

УДК 550.345

С.Ф. Доценко

Оценки параметров волн цунами вдоль южного побережья Крымского полуострова

В рамках нелинейной модели длинных волн с пространственным разрешением 2,5 км даны оценки параметров цунами вдоль южного побережья Крымского п-ова на участке м. Херсонес – м. Меганом. Исследование проведено численно для четырех характерных положений эллиптических зон генерации в регионе и диапазона магнитуд 6,5 – 7,5. Изучена пространственная структура волн. Рассчитаны амплитуды и периоды колебаний уровня в 11 пунктах рассматриваемого участка побережья Черного моря.

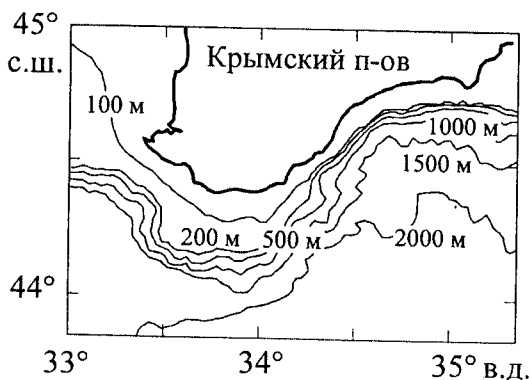
Введение. В настоящее время известно 22 волновых события в бассейне Черного моря, которые можно отнести к цунами [1 – 6]. Это явление наблюдалось вдоль всего побережья Черного моря и вызывалось землетрясениями с эпицентрами в море или на суше. Только в четырех случаях, произошедших в XX веке, получены инструментальные данные о волнах цунами вдоль побережья моря, обобщенные в работах [1, 7]. Оценки достоверности информации о черноморских цунами по шкале надежности, предложенной в статье [8], даны в [3].

Имеющийся весьма скромный объем данных наблюдений о цунами не позволяет полноценно изучить и описать процесс развития этого явления в бассейне Черного моря. В подобных случаях возникает необходимость в применении региональных численных моделей. Для анализа физических закономерностей распространения и трансформации волн цунами в Черном море реализовано три типа численных прогностических моделей, а именно лучевая (рефракционная) [1, 9], одномерная [10] и двухмерная [6, 11 – 13] конечно-разностные модели эволюции волн в открытой части и шельфовой зоне моря.

Ниже излагаются результаты численного моделирования распространения цунами в области Черного моря, примыкающей к южному побережью Крымского п-ова. Такая локальная модель позволяет более детально, чем ранее, рассмотреть характеристики волн цунами у побережья. Для задания параметров сейсмического возмущения моря использованы эмпирические соотношения, полученные для Евразийского и Тихоокеанского регионов. Выполнен анализ пространственной структуры и элементов длинных волн на шельфе для различных магнитуд и положений зон сейсмической генерации цунами.

Математическая модель прогноза цунами. Для прогноза высот цунами у побережья воспользуемся нелинейной моделью длинных баротропных волн с параметризацией донного трения по квадратичному закону от горизонтальной скорости. В случае эволюционной задачи реакция жидкости на подводное землетрясение задается в виде начального возмущения и рассматривается его

© С.Ф. Доценко, 2005



Р и с. 1. Район исследования и батиметрия Черного моря в расчетной области

развитие во времени. Начальное возмущение — смещение свободной поверхности жидкости при нулевом поле скорости. Ниже рассматривается область Черного моря, примыкающая к южному побережью Крымского п-ова, показанная на рис. 1. Эта область включает открытую часть моря с глубинами около 2000 м, материковый склон с перепадом глубин от 2000 до 100 м и шельфовую зону с глубиной 100 м и менее. Граница расчетной области включает

как твердые (береговые), так и жидкие (свободные) участки.

Движение жидкости описывается системой трех уравнений [14]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{Ku\sqrt{u^2 + v^2}}{D}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{Kv\sqrt{u^2 + v^2}}{D}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Du)}{\partial x} + \frac{\partial(Dv)}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

с условием скольжения

$$(\mathbf{V}, \mathbf{n}) = 0 \quad (2)$$

на твердых береговых участках границы, условием свободного выхода волн

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} - C \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

из расчетной области через жидкие участки границы и начальными условиями

$$u = v = 0, \quad \zeta = \zeta_0(x, y)(t = 0). \quad (4)$$

Здесь x, y — зональная и меридиональная координаты; t — время; $\mathbf{V}(x, y, t) = (u, v)$ — горизонтальная скорость течения; $\zeta(x, y, t)$ — смещения уровня моря; \mathbf{n} — внутренняя нормаль; $\zeta_0(x, y)$ — начальное смещение уровня; $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t) > 0$ — полная глубина бассейна, учитывающая смещения уровня моря; $C = \sqrt{gD}$ — скорость распространения длинных волн; g — ускорение свободного падения; $K = 2,6 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент трения.

В исследованиях по проблеме цунами реальные очаги генерации волн при подводных землетрясениях аппроксимируются эллипсами с большой и малой осями L и W соответственно [15]. Длины осей и максимальное смещение уровня моря a_0 зависят от магнитуды подводного землетрясения M . В работе [16] путем обобщения большого объема сейсмологических данных о

реальных очагах землетрясений предложены приближенные зависимости L и W от магнитуды для Евразийского региона. Они имеют следующий вид:

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

Величины L и W задаются в километрах. При малых магнитудах зоны генерации цунами являются круговыми, при $M > 6,5$ — эллиптическими. Для задания максимального смещения поверхности моря при землетрясении можно применить эмпирическую зависимость

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

полученную для диапазона магнитуд $6,7 \leq M \leq 8,5$ в работе [17] с использованием данных о 28 подводных цунамигенных землетрясениях Тихоокеанского региона. В (6) смещение a_0 задается в метрах.

Найденные по формулам (5) и (6) параметры начального возмущения уровня моря для различных значений магнитуды подводного землетрясения даны в таблице.

Параметры начального смещения уровня моря при различных магнитудах землетрясения

M	L , км	W , км	a_0 , м
6,0	19,0	19,0	0,16
6,5	25,1	25,1	0,40
7,0	50,1	29,5	1,00
7,5	100,0	35,1	2,51
8,0	199,5	41,7	6,31

Начальное смещение уровня моря $\zeta_0(x, y)$ в (4), локализованное в эллиптической области поверхности моря (очаг цунами) с центром в точке (x_0, y_0) , задавалось по формуле

$$\zeta_0(x, y) = a_0 \begin{cases} \cos^2(\pi r / 2), & r \leq 1, \\ 0, & r \geq 1, \end{cases} \quad r = 2 \sqrt{\frac{x_1^2}{L^2} + \frac{y_1^2}{W^2}}, \quad (7)$$

где $x_1 = (x - x_0) \cos \alpha + (y - y_0) \sin \alpha$, $y_1 = (y - y_0) \cos \alpha - (x - x_0) \sin \alpha$, α — угол поворота большой оси эллипса относительно оси x против часовой стрелки.

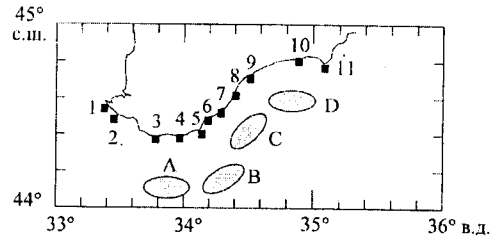
Задача (1) – (4) решалась методом конечных разностей на квадратной сетке C с пространственным шагом 2,5 км, соответствующим заданию батиметрии бассейна. Применена явно-неявная одношаговая по времени схема [14, 18] с временным шагом 2 с.

Результаты численного анализа волн цунами. Пространственная структура волн цунами существенно зависит от особенностей рельефа дна бассейна, положения и длин осей L , W очага цунами, вертикальных подвижек дна и ориентации (угла поворота α) большой оси эллиптической области смещений дна. На мелководье также проявляется зависимость

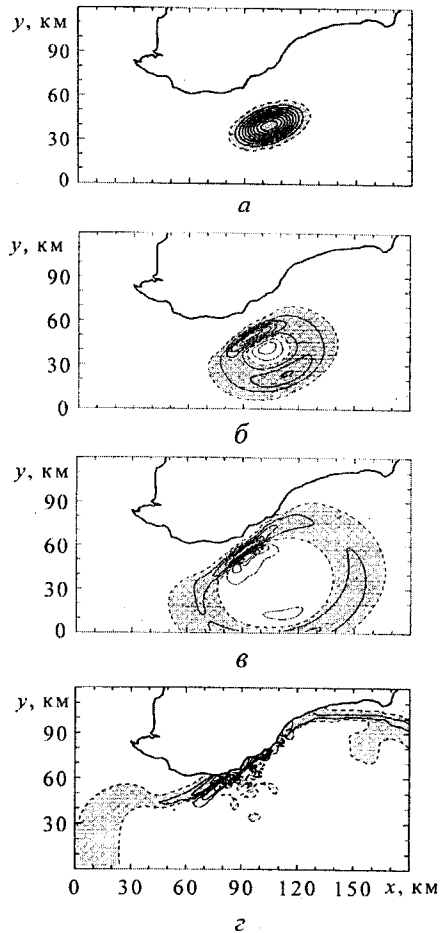
параметров нелинейной волны цунами от амплитуды a_0 начального смещения уровня моря.

Численный анализ характеристик цунами выполнен для четырех потенциально возможных очагов цунами *A*, *B*, *C* и *D* в расчетной области, показанных на рис. 2. Они расположены в Южнобережной сейсмоактивной зоне Черноморского региона, которая характеризуется наибольшим выделением энергии в верхнем 15-километровом слое литосферы и значительным вкладом землетрясений с магнитудой от $M=5$ до $M=8$ [19, 20]. Кроме этого, очаг *B* соответствует зоне сейсмической генерации инструментально зарегистрированного цунами 26 июня 1927 г., очаг *C* — цунами 12 сентября 1927 г. Большие оси эллиптических очагов цунами ориентированы вдоль изобат.

Типичный процесс распространения начального возмущения уровня Черного моря показан на рис. 3. Начальная стадия эволюционного процесса качественно такая же, как и в бассейне постоянной глубины [21]. При опускании начального поднятия поверхности моря образуются две направленные волны серповидной формы, распространяющиеся в противоположных направлениях по нормали к продольной оси зоны генерации (рис. 3, б). Волна, излученная в открытую часть бассейна, выходит через глубоководные участки открытой границы и в последующем не оказывает влияния на волновую динамику моря в расчетной области. Волна, распространяющаяся к береговой черте, усиливается по мере распространения к берегу и подвержена значительной топографической трансформации в шельфовой зоне. Это проявляется в преобразовании серповидного гребня волны в прямолинейный, росте высоты и уменьшении ширины (длины) волны (рис. 3, в, г). При отражении волны от берега

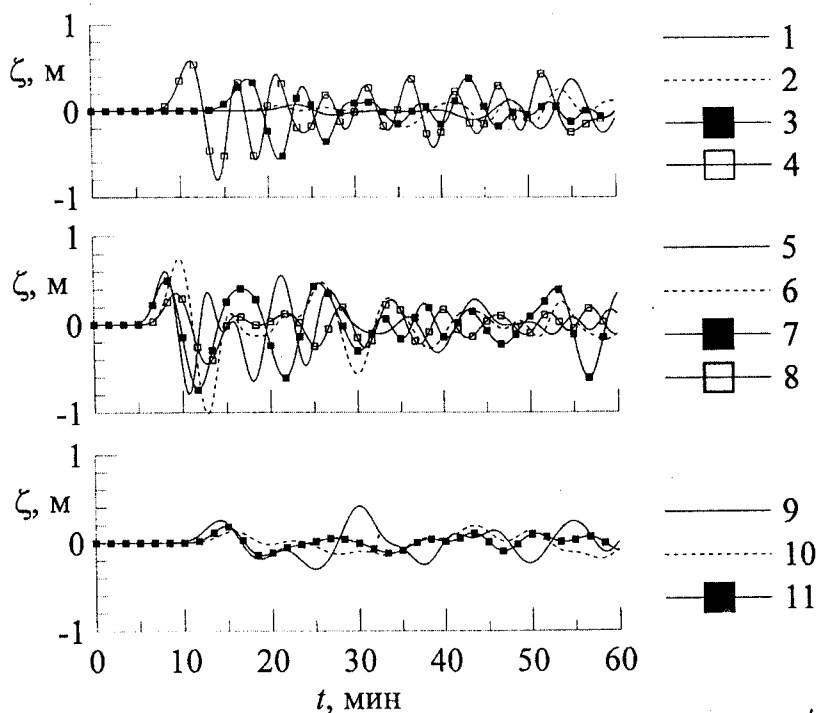


Р и с. 2. Положения эллиптических зон сейсмической генерации цунами и пункты вдоль морского побережья, в которых оценивались характеристики длинных волн: 1 — м. Херсонес, 2 — м. Фиолент, 3 — м. Сарыч, 4 — Алупка, 5 — м. Айтодор, 6 — Ялта, 7 — Гурзуф, 8 — Алушта, 9 — м. Башенный, 10 — Новый Свет, 11 — м. Меганом



Р и с. 3. Пространственная структура волны цунами, излученной из зоны генерации *B* при магнитуде землетрясения $M=7,0$: а — $t=0$, б — $t=2$ мин, в — $t=5$ мин, г — $t=12$ мин (изолинии волновых возмущений уровня моря даны с интервалом 0,1 м; на штриховых кривых $\zeta=0$; заштрихованные области — подъемы уровня моря)

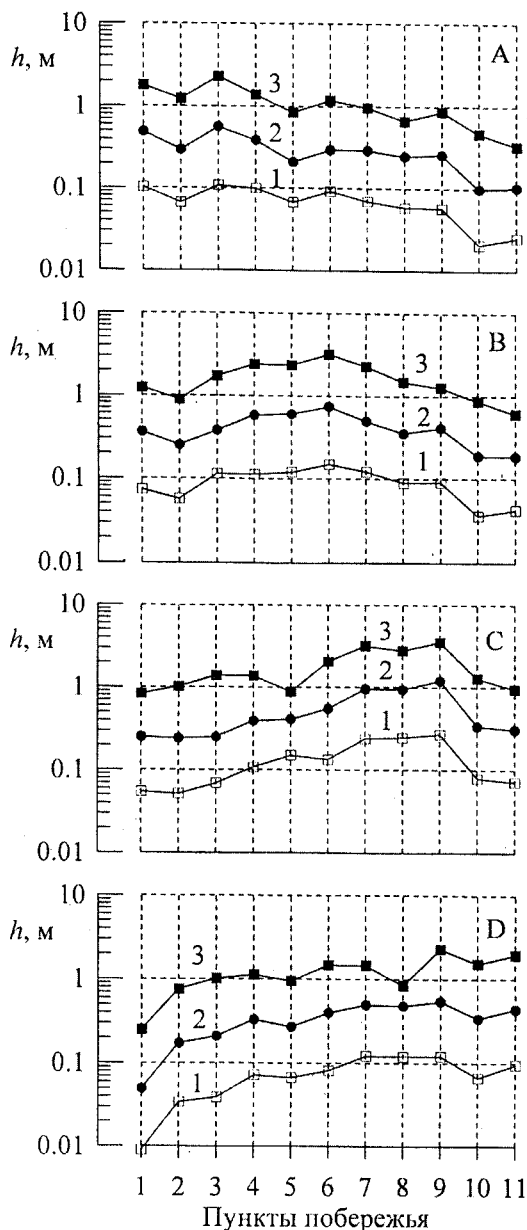
образуются захваченные шельфом знакопеременные волны, распространяющиеся вдоль берега в противоположных направлениях от зоны наката на боковую границу (рис. 3, *г*). Это свойство волн описано в работе [22] при численном анализе распространения начального возмущения в бассейне с цилиндрической батиметрией, воспроизводящей открытую часть Черного моря, шельф и разделяющий их материковый склон.



Р и с. 4. Колебания уровня моря в пунктах 1 – 11 южного побережья Крымского п-ова в случае очага цунами В (рис. 2) с магнитудой $M = 7,0$

С целью анализа колебаний уровня моря у побережья, вызванных прохождением цунами, для всех зон генерации *A – D* были рассчитаны мареограммы в прибрежных пунктах 1 – 11, географическое положение которых показано на рис. 2. Соответствующие временные ряды для магнитуды землетрясения $M = 7,0$ приведены на рис. 4.

По результатам расчетов подъема и понижения уровня моря в шельфовой зоне моря не превышают по абсолютной величине высоту начального поднятия уровня моря a_0 . При магнитуде землетрясения $M = 7,0$ время распространения цунами из четырех рассмотренных зон генерации до пунктов 1 – 11 побережья (время прихода гребня головной волны) составляет 4,5 – 31,9 мин, а периоды колебаний уровня находятся в диапазоне 10 – 15 мин. Как правило, первые из пришедших к берегу волн имеют максимальные высоты (возвышение гребня волны над подошвой).



Р и с. 5. Максимальные подъемы уровня моря h в пунктах 1 – 11 побережья, вызванные волнами цунами, излученными из зон генерации $A - D$ (для кривых 1, 2 и 3 магнитуда землетрясения равна 6,5; 7,0 и 7,5 соответственно)

Пространственное разрешение модели 2,5 км. Расчетная область ограничена как твердыми, так и открытыми границами.

Для задания размеров зон сейсмической генерации цунами и смещений дна использованы эмпирические зависимости от магнитуды для Евразийско-

При фиксированных положении и ориентации продольной оси очага цунами характеристики волн у берега зависят от магнитуды подводного землетрясения. При задании параметров сейсмического возмущения моря по формулам (5) и (6) для всех очагов цунами $A - D$ происходит монотонное увеличение высот головных волн h с ростом магнитуды землетрясения M (рис. 5). Максимальные высоты волн наблюдаются на ближайших к зонам генерации участках берега. При магнитудах землетрясения $M = 6,5; 7,0$ и $7,5$ высоты волн на ближайших к зонам генерации участках побережья достигают соответственно 0,27; 1,21 и 3,58 м. С большой степенью уверенности можно говорить о возникновении реальной цунамиопасности для прибрежной зоны южного побережья Крымского п-ова при подводных землетрясениях с магнитудами $M = 7,0$ и более.

Выводы. Выполнен численный анализ цунамиопасности южного побережья Крымского п-ова на участке м. Херсонес – м. Меганом. Применена конечно-разностная модель прогноза нелинейных длинных волн с параметризацией донного трения по квадратичному закону от горизонтальной скорости.

го и Тихоокеанского регионов. Анализ колебаний уровня моря во время цунами выполнен для 11 пунктов побережья, магнитуд подводных землетрясений 6,5 – 7,5 и четырех положений сейсмических источников в Южнобережной сейсмоактивной зоне. Два положения источника соответствуют историческим цунами 1927 г.

Показано, что при подводном землетрясении формируется направленная к берегу волна цунами. На южном шельфе Крымского п-ова она усиливается, а при отражении от берега трансформируется в две захваченные шельфом интенсивные волны, распространяющиеся в противоположных направлениях от зоны наката. Распределение максимальных высот цунами вдоль южного побережья Крыма зависит от положения эпицентра и магнитуды землетрясения. Волны наибольшей высоты формируются на ближайшем к зоне землетрясения участке черноморского шельфа.

С ростом магнитуды сейсмического источника интенсивность цунами возрастает во всех точках побережья. При магнитудах $M = 7,0$ и $7,5$ высоты волн на ближайших к зонам генерации участках побережья достигают соответственно 1,2 и 3,6 м. При магнитуде 7,0 время прихода гребня головной волны цунами из четырех выбранных зон генерации до всех точек рассматриваемого участка побережья составляет 4,5 – 31,9 мин, периоды колебаний уровня находятся в диапазоне 10 – 15 мин. Как правило, при подходе к берегу максимальную высоту имеет одна из первых волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доценко С.Ф. Черноморские цунами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 1994. — 30, № 4. — С. 513 – 519.
2. Rangelov B. Tsunami vulnerability modelling for the Bulgarian Black Sea // Wat. Sci. Tech. — 1995. — 32, № 7. — P. 47 – 53.
3. Никонов А.А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Изв. РАН. Физика Земли. — 1997. — № 1. — С. 86 – 96.
4. Altinok Y. Tsunamis along the coasts of the Black Sea // Book of Abstracts, 2nd Balkan Geophys. Congr. and Exhibition., Istanbul, 5 – 9 July, 1999. — P. 46 – 47.
5. Pelinovsky E. Preliminary estimates of tsunami danger for the northern part of the Black Sea // Phys. Chem. Earth. — 1999. — 24, № 2. — P. 175 – 178.
6. Зайцев А.И., Козелков А.С., Куркин А.А., и др. Моделирование цунами в Черном море // Известия Академии инженерных наук РФ. — Прикладная математика и механика. — М., Н. Новгород: НГТУ, 2002. — 3. — С. 27 – 45.
7. Фомичева Л.А., Рабинович А.Б., Демидов А.Н. Цунами в Черном море // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические исследования. — СПб.: Гидрометеиздат, 1991. — С. 352 – 354.
8. Соловьев С.Л. Средиземноморские цунами и их сопоставление с тихоокеанскими цунами // Изв. РАН. Физика Земли. — 1989. — № 11. — С. 3 – 17.
9. Rangelov B., Gospodinov D. Tsunami energy distribution according to the Black Sea Geometry // Proc. XXIV Gen. Ass. ESC., 19 – 24 Sept. 1994, Athens. — 1994. — 3. — P. 1808 – 1813.
10. Доценко С.Ф. Связь интенсивности цунами в Черном море с магнитудой подводного землетрясения // Морской гидрофизический журнал. — 1999. — № 5. — С. 12 – 22.
11. Engel M. Hydrodynamisch – numerische ermittlung von bewegungsvorgängen im Schwarzen Meer // Mitteilungen des Instituts für Meereskunde der Universität Hamburg. — 1974. — № 22. — 72 s.
12. Доценко С.Ф., Коновалов А.В. Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование // Морской гидрофизический журнал. — 1995. — № 6. — С. 3 – 16.

13. Селезов И.Т., Островерх Б.Н. Моделирование сейсмических подводных очагов, генерирования и трансформации волн цунами в сейсмоактивных районах // Там же. — 1996. — № 1. — С. 66 – 77.
14. Вольцингер Н. Е., Пясковский Р. В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 300 с.
15. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны цунами. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 447 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. Марчук Ан.Г., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Численное моделирование волн цунами. — Новосибирск: Наука, 1983. — 175 с.
19. Чекунов А.В. Сейсмическая эмиссия и разноэтажная тектоника в Черноморском регионе // Докл. АН УССР. — Сер. Б. — 1990. — № 11. — С. 27 – 31.
20. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Сейсмичность Черноморской впадины // Геофизический журнал. — 1991. — № 3. — С. 14 – 19.
21. Доценко С.Ф. Влияние остаточных смещений дна океана на эффективность генерации направленных волн цунами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 1995. — 31, № 4. — С. 570 – 576.
22. Доценко С.Ф. Закономерности распространения цунами на шельфе Черного моря из эллиптической зоны генерации // Морской гидрофизический журнал. — 2000. — № 6. — С. 18 – 27.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 08.12.03

ABSTRACT The estimates of tsunami parameters along the southern coast of the Crimean peninsular from the cape Khersones to the cape Meganom are found within the framework of a non-linear shallow-water model with the space resolution 2,5 km. Four typical locations of tsunami elliptical generation zones in the region (the magnitude range is 6,5 – 7,5) are studied numerically. Spatial structure of waves is investigated. The amplitudes and the periods of level oscillations are calculated for 11 points along the considered part of the Black Sea shoreline.