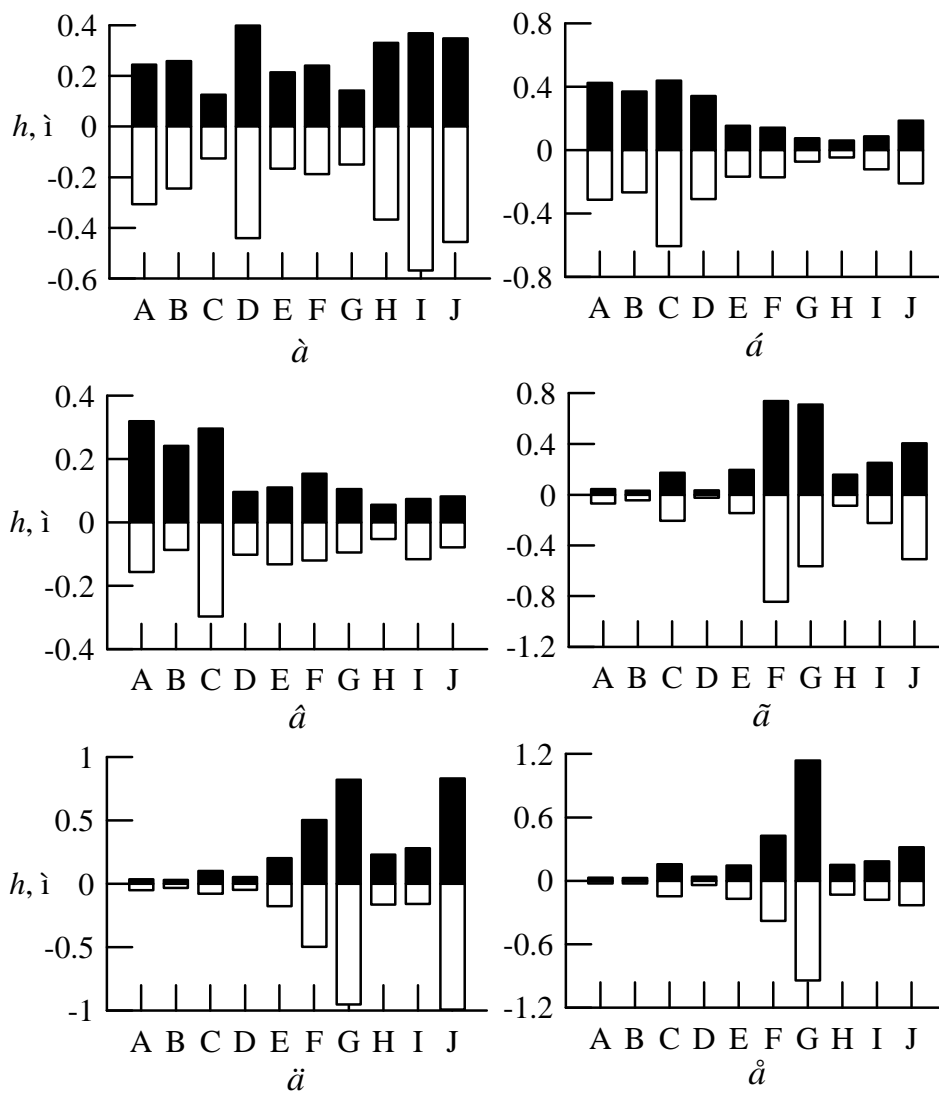
Одессы [1, 3, 17] при инструментально зарегистрированных вдоль крымского и кавказского участков побережья моря цунами 1927 г.

Вместе с тем подводные землетрясения в северо-западной части Черного моря могут вызывать колебания уровня у побережья, интенсивность которых зависит от магнитуды сейсмического события. На рис. 4 приведены рассчитанные колебания уровня моря в районе Одессы, вызванные землетрясением в очаге A . Очевидно, что только при сильных землетрясениях ($M \approx 7,5$) здесь могут возникать заметные волны сейсмического происхождения. Интенсивность колебаний уровня возрастает в 2 – 3 раза при увеличении магнитуды землетрясения M на 0,5. В силу мелководности региона период волн цунами составляет здесь около 1 ч и зависит от магнитуды подводного землетрясения. По полученным оценкам характерный период волн цунами в районе Севастополя в 2 – 3 раза меньше.



Р и с. 4. Колебания уровня моря в районе Одессы во время цунами при трех значениях магнитуды сейсмического источника A

Рассмотрим амплитудные характеристики волн цунами у северо-западного побережья Черного моря при землетрясениях с очагами A, B, \dots, J . Экстремальные подъемы и понижения уровня моря во время цунами (от различных сейсмических источников) в нескольких пунктах побережья представлены на рис. 5. В большинстве пунктов экстремальные значения ζ не превышают по абсолютной величине начального подъема поверхности моря a_0 . Некоторое усиление волн в 1,34 раза, по сравнению с начальным подъемом уровня $a_0 = 1$ м ($M = 7$), наблюдается на ближайших к очагам цунами пунктах Крымского побережья (рис. 5, e).



Р и с. 5. Экстремальные подъемы (■) и понижения (□) уровня моря в пунктах 2 (а), 4 (б), 6 (в), 10 (г), 11 (д) и 12 (е) за время 5 ч, вызванные цунами при землетрясениях с магнитудой $M = 7$ в очагах A, B, \dots, J

Выводы. Нелинейная модель длинных волн в полных потоках с учетом квадратичного по скорости течения донного трения применена для численного анализа на сетке с шагом 500 м особенностей эволюции волн цунами в северо-западной части Черного моря. Для магнитуд $M = 6,5; 7; 7,5$ землетрясений рассмотрено распространение цунами из 10 гипотетических круговых зон генерации.

Показано, что положение зон генерации цунами на северо-западном шельфе существенно влияет на распределение высот волн вдоль побережья. В большинстве случаев наиболее интенсивные волны формируются в направлении ближайшего участка береговой черты.

Волны цунами, генерируемые к югу от Крымского п-ова, практически не могут достичь западного и северо-западного участков Черноморского побережья. Это обусловлено захватом волн шельфовой зоной Крымского п-ова. Таким образом, землетрясения к югу от Крыма не создают повышенной цунамиопасности для западной части Черноморского бассейна. Это свойство волнового процесса объясняет отсутствие усиления колебаний уровня моря в районе Одессы во время цунами 1927 г.

Только сильные землетрясения ($M \approx 7,5$) на северо-западном шельфе Черного моря способны вызывать заметные колебания уровня моря. Интенсивность последних возрастает в 2 – 3 раза при увеличении магнитуды землетрясения M на 0,5. Период волн цунами в северной части шельфа (район Одессы) составляет около 1 ч и зависит от магнитуды подводного землетрясения. В районе Севастополя период волн цунами в 2 – 3 раза меньше.

Анализ амплитудных характеристик волн цунами вдоль северо-западного побережья Черного моря показал, что в большинстве пунктов экстремальные подъемы и понижения уровня моря не превышают по абсолютной величине заданного начального смещения морской поверхности в зоне подводного землетрясения. На отдельных участках побережья Румынии и западного побережья Крыма может происходить некоторое усиление волн, излученных из тех зон генерации, которые расположены в наиболее глубоководной части рассматриваемого района. С ростом магнитуды землетрясения коэффициент усиления волн (отношение максимального подъема уровня моря у берега к значению a_0) возрастает. В отдельных случаях увеличение магнитуды от 6,5 до 7,5 вызывает его рост на 60 – 70%.

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. и др. 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. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Сейсмичность Черноморской впадины // Геофизический журнал. – 1991. – № 3. – С. 14 – 19.
5. Доценко С.Ф. Особенности распространения цунами в северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 6. – С. 46 – 53.
6. Engel M. Hydrodynamisch-numerische ermittlung von bewegungsvorgängen im Schwarzen Meer // Mitteilungen des Instituts für Meereskunde der Universität Hamburg. – 1974. – № 22. – 72 s.
7. Доценко С.Ф., Коновалов А.В. Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование // Морской гидрофизический журнал. – 1995. – № 6. – С. 3 – 16.
8. 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.
9. 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.
10. Доценко С.Ф. Оценки параметров волн цунами вдоль южного побережья Крымского полуострова // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 3. – С. 3 – 10.

11. Куркин А.А. Нелинейная и нестационарная динамика длинных волн в прибрежной зоне. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2005. – 330 с.
12. Mazova R.Kh., Tresvyatskaya E.A. Numerical modeling of the generation of long waves by a dynamic seismic source and their propagation in the Black Sea // Russ. J. Earth Sci. – 2006. – 8, ES6003. – 22 p.
13. Доценко С.Ф., Ингеров А.В. Численное моделирование распространения и усиления волн цунами у Крымского полуострова и северо-восточного побережья Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 1. – С. 3 – 15.
14. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 300 с.
15. 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.
16. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
17. Григораши З.К. Черноморские цунами 1927 г. по мареографическим записям // Тр. МГИ АН СССР. – М.: АН СССР, 1959. – 17. – С. 59 – 67.
18. Доценко С.Ф., Сергеевский Б.Ю., Черкесов Л.В. Об эволюции осесимметричных возмущений жидкости // Морские гидрофизические исследования. – Севастополь: МГИ АН УССР. – 1978. – № 1. – С. 15 – 31.

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

Материал поступил
в редакцию 25.05.09

АНОТАЦІЯ Виконаний чисельний аналіз розповсюдження довгих хвиль у північно-західній частині Чорного моря. Розглянуто 10 можливих зон сейсмічної генерації цунамі. Розрахунки виконані на сітці з кроком 500 м. Показано, що положення осередку цунамі суттєво впливає на розподіл висот хвиль уздовж побережжя. Як правило, найінтенсивніші хвилі формуються близько найближчої ділянки берега. Землетруси в південнобережній сейсмічній зоні не можуть призвести до цунамонебезпеки в західній частині моря. Лише сильні землетруси в північно-західній частині здатні викликати помітні коливання рівня Чорного моря. Період цунамі в районі Одеси складає близько 1 години і залежить від магнітуди землетрусу, в районі Севастополя він в 2 – 3 рази менший. У більшості пунктів побережжя екстремальні підйоми і пониження рівня моря не перевищують за абсолютною величиною початкового зсуву поверхні моря в осередку цунамі. Для окремих ділянок побережжя Румунії і західного побережжя Криму спостерігається деяке посилення хвиль, які випромінюють із зон генерації, розташованих в більш глибоководній частині досліджуваного району. Із зростанням магнітуди землетрусу посилення хвиль біля берега стає значнішим.

ABSTRACT Numerical analysis of long wave propagation in the Black Sea northwestern part is carried out. Ten possible zones of tsunami seismic generation are considered. The calculation are performed on the grid with a step 500 m. It is shown that location of tsunami source effects essentially the distribution of waves' heights along the coast. As a rule, the most intensive waves are formed in the part closest to the coast. Earthquakes in the South coast seismic zone can not result in tsunami threat in the western part of the sea. Only strong earthquakes in the Black Sea northwestern part can generate noticeable sea level oscillations. Tsunami period near Odessa is about one hour and it depends on the earthquake magnitude. In the Sevastopol region it is 2 – 3 times lower. In the majority of coastal points extreme rises and falls of the sea level do not exceed the absolute value of the initial sea surface elevation in the tsunami source. Some intensification of the waves generated in deeper regions of the area under study is possible in certain parts of the Romanian coast and the Crimean western coast. The wave intensification near the coast grows with the increase of the earthquake magnitude.