

# Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 550.345

С.Ф. Доценко

## Особенности распространения цунами в северо-западной части Черного моря

Выполнен численный анализ распространения цунами в Черном море из зон сейсмической генерации, расположенных к югу от Крыма и в северо-западной части моря. Показано, что цунами, вызванные землетрясениями в Крымской сейсмоактивной зоне, захватываются близлежащим участком шельфа и не вызывают ощутимых колебаний уровня в северо-западной части моря. Это позволяет объяснить отсутствие проявлений цунами 1927, 1939 и 1966 гг. в районе Одессы. Волны цунами при землетрясениях в северо-западной части моря характеризуются направленностью распространения. Высота волны максимальна на участках, соответствующих северному и восточному направлениям распространения. Поэтому северное побережье моря и Каламитский залив (Крымский п-ов) обладают повышенной цунамиопасностью при землетрясениях в северо-западной части Черного моря.

**Введение.** За последние два тысячелетия в Черном море отмечено более двадцати случаев аномальных колебаний уровня моря, которые можно отнести к явлению цунами [1 – 3]. Оно наблюдалось практически вдоль всего побережья Черного моря и вызывалось землетрясениями в море и на суше. Для четырех событий XX века получены инструментальные данные о параметрах волн цунами вдоль побережья моря, обобщенные в работах [4, 5].

В северо-западной части Черного моря цунами отмечались относительно редко, а отголоски инструментально зарегистрированных цунами здесь не зафиксированы. Для изучения слабых проявлений черноморских цунами в этом районе ниже выполнен численный анализ распространения длинных волн в северо-западной части Черного моря. Рассмотрены волны, излученные из удаленного и близкого очагов цунами эллиптической формы, расположенных соответственно к югу от Крымского п-ова и на свале глубин северо-западной части моря. Двумерное распространение волн в Черноморском бассейне ранее исследовалось в рамках линейных и нелинейных моделей в работах [2, 6, 7].

**Математическая модель прогноза цунами.** Для описания пространственной структуры цунами в бассейне Черного моря использовалась эволюционная модель длинных поверхностных волн. Поскольку рассматриваются районы моря с глубинами более 10 м, можно ограничиться линейным приближением. Реакция жидкости на подводное землетрясение моделировалась

© С.Ф. Доценко, 2005

начальным возмущением в виде смещения свободной поверхности жидкости при нулевом поле скорости.

Волновые движения моря в рамках линейной модели длинных волн описываются системой уравнений

$$U_t + gH\nabla\zeta = 0, \quad \zeta_t + \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

с условием скольжения

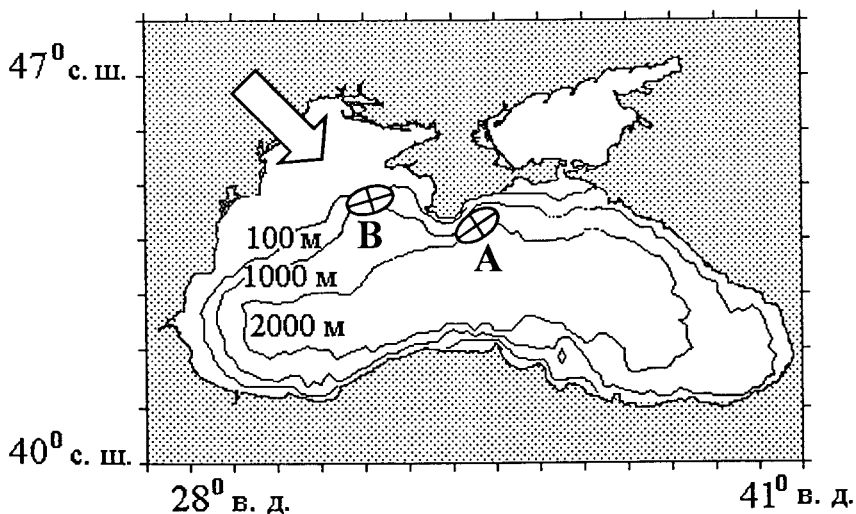
$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (2)$$

на береговой границе и начальными условиями

$$\mathbf{U} = 0, \quad \zeta = \zeta_0(x, y) \quad (t = 0). \quad (3)$$

Здесь  $x, y$  — зональная и меридиональная координаты;  $t$  время;  $\mathbf{U}(x, y, t)$  — полный горизонтальный поток жидкости;  $\zeta(x, y, t)$  — смещения уровня моря;  $\zeta_0(x, y)$  — начальное смещение уровня, вызванное подводным землетрясением;  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ ;  $\mathbf{n}$  — внутренняя нормаль к береговой черте моря;  $H(x, y)$  — глубина бассейна;  $g$  — ускорение свободного падения.

Задача (1) – (3) решалась методом конечных разностей на прямоугольной сетке типа  $C$  с пространственными шагами  $\Delta x = 9,2$  км и  $\Delta y = 9,1$  км, соответствующими заданию батиметрии бассейна. Применена явно-неявная одношаговая по времени схема [8] с шагом  $\Delta t = 2$  с. Хотя модель реализована для всего Черного моря, в настоящей работе основное внимание уделено его северо-западной части (рис. 1). Эта область существенно отличается от других районов моря благодаря существованию обширного шельфа с глубинами менее 100 м, что теоретически создает благоприятные условия для усиления цунами при распространении к берегу.



Р и с. 1. Бассейн Черного моря. Стрелка указывает на район исследования. Буквами А и В помечены эллиптические зоны генерации цунами, использованные в вычислительных экспериментах

В исследованиях по проблеме цунами реальные зоны генерации аппроксимируются эллипсами [9]. Эмпирические зависимости для большой  $L$  и малой  $W$  осей очага цунами, а также для максимального смещения уровня моря  $a_0$  в зоне генерации волн от магнитуды подводного землетрясения  $M$  предложены в работах [10, 11]. При малых магнитудах  $M \leq 6,5$  очаги цунами являются круговыми, при  $M > 6,5$  — эллиптическими [10]. Модельное начальное смещение уровня моря  $\zeta_0(x, y)$  в эллиптической области с центром в точке  $(x_0, y_0)$  задавалось по формуле

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

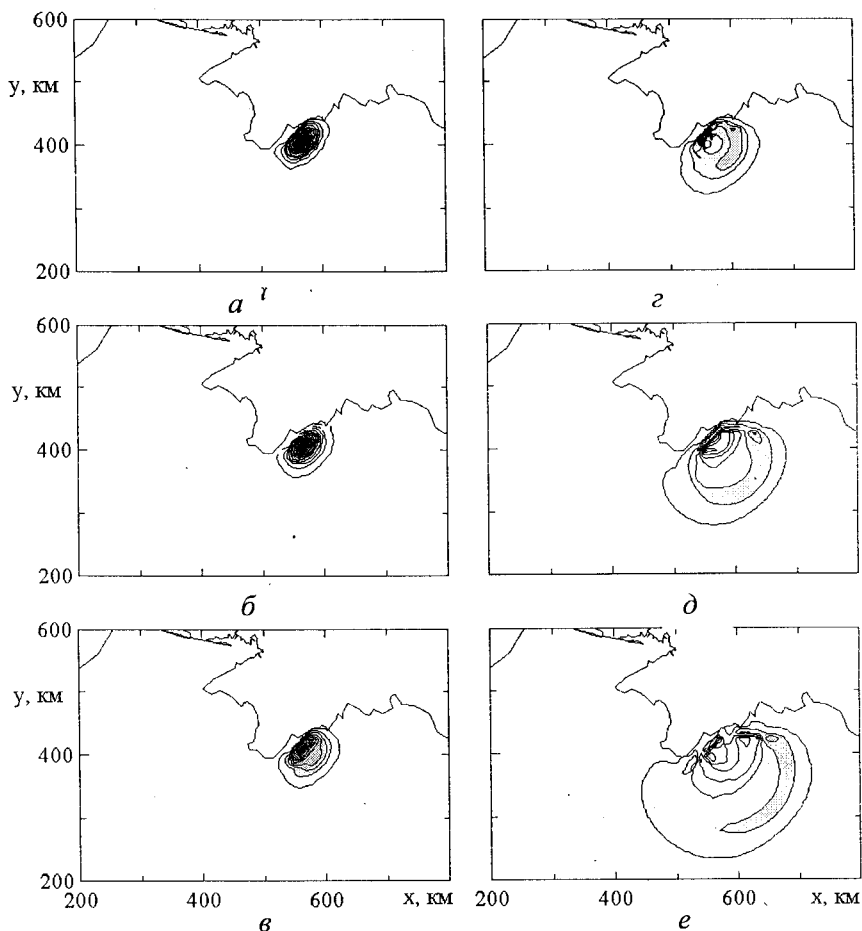
где  $x_1 = (x - x_0)\cos\alpha + (y - y_0)\sin\alpha$ ;  $y_1 = (y - y_0)\cos\alpha - (x - x_0)\sin\alpha$ ;  $\alpha$  — угол поворота большой оси эллипса относительно оси  $x$  против часовой стрелки.

**Результаты численного анализа волн цунами.** Пространственная структура волн цунами существенно зависит от особенностей рельефа дна бассейна, геометрических характеристик очага цунами и ориентации (угла поворота  $\alpha$ ) его большой оси. Для линейной модели высоты волн пропорциональны амплитуде  $a_0$  начального смещения уровня моря.

Численный анализ характеристик цунами выполнен для двух потенциально возможных очагов цунами  $A$  и  $B$  в Черном море, показанных на рис. 1. Очаг цунами  $A$  расположен в Южнобережной сейсмоактивной зоне Черноморского региона [12]. Он соответствует области сейсмической генерации инструментально зарегистрированного цунами 12 сентября 1927 г. [13], второй очаг ( $B$ ) — району двух наиболее сильных подводных землетрясений последнего времени в западной части Черного моря ( $M = 6,0$ ), произошедших в 1945 и 1951 гг. [12]. Длины осей эллиптической зоны генерации были приняты равными  $L = 100$  км и  $W = 60$  км, начальное смещение уровня моря —  $a_0 = 2$  м. Большие оси очагов были ориентированы вдоль изобат ( $\alpha = 45^\circ$  для очага  $A$  и  $\alpha = 10^\circ$  для очага  $B$ ). Эмпирические формулы из [10, 11] при  $M = 7,5$  дают следующие значения параметров сейсмического возмущения моря:  $L = 100$  км,  $W = 35$  км,  $a_0 = 2,51$  м. Использование в вычислительных экспериментах завышенной ширины  $W$  зоны генерации обусловлено необходимостью увеличения числа узлов сетки в поперечном очагу цунами направлении.

Процесс распространения цунами в Черном море из зоны  $A$  показан на рис. 2. Начальная стадия эволюционного процесса качественно такая же, как и в бассейне постоянной глубины [14]. При опускании начального поднятия уровня моря образуются две направленные волны серповидной формы, распространяющиеся в противоположных направлениях по нормали к продольной оси зоны генерации (рис. 2, *а*). Волна, излученная в открытую часть бассейна, является более слабой и характеризуется восточным направлением распространения. Распространяющаяся к береговой черте волна усиливается у берега, она подвержена значительной топографической трансформации в шельфовой зоне. Это проявляется в преобразовании серповидного гребня волны в прямолинейный, росте высоты и уменьшении ширины (длины) волны (рис. 2, *б, в, д*). В результате отражения волны от берега образуются захва-

ченные шельфом знакопеременные волны, распространяющиеся вдоль берега в противоположных направлениях от зоны первоначального подхода волны цунами к берегу (рис. 2, е).



**Рис. 2.** Распространение волны цунами из зоны генерации  $A$ :  $a - t = 0$ ;  $b - t = 1$  мин;  $в - t = 2$  мин;  $г - t = 5$  мин;  $д - t = 10$  мин;  $е - t = 15$  мин. Изолинии смещений уровня моря даны с интервалом 0,2 м. Затемненные области — подъемы уровня моря ( $\zeta > 0$ )

Как следует из рис. 2, волны цунами наибольшей амплитуды распространяются вдоль берега Черного моря. Практически они не могут достичь северо-западного побережья. По этой причине возмущения уровня, сопутствующие подводным землетрясениям в Крымской сейсмоактивной зоне, не могут вызвать интенсивные колебания уровня в прибрежных пунктах западной части моря. Именно захват цунами шельфом Крымского п-ова позволяет объяснить отсутствие каких-либо заметных аномалий в колебаниях уровня моря в районе Одессы [1, 2, 4, 5, 13] при инструментально зарегистрированных вдоль Крымского и Кавказского побережий цунами 1927, 1939 и 1966 гг.

Процесс распространения цунами в Черном море из зоны *B* иллюстрирует рис. 3. При опускании начального поднятия уровня моря в эллиптической области образуются две направленные волны серповидной формы, распространяющиеся в противоположных направлениях по нормали к продольной оси зоны генерации (рис. 3, б, в). Волна, излученная в южном направлении, имеет малую амплитуду и ослабевает со временем. Волна, распространяющаяся к береговой черте, усиливается при выходе на обширный шельф северо-западной части моря. Наблюдается сильно выраженная направленность распространения волн наибольшей высоты на север и восток (Каламитский залив).

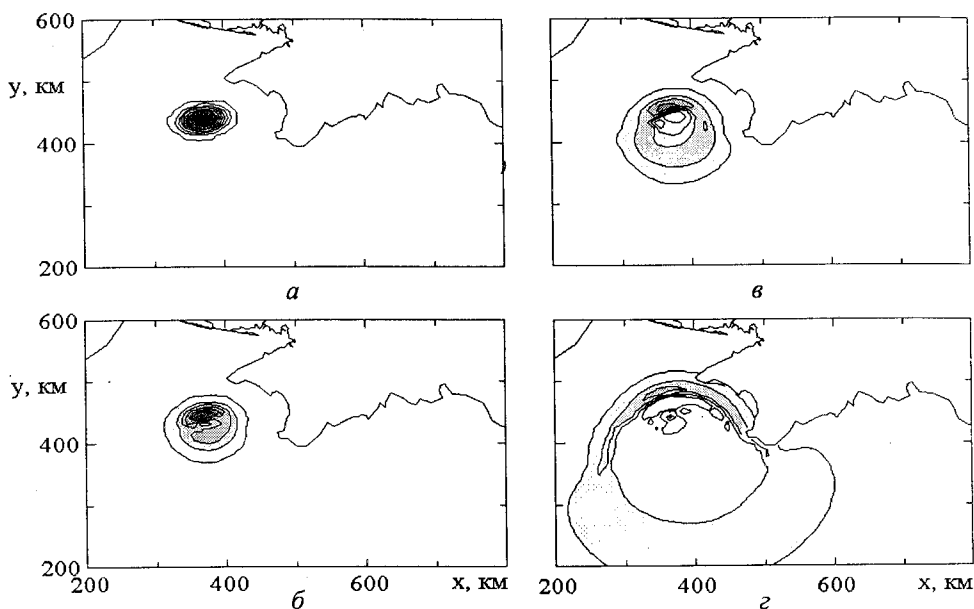
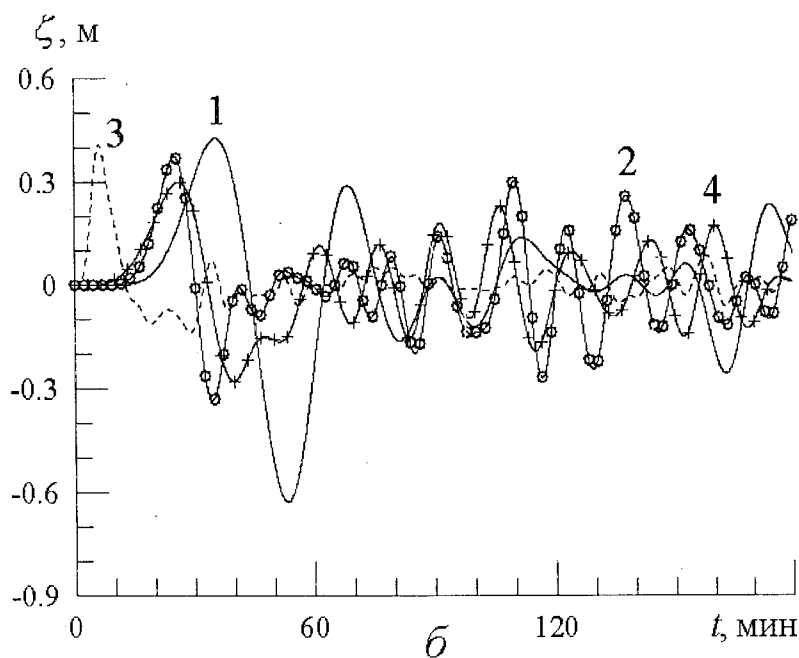
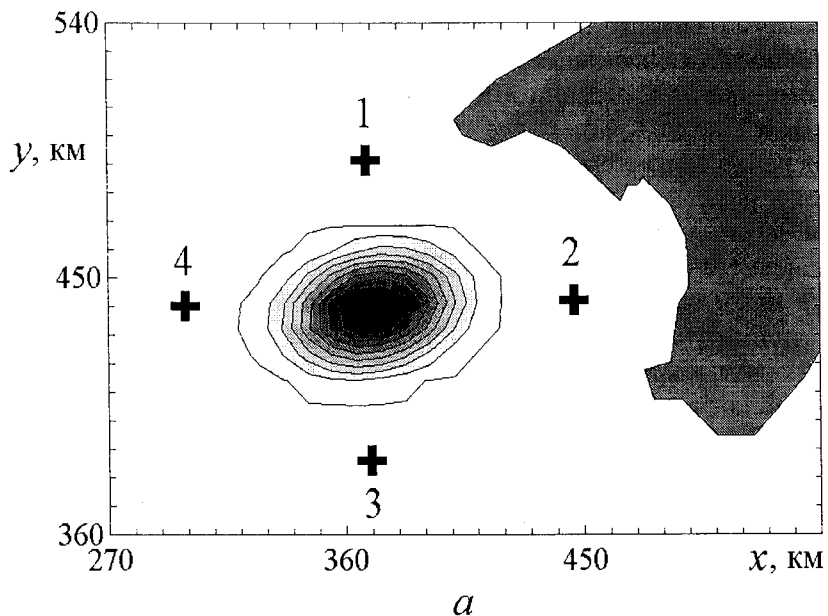


Рис. 3. Распространение волны цунами из зоны генерации *B*: а —  $t = 0$ ; б —  $t = 5$  мин; в —  $t = 10$  мин; г —  $t = 30$  мин. Изолинии смещений уровня моря даны с интервалом 0,2 м. Затемненные области — подъемы уровня моря ( $\zeta > 0$ )

Для анализа излучения волн цунами из очага в северо-западной части Черного моря были рассчитаны мареограммы для точек 1–4 вокруг начального смещения уровня моря (рис. 4, а). Рис. 4, б показывает, что волна цунами имеет наибольшую высоту в южном направлении (кривая 1). Волна, излученная в глубоководную часть бассейна (кривая 3), характеризуется интенсивной первой волной и последующими слабыми колебаниями уровня моря. Волны, излученные из зоны генерации в восточном и западном направлениях, имеют близкие характеристики (кривые 2 и 4), что объясняется зональной ориентацией изобат, то есть близкими условиями распространения волн. Длительность прохождения головной волны через фиксированную точку при распространении в глубоководную часть (кривая 3) составляет ~ 15 мин, в направлении берега (кривая 1) она существенно больше и достигает 40 мин,

длительность головной волны при распространении в зональном направлении (кривые 2 и 4) составляет 20 – 30 мин.



Р и с. 4. Точки 1 – 4 акватории моря вокруг начального возмущения уровня, в которых рассчитывались колебания свободной поверхности (а) и соответствующие им расчетные мареограммы (б)

По результатам вычислительных экспериментов волны цунами, излученные из зон сейсмической генерации в северо-западной части Черного моря, наиболее интенсивны вдоль северного участка побережья и у западного берега Крымского п-ова.

**Выводы.** Выполнен численный анализ распространения цунами из двух возможных очагов генерации в Черном море эллиптической формы, расположенных к югу от Крымского п-ова и в северо-западной части моря. Одна зона генерации соответствует Ялтинскому цунами 12 сентября 1927 г., вторая — району двух наиболее сильных подводных землетрясений последнего времени, зарегистрированных в западной части Черноморского бассейна.

Вычислительные эксперименты показали, что цунами, вызванные подводными землетрясениями в Крымской сейсмоактивной зоне, захватываются близлежащими участками шельфа и не могут привести к интенсивным колебаниям уровня у северо-западного побережья Черного моря. Это свойство длинных волн позволяет объяснить отсутствие аномальных колебаний уровня моря в районе Одессы при исторических цунами 1927, 1939 и 1966 гг., проявления которых измерены вдоль Крымского и Кавказского побережий.

С другой стороны, волна цунами, вызванная подводным землетрясением в северо-западной части моря, характеризуется направленностью распространения. Волна имеет наибольшую высоту на участках, распространяющихся в северном и восточном (Каламитский залив) направлениях. Можно ожидать, что именно эти районы обладают повышенной цунамиопасностью при подводных землетрясениях в северо-западной части Черноморской впадины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никонов А.А.* Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Известия РАН. Физика Земли. — 1997. — 33, № 1. — С. 86 – 96.
2. *Зайцев А.И., Козелков А.С., Куркин А.А. и др.* Моделирование цунами в Черном море // Известия Академии инженерных наук Российской Федерации. Прикладная математика и механика. — М.–Н. Новгород: НГТУ, 2002. — 3. — С. 27 – 45.
3. *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.
4. *Фомичева Л.А., Рабинович А.Б., Демидов А.Н.* Цунами в Черном море // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические исследования. — Л.: Гидрометеоздат, 1991. — С. 352 – 354.
5. *Доценко С.Ф.* Черноморские цунами // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 1994. — 30, № 4. — С. 513 – 519.
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. *Алексеев А.С., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.* Численное исследование генерации и распространения цунами при реальной топографии дна. Линейная модель // Изучение цунами в открытом океане. — М.: Наука, 1978. — С. 5 – 20.
9. *Мурти Т.С.* Сейсмические морские волны цунами. — Л.: Гидрометеоздат, 1981. — 447 с.

10. 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.
11. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. — Горький: ИПФ АН СССР, 1982. — 226 с.
12. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Сейсмичность Черноморской впадины // Геофизический журнал. — 1991. — № 3. — С. 14 – 19.
13. Григориш З.К. Черноморские цунами 1927 г. по мареографическим записям // Тр. МГИ АН СССР. — М.: АН СССР, 1959. — 17. — С. 59 – 67.
14. Доценко С.Ф. Влияние остаточных смещений дна океана на эффективность генерации направленных волн цунами // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 1995. — 31, № 4. — С. 570 – 576.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 20.09.04

ABSTRACT Tsunami propagation in the Black Sea from the seismic generation zones located to the south from the Crimea and in the northwest part of the sea is numerically analyzed. It is shown that earthquake-induced tsunamis in the Crimean seismic activity zone are trapped by the nearest part of the shelf and do not produce noticeable level oscillations in the northwest region of the sea. It permits to explain absence of tsunami manifestations in 1927, 1939 and 1963 near Odessa. Directivity of tsunami propagation is characteristic of the earthquakes in the northwest part of the sea. Tsunami height is maximum on the north and west directions of the wave propagation. For this reason the northern coast of the sea and the Kalamit bay of the Crimea are under the heightened tsunami threat if an earthquake occurs in the northwest part of the Black Sea.