

## Оценки амплитудных характеристик наката волн цунами на различных участках Черноморского побережья

А. Ю. Белоконь

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
e-mail: aleksa.44.33@gmail.com*

Поступила 15.01.2021 г.; принята к публикации 17.02.2021 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Работа посвящена численному моделированию распространения и наката волн цунами на берег для некоторых пунктов Черноморского побережья России, Турции, Болгарии и Украины. В рамках нелинейной модели длинных волн решалась задача о распространении волн из гидродинамических очагов цунами, которые могут представлять наибольшую потенциальную опасность для исследуемых участков побережья. Гидродинамические очаги были заданы в форме эллиптического возвышения, параметры которого были выбраны согласно отклику уровня моря на подводное землетрясение магнитудой 7. Все очаги находились в сейсмически активных районах, в которых уже происходили цунамигенные землетрясения, вдоль изобаты 1500 м. Для участков, находящихся вблизи каждого из исследуемых пунктов в зоне над глубинами 300 м, рассчитывались мареограммы – временные ряды колебаний уровня моря, вызванные прохождением волн. Далее для каждого из рассматриваемых пунктов решалась одномерная задача о распространении и накате цунами на берег, где в качестве граничных условий были использованы полученные мареограммы. Показаны особенности распространения волн цунами в зависимости от рельефа дна и суши в исследуемых районах Черного моря. Получены оценки максимального повышения и понижения уровня моря при накате и последующем осушении берега для характерных особенностей рельефа в различных пунктах. При возможных цунамигенных землетрясениях наибольшие заплески могут возникать в районе Ялты (2.15 м), Джиде (1.9 м), Севастополя (1.4 м) и Анапы (1.4 м). Распространение цунами в прибрежной зоне Феодосии и Варны похоже качественно, максимальные высоты наката составляют соответственно 0.64 м и 0.46 м. Наименее подвержено воздействию волн цунами из-за протяженного шельфа побережье Евпатории (0.33 м) и Одессы (0.26 м).

**Ключевые слова:** цунами, Черное море, численное моделирование, накат волн цунами, вертикальный заплеск.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

**Для цитирования:** Белоконь А. Ю. Оценки амплитудных характеристик наката волн цунами на различных участках Черноморского побережья // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 34–46. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-34-46

© Белоконь А. Ю., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

# Estimates of Amplitude Characteristics of Tsunami Wave Run-Up in Various Areas of the Black Sea Coast

A. Yu. Belokon

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia  
e-mail: [aleksa.44.33@gmail.com](mailto:aleksa.44.33@gmail.com)

Submitted 15.01.2021; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

This paper is devoted to computational modelling of tsunami wave propagation and run-up to the shore for some points on the Russian, Turkish, Bulgarian and Ukrainian coasts of the Black Sea. The nonlinear long wave model was used to solve the problem of wave propagation from hydrodynamic tsunami sources, which can constitute the greatest potential danger for the studied coast areas. The hydrodynamic sources were set in the form of an elliptical elevation, the parameters of which were chosen according to the sea level response to an underwater earthquake of magnitude 7. All the sources were located in seismically active areas, where tsunamigenic earthquakes had already occurred, along the 1500 m isobath. Near each of the studied points in the area above 300 m depths, we calculated marigrams, i.e. time-series of sea level fluctuations caused by the passage of waves. Then, a one-dimensional problem of tsunami propagation and run-up on the coast was solved for each of the points under study, where the obtained marigrams were used as boundary conditions. Peculiarities of tsunami wave propagation have been shown depending on the bottom and land relief in the studied areas of the Black Sea. Estimates have been obtained of the sea level maximum rise and fall during surge and subsequent coastal drainage for the characteristic scales of relief irregularity at different points. For possible tsunamigenic earthquakes, the largest splashes may occur in the region of Yalta (2.15 m), Cide (1.9 m), Sevastopol (1.4 m), and Anapa (1.4 m). Tsunami propagation in the Feodosiya and Varna coastal areas is qualitatively similar, with maximum wave heights of 0.64 m and 0.46 m, respectively. The coastlines of Evpatoriya (0.33 m) and Odessa (0.26 m) are least affected by tsunami waves due to the extended shelf.

**Keywords:** tsunami, Black Sea, computational modelling, tsunami wave run-up, vertical splash.

**Acknowledgement:** the work was performed under state order on topic no. 0555-2021-0005.

**For citation:** Belokon, A. Yu., 2021. Estimates of Amplitude Characteristics of Tsunami Wave Run-Up in Various Areas of the Black Sea Coast. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 34–46. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-34-46 (in Russian).

## Введение

Проблема прогнозирования черноморских цунами и выявление наиболее опасных районов побережья, которые могут быть подвержены воздействию этого опасного феномена, являются актуальными и практически значимыми задачами в связи с непрерывным развитием береговой инфраструктуры. Волны цунами в этом районе, в отличие от штормовых волн, имеют небольшую высоту, но при выходе на мелководье они могут воздействовать на берег разрушительно.

Цунами, которые наблюдались в Черноморском бассейне, в основном имели сейсмическую природу. При этом эпицентры подводных землетрясений были расположены на материковом склоне [1]. Вычислительные эксперименты, проведенные в работах [2–4], показали, что положение зон генерации цунами может существенно влиять на распределение высот волн вдоль побережья. Максимальные высоты волн наблюдаются в направлении, перпендикулярном большой оси эллипса. Наибольшую потенциальную опасность представляют очаги цунами, расположенные непосредственно вблизи исследуемых участков побережья. Этим обычно объясняется выбор местоположения очагов генерации цунами, которые могут быть наиболее опасными для исследуемых участков прибрежной зоны Черного моря.

Ряд работ посвящен численному моделированию цунами в Черном море [2–9]. В основном в них проводился анализ распространения волн в Черноморском бассейне и расчет характерных высот уровня моря в прибрежной зоне без учета наката волн на берег. Однако наибольшую опасность цунами представляют именно во время наката на побережье, и последствия при этом могут быть крайне неблагоприятными.

В данной работе в рамках нелинейной модели поверхностных длинных волн решалась задача о распространении волн цунами в прибрежной зоне Черного моря с последующим накатом волн на берег. Выполнено численное моделирование эволюции гидродинамических источников цунами, представляющих наибольшую опасность для восьми пунктов побережья Черного моря: Евпатории, Севастополя, Ялты, Феодосии, Анапы, Джиде, Варны и Одессы. Параметры очагов цунами выбирались согласно отклику уровня моря на подводное землетрясение магнитудой 7. В прибрежной зоне каждого из исследуемых пунктов рассчитывались колебания уровня моря, вызванные распространением цунами из очага. Далее в рамках одномерной модели нелинейных длинных волн исследовались распространение и накат волн цунами на берег. Получены оценки заплесков для характерных масштабов нерегулярности береговой черты в данных пунктах.

#### **Численная модель и входные данные**

В задаче использовалась батиметрия Черного моря, заданная на прямоугольной сетке с 30-секундным пространственным разрешением.

Гидродинамический очаг генерации цунами задавался в виде эллиптического возмещения уровня моря с центром в точке  $(x_0, y_0)$ :

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

где  $r = 2\sqrt{(x_1/L)^2 + (y_1/W)^2}$ ;  $x_1 = (x - x_0) \cos \alpha + (y - y_0) \sin \alpha$ ;  $y_1 = (y - y_0) \cos \alpha - (x - x_0) \sin \alpha$ ;  $\alpha$  – угол наклона большой оси эллипса к оси  $x$ ;  $L$  и  $W$  – большая и малая оси эллипса соответственно;  $U$  и  $V$  – проекции вектора полного потока жидкости на оси  $x$  и  $y$ .

Параметры начальных возмущений определялись по формулам из статьи [10]

$$\lg L = 0.6M - 2.5; \quad \lg W = 0.15M + 0.42; \quad \lg a_0 = 0.8M - 5.6 \quad (M \geq 6.5). \quad (2)$$

Процесс распространения волн цунами описывался при помощи нелинейной двумерной модели поверхностных длинных волн:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{UV}{D} \right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{UV}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{V^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} V \sqrt{U^2 + V^2} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $t$  – время;  $\zeta(x, y, t)$  – смещение уровня моря от положения равновесия;  $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t)$  – динамическая глубина жидкости;  $H(x, y)$  – глубина бассейна при положении равновесия уровня моря;  $g$  – ускорение свободного падения;  $k = 0.013 \text{ с/м}^{1/3}$  – коэффициент шероховатости.

Численное моделирование эволюции цунами из гидродинамического очага проводилось на прямоугольной сетке с пространственным шагом 500 м и шагом по времени 1 с. Расчетная область ограничена изобатой 4 м, где нормальная компонента полного потока жидкости принималась равной нулю.

Далее для получения оценок заплесков цунами на берег решалась одномерная задача о распространении и накате волн на берег. Пространственный шаг для каждого исследуемого пункта определялся при помощи вычислительных экспериментов и варьировался от нескольких метров до десятков метров, шаг по времени составил 0.1 с. Процесс затопления – осушения моделировался с помощью алгоритма из работ [11, 12].

### Результаты численных экспериментов

Рассматривалось восемь эллиптических очагов генерации цунами, размещенных вдоль изобаты 1500 м и наиболее близко расположенных к побережью исследуемых пунктов (рис. 1). Для крымского побережья потенциально

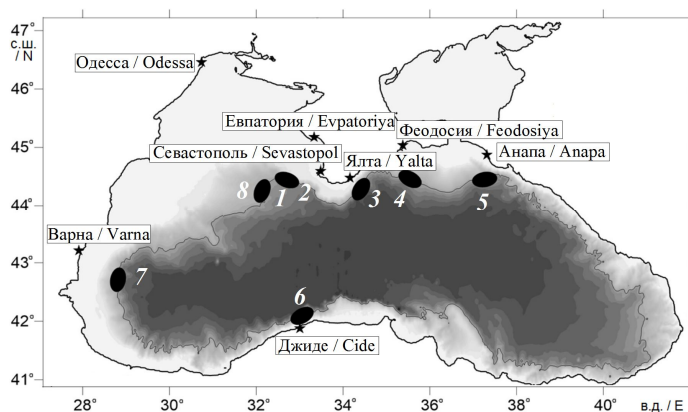


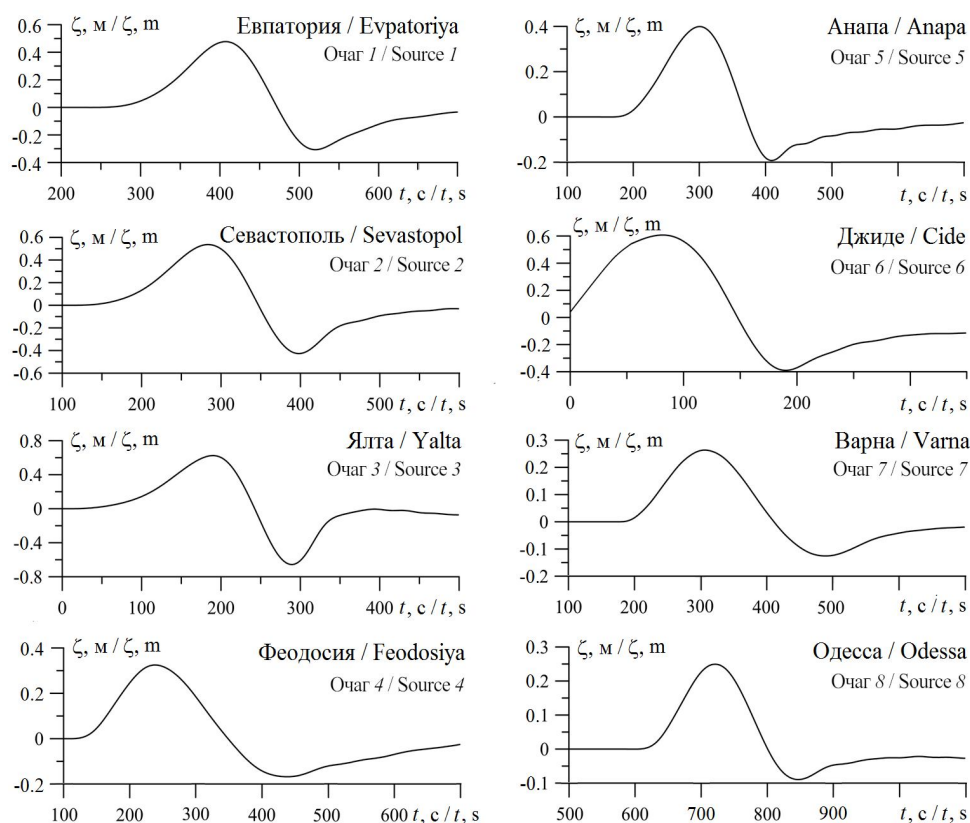
Рис. 1. Положение восьми потенциальных гидродинамических очагов генерации цунами и исследуемые пункты Черноморского побережья

Fig. 1. Position of eight potential hydrodynamic sources of tsunami generation and the Black Sea coast points under study

опасными являются очаги 1 (Евпатория), 2 (Севастополь), 3 (Ялта), 4 (Феодосия); для Кавказского побережья – очаг 5 (Анапа); для побережья Турции – очаг 6 (Джиде); для побережья Болгарии – очаг 7 (Варна) и наконец для побережья Украины – очаг 8 (Одесса). Согласно формулам из работы [10], большая и малая оси эллипса составляют 50 и 29 км соответственно, а высота возвышения уровня моря равна 1 м.

Эллиптическое смещение уровня моря преобразуется в кольцевую волну, которая распространяется по всей акватории Черного моря.

Для восьми пунктов Черноморского побережья, которые отмечены на рис. 1, рассчитывались временные ряды смещений уровня моря проходящих волн цунами над изобатой 300 м при распространении волн из гидродинамических очагов. Первая знакопеременная волна во всех восьми случаях являлась наибольшей, а следовавшие за ней колебания малой амплитуды не вносили существенный вклад в высоту заплеска. Головная волна цунами для каждого очага показана на рис. 2. По ней можно оценить период (длину волны), время добегания, амплитуду подходящей к берегу волны цунами.



Р и с . 2. Колебания уровня моря в районе изобаты 300 м при распространении волн цунами из эллиптических очагов 1–8 вблизи различных пунктов крымского побережья

F i g . 2. Sea level oscillations near the 300 m isobath during tsunami wave propagation from elliptical sources 1–8 near various points at the Crimean Coast

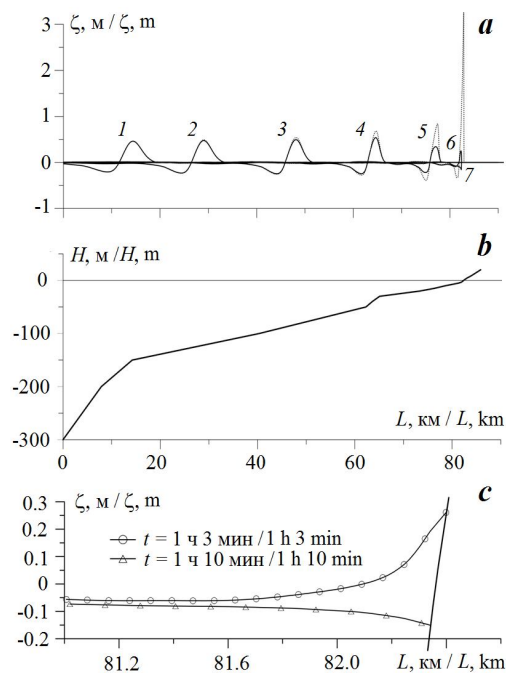
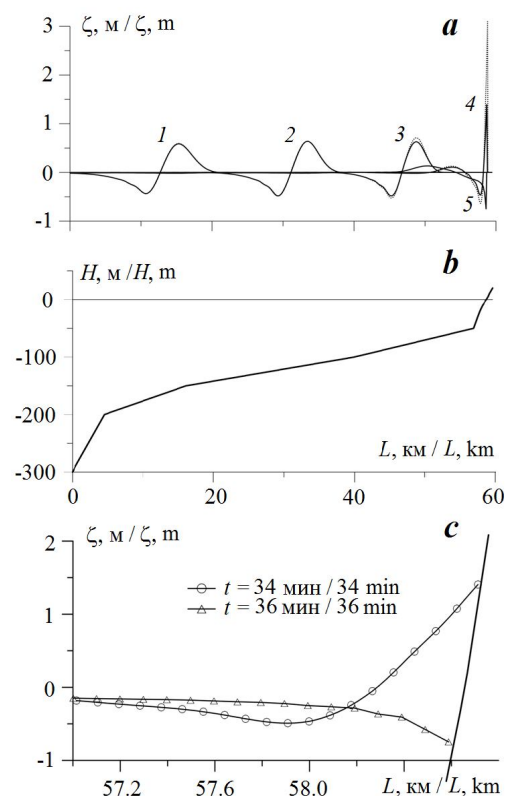


Рис. 3. Эволюция волн цунами из очага 1 вблизи побережья Евпатории в моменты времени: 1 – 10 мин, 2 – 17 мин, 3 – 27 мин, 4 – 38 мин, 5 – 52 мин, 6 – 1 ч 3 мин, 7 – 1 ч 10 мин (a); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (c)

Fig. 3. Tsunami wave evolution from source 1 near Eupatoriya coast at time points: 1 – 10 min, 2 – 17 min, 3 – 27 min, 4 – 38 min, 5 – 52 min, 6 – 1 h 3 min, 7 – 1 h 10 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

вались профили дна в прибрежной зоне для каждого из исследуемых пунктов. В качестве граничных условий в точке  $x = 0$  использовались ма-

реограммы для каждого пункта из рис. 2, полученные при решении двумерной задачи. Далее в рамках одномерной модели нелинейных длинных волн для каждого из пунктов проводилось исследование особенности распространения и наката волн цунами на берег. Для этого использо-



На рис. 3, a показано распространение волн цунами из очага 1 к побережью Евпатории вдоль профиля дна (рис. 3, b). Для сравнения на рис. 3, a представлены результаты расчетов без учета донного трения. Головная волна с амплитудой 0.45 м усиливается при распространении вдоль пологого шельфа, ее длина уменьшается (рис. 3, a (кривые 1–3)).

Рис. 4. Эволюция волн цунами из очага 2 вблизи побережья Севастополя в моменты времени: 1 – 8 мин, 2 – 17 мин, 3 – 25 мин, 4 – 34 мин, 5 – 36 мин (a); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (c)

Fig. 4. Tsunami wave evolution from source 2 near Sevastopol coast at time points: 1 – 8 min, 2 – 17 min, 3 – 25 min, 4 – 34 min, 5 – 36 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

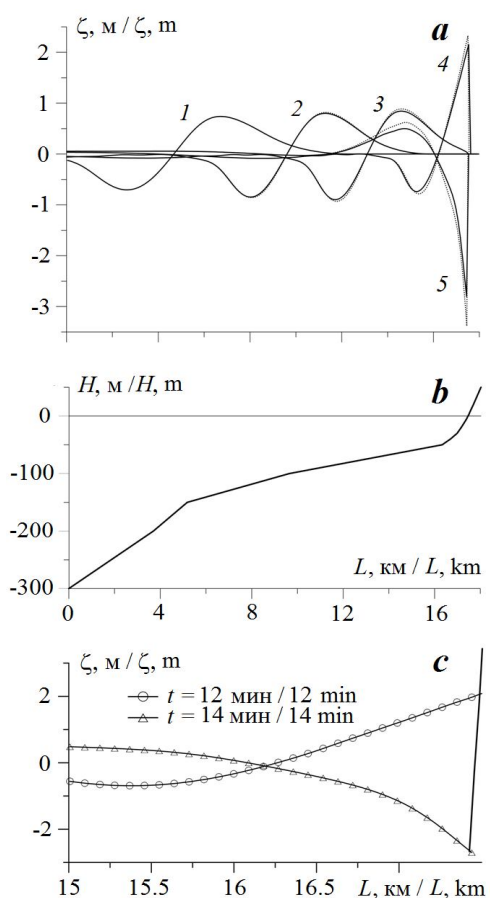
Рис. 5. Эволюция волн цунами из очага 3 вблизи побережья Ялты в моменты времени: 1 – 6 мин, 2 – 8 мин, 3 – 10 мин, 4 – 12 мин, 5 – 14 мин (a); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (c)

Fig. 5. Tsunami wave evolution from source 3 near Yalta coast at time points: 1 – 6 min, 2 – 8 min, 3 – 10 min, 4 – 12 min, 5 – 14 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

При этом на волны воздействует донное трение, влияние которого становится значительным при выходе волн на глубину меньше 50 м, где уклон дна становится еще более пологим (рис. 3, a (кривые 4–6)). Поэтому для подобных профилей дна высота наката и глубина отката не превышают амплитуду подходящей к берегу волны и составляют 0.33 м (рис. 3, a (кривая 6)) и –0.16 м (рис. 3, a (кривая 7)) соответственно. На рис. 3, a отсутствует кривая 7 для понижения уровня при откате без учета трения, что связано с обрушением волны. На рис. 3, c показаны положения уровня моря при максимальном накате волн и осушении берега.

Очаг 2 совпадает с очагом 1 и является наиболее опасным для береговой зоны Севастополя. Эволюция волн цунами из этого очага с последующим накатом на севастопольское побережье показана на рис. 4, a. По сравнению с евпаторийской прибрежной зоной, севастопольский шельф менее протяженный (рис. 4, b). При подобном профиле дна волны могут усиливаться из-за уменьшения глубины и одновременно гаситься под влиянием донного трения (рис. 4, a (кривые 1–3)). На рис. 4, c показаны максимальные повышение и понижение уровня моря в момент наката волн на берег. Высота наката составляет 1.4 м, глубина отката –0.75 м. Если не учитывать в расчетах донное трение, то после достижения максимального заплеска волна обрушается.

Особенностью ялтинской прибрежной зоны является быстрое нарастание глубин, шельф становится более узким, переходя в крутой уклон берега, как показано на рис. 5. Из рис. 1 видно, что очаг 3, который для этого района является наиболее опасным, расположен параллельно береговой черте и достаточно близко к побережью. Образовавшаяся в результате опускания начального возвышения волна цунами высотой 0.9 м усиливается немногим более чем в два раза (рис. 5, a), что характерно для наката длинных волн



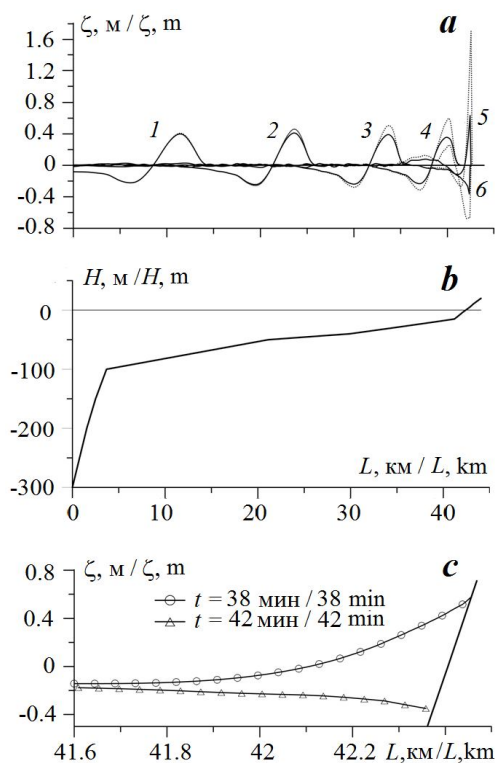


Рис. 6. Эволюция волн цунами из очага 4 вблизи побережья Феодосии в моменты времени: 1 – 10 мин, 2 – 18 мин, 3 – 26 мин, 4 – 33 мин, 5 – 38 мин, 6 – 42 мин (a); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (c)

Fig. 6. Tsunami wave evolution from source 4 near Feodosiya coast at time points: 1 – 10 min, 2 – 18 min, 3 – 26 min, 4 – 33 min, 5 – 38 min, 6 – 42 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

на крутые склоны. Воздействие донного трения при распространении цунами в этом районе слабое. Рис. 5, с отображает повышение и понижение уровня в моменты наибольшего затопления и осушения берега. Высота заплеска на побережье Ялты составляет 2.15 м, понижение уровня моря при откате –2.8 м.

В прибрежной зоне Феодосии ширина шельфа заметно увеличивается, а изобата 1500 м отдалается от берега (см. рис. 1). На рис. 6, a показана эволюция цунами в этом районе. На протяжении всего шельфа при распространении волн их амплитуда не изменяется, а длина волны уменьшается (рис. 6, a (кривые 1–4)). Высота наката цунами на береговой склон составляет 0.64 м, а понижение уровня моря при откате волны –0.34 м (рис. 6, c).

Распространение волн цунами из очага 5 в прибрежной зоне Анапы показано на рис. 7, a. Профиль дна в этом районе (рис. 7, b) похож на профиль дна вблизи Ялты (см. рис. 5, b), однако, по сравнению с ялтинской зоной, материковый склон вблизи Анапы более крутой. Как видно из рис. 7, a (кривые 1–3), влияние донного трения на шельфе минимально и проявляется только при накате волн на берег (рис. 7, a (кривые 4, 5)). На рис. 7, c показана максимальная высота заплеска, которая может достигать 1.4 м, и глубина отката, равная –0.72 м.

Одна из наиболее узких шельфовых зон находится в прибрежной зоне Турции (см. рис. 1). Рассмотрим распространение волн цунами из очага 6 вблизи Джиде (рис. 8, a). Длины волн цунами, сгенерированных этим очагом, больше ширины шельфа, поэтому волны слабочувствительны к изменениям геометрии дна (рис. 8, a (кривые 1, 2)). Донное трение оказывает влияние на волны непосредственно при подходе к берегу (рис. 8, a (кривые 3–5)). Вошедшая в расчетную область волна цунами амплитудой 0.8 м при накате на берег возрастает до 1.9 м, понижение уровня моря при откате достигает –1.36 м (рис. 8, c).



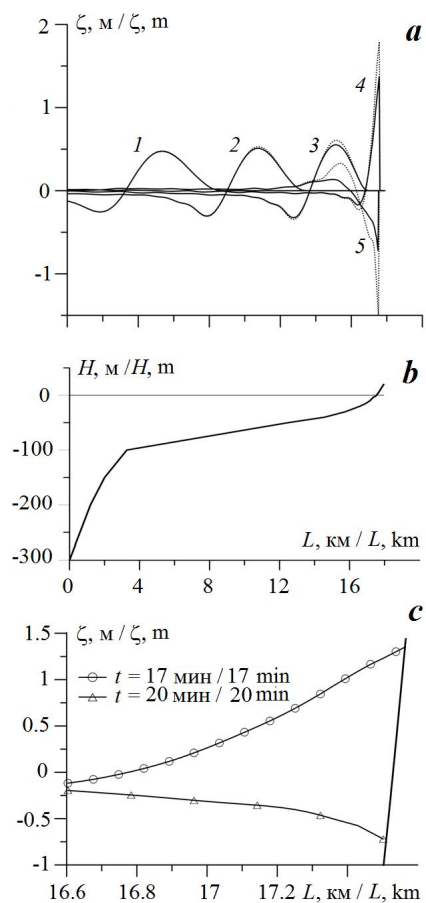


Рис. 7. Эволюция волн цунами из очага 5 вблизи побережья Анапы в моменты времени: 1 – 7 мин, 2 – 11 мин, 3 – 14 мин, 4 – 17 мин, 5 – 20 мин (а); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (с)

Fig. 7. Tsunami wave evolution from source 5 near Anapa coast at time points: 1 – 7 min, 2 – 11 min, 3 – 14 min, 4 – 17 min, 5 – 20 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

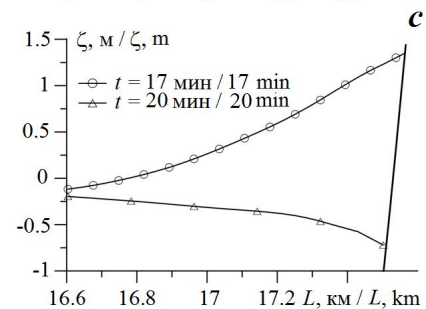
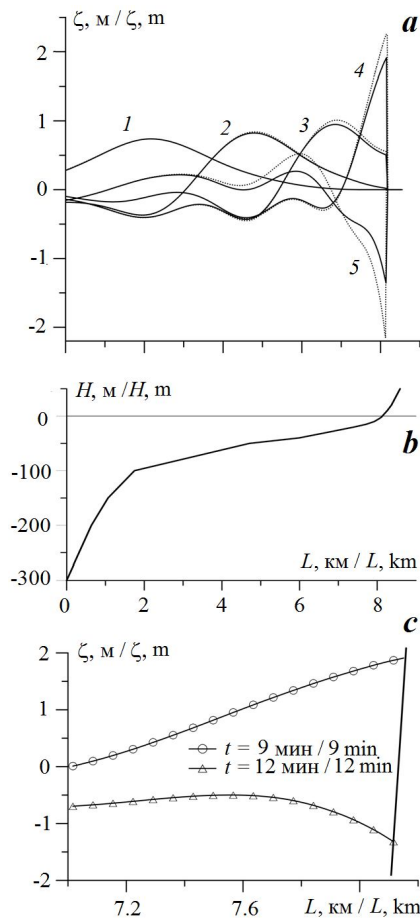


Рис. 8. Эволюция волн цунами из очага 6 вблизи турецкого побережья Джиде в моменты времени: 1 – 5 мин, 2 – 7 мин, 3 – 8 мин, 4 – 9 мин, 5 – 12 мин (а); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (с)

Fig. 8. Tsunami wave evolution from source 6 near Cide coast (Turkey) at time points: 1 – 5 min, 2 – 7 min, 3 – 8 min, 4 – 9 min, 5 – 12 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)



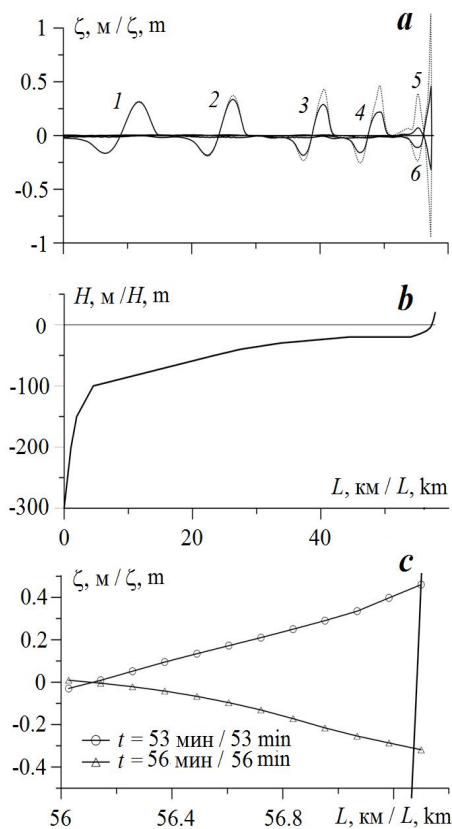


Рис. 9. Эволюция волн цунами из очага 7 вблизи побережья Варны в моменты времени: 1 – 8 мин, 2 – 18 мин, 3 – 32 мин, 4 – 42 мин, 5 – 53 мин, 6 – 56 мин (a); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (c)

Fig. 9. Tsunami wave evolution from source 7 near Varna coast at time points: 1 – 8 min, 2 – 18 min, 3 – 32 min, 4 – 42 min, 5 – 53 min, 6 – 56 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

Профили волн цунами в районе болгарского побережья (Варна) (кривые 1–6 на рис. 9, a) и вблизи Феодосии (рис. 6, a) изменяются сходным образом. Здесь ширина шельфа также составляет порядка 40–45 км, однако из рис. 9, b видно, что береговой склон Варны, в отличие от феодосийского, более крутой. Высота заплеска на берег составляет 0.46 м, а глубина отката –0.32 м (рис. 9, c).

На рис. 10, a показана эволюция цунами в прибрежной зоне Одессы.

Ширина шельфа здесь наибольшая во всем Черном море и составляет приблизительно 200 км. При распространении волн цунами над глубинами 100–50 м их начальная амплитуда 0.3 м остается неизменной (рис. 10, a (кривые 1, 2)), однако при дальнейшем уменьшении глубин усиливается влияние донного трения, что приводит к диссипации энергии волн и, как следствие, амплитуда волн резко уменьшается (рис. 10, a (кривые 3–11)). Высота наката цунами на берег Одессы составляет 0.26 м, глубина отката – 0.27 м (рис. 10, c). Как видно из рис. 10, кривые 10, 11, отображающие максимальное повышение и понижение уровня при накате, представлены только с учетом донного трения, так как только в этом случае волна распространяется без обрушения.

### Выводы

Представлены результаты численного моделирования распространения волн из гидродинамических очагов в прибрежной зоне Черного моря с последующим накатом волн на берег. Рассмотрено восемь источников цунами, представляющих наибольшую опасность для нескольких городов побережья Черного моря: Евпатории, Севастополя, Ялты, Феодосии, Анапы, Джиде, Варны и Одессы. В прибрежной зоне каждого из исследуемых пунктов рассчитывались колебания уровня моря, вызванные распространением цунами из потенциально опасного очага. Затем в рамках одномерной модели нелинейных длинных волн исследовалось распространение и накат волн цунами

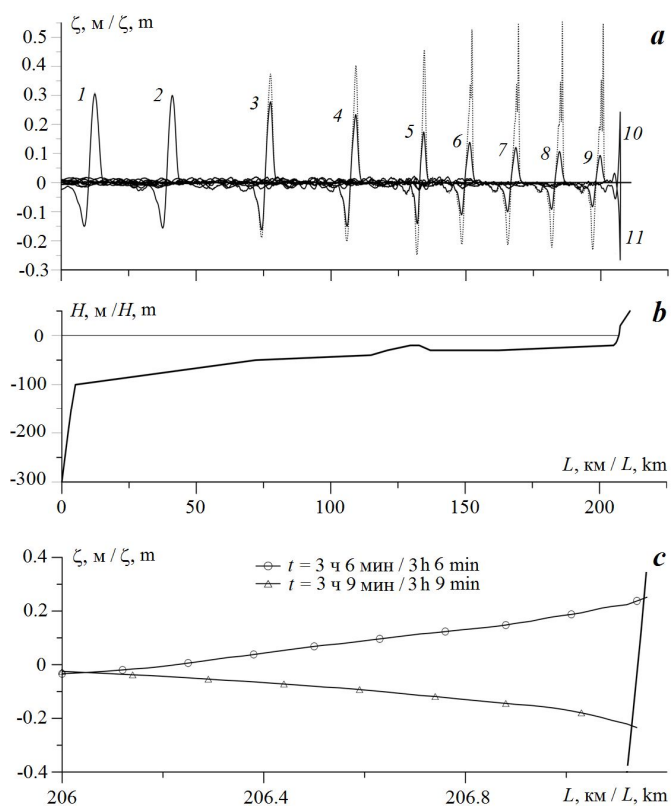


Рис. 10. Эволюция волн цунами из очага 8 вблизи побережья Одессы в моменты времени: 1 – 18 мин, 2 – 35 мин, 3 – 1 ч, 4 – 1 ч 25 мин, 5 – 1 ч 50 мин, 6 – 2 ч 6 мин, 7 – 2 ч 23 мин, 8 – 2 ч 40 мин, 9 – 2 ч 56 мин, 10 – 3 ч 6 мин, 11 – 3 ч 9 мин (а); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (с)

Fig. 10. Tsunami wave evolution from source 8 near Odessa coast at time points: 1 – 18 min, 2 – 35 min, 3 – 1 h, 4 – 1 h 25 min, 5 – 1 h 50 min, 6 – 2 h 6 min, 7 – 2 h 23 min, 8 – 2 h 40 min, 9 – 2 h 56 min, 10 – 3 h 6 min, 11 – 3 h 9 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

на берег. Наибольшие заплески могут возникать в районе Севастополя, Ялты, Анапы, Джиде. Влияние донного трения на волны здесь слабое и проявляется только при накате волн на берег. Наименее подвержены воздействию цунами побережье Евпатории и Одессы, что обусловлено достаточно протяженным шельфом в этом районе Черного моря.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никонов А. А., Гусяков В. К., Флейфель Л. Д. Новый каталог цунами в Черном и Азовском морях в приложении к оценке цунамиопасности Российского побережья // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 2. С. 240–255. <https://doi.org/10.15372/GiG20180208>

2. Доценко С. Ф. Численное моделирование цунами в Черном, Азовском и Каспийском морях как необходимый элемент региональных систем раннего предупреждения о цунами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26. С. 287–300.
3. Доценко С. Ф., Ингеров А. В. Численные оценки цунамиопасности Крымско-Кавказского побережья Черного моря // Доповіді НАН України. 2009. № 6. С. 119–125.
4. Базыкина А. Ю., Михайличенко С. Ю., Фомин В. В. Численное моделирование цунами в Черном море, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г. // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 4. С. 318–328. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-318-328
5. Зайцев А. И., Пелиновский Е. Н. Прогноз высот волн цунами на Российском побережье Черного моря // Океанология. 2011. Т. 51, № 6. С. 965–973.
6. Пелиновский Е. Н., Зайцев А. И. Оценка и картирование опасности цунами на Черноморском побережье Украины // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2011. № 3. С. 44–50.
7. 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.
8. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalciner [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. Vol. 109, iss. C12. C12023. <https://doi.org/10.1029/2003JC002113>
9. Баранова Е. А., Мазова Р. Х. Цунамиопасность Крымского побережья Черного моря и Керченского пролива при катастрофических цунамигенных землетрясениях, близких по локализации к историческому Ялтинскому землетрясению 12 сентября 1927 года // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 123–138. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-123-138
10. Опыт картирования очагов землетрясений / В. И. Уломов [и др.] // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М. : ИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. С. 99–108.
11. Kowalik Z., Murty T. S. Numerical simulation of two-dimensional tsunami runup // Marine Geodesy. 1993. Vol. 16, iss. 2. P. 87–100. doi:10.1080/15210609309379681
12. Sielecki A., Wurtele M. The numerical integration of the non-linear shallow-water equations with sloping boundaries // Journal of Computational Physics. 1970. Vol. 6, iss. 2. P. 219–236. doi:10.1016/0021-9991(70)90022-7

*Об авторе:*

**Белоконь Александра Юрьевна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-1299-0983, ResearchID: M-6839-2018, [aleksa.44.33@gmail.com](mailto:aleksa.44.33@gmail.com)**

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Nikonov, A.A., Fleifel, L.D. and Gusiakov, V.K., 2018. Assessment of the Tsunami Hazard on the Russian Coast Based on a New Catalogue of Tsunamis in the Black Sea and the Sea of Azov. *Russian Geology and Geophysics*, 59(2), pp. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.01.016>

2. Dotsenko, S.F., 2012. Numerical Simulation of Tsunami in the Black Sea, the Sea of Azov and the Caspian Sea as an Essential Element of Tsunami Early Warning Regional Systems. In: MHI, 2012. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 26, pp. 287–300 (in Russian).
3. Dotsenko, S.F. and Ingerov, A.V., 2009. Numerical Estimates of the Tsunami Hazard along the Crimean-Caucasian Coast of the Black Sea. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (6), pp. 119–125 (in Russian).
4. Bazykina, A.Yu., Mikhailichenko, S.Yu. and Fomin, V.V., 2018. Numerical Simulation of Tsunami in the Black Sea Caused by the Earthquake on September 12, 1927. *Physical Oceanography*, 25(4), pp. 295–304. doi:10.22449/1573-160X-2018-4-295-304
5. Zaitsev, A.I. and Pelinovsky, E.N., 2011. Forecasting of Tsunami Wave Heights at the Russian Coast of the Black Sea. *Oceanology*, 51(6), pp. 965–973. <https://doi.org/10.1134/S0001437011050225>
6. Pelinovsky, E.N. and Zaitsev, A.I., 2011. The Estimation and Mapping of Tsunami Dangerous at the Ukrainian Black Sea Coast. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, (3), pp. 44–50 (in Russian).
7. Dotsenko, S.F. and Ingerov, A.V., 2013. Characteristics of Seismic Tsunami Waves in the Black Sea Basin on the Results of Numerical Modelling. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, (3), pp. 25–34 (in Russian).
8. Yalciner, A., Pelinovsky, E., Talipova, T., Kurlin, A., Kozelkov, A. and Zaitsev, A., 2004. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the Historical, Instrumental and Numerical Data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C12), C12023. <https://doi.org/10.1029/2003JC002113>
9. Baranova, E.A. and Mazova, R.Kh., 2020. Tsunami Hazard for the Crimean Coast of the Black Sea and the Kerch Strait at the Catastrophic Tsunamigenic Earthquakes, the Locations of which are Close to that of the Historical Yalta Earthquake on September 12, 1927. *Physical Oceanography*, 27(2), pp. 110–125. doi:10.22449/1573-160X-2020-2-110-125
10. Ulomov, V.I., Polyakova, T.P., Shumilina, L.S., Chernysheva, G.V., Medvedeva, N.S., Savarenskaya, O.E. and Stepanova, M.B., 1993. Experience of Mapping Earthquake Sources. In: V. I. Ulomov, ed., 1993. *Seismicity and Seismic Zoning of Northern Eurasia*. Moscow: IFZ RAN. Vol. 1, pp. 99–108 (in Russian).
11. Kowalik, Z. and Murty, T.S., 1993. Numerical Simulation of Two-Dimensional Tsunami Runup. *Marine Geodesy*, 16(2), pp. 87–100. doi:10.1080/15210609309379681
12. Sielecki, A. and Wurtele, M., 1970. The Numerical Integration of the Non-Linear Shallow-Water Equations with Sloping Boundaries. *Journal of Computational Physics*, 6(2), pp. 219–236. doi:10.1016/0021-9991(70)90022-7

*About the author:*

**Aleksandra Yu. Belokon**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-1299-0983**, **ResearchID: M-6839-2018**, [aleksa.44.33@gmail.com](mailto:aleksa.44.33@gmail.com)

*The author has read and approved the final manuscript.*