

Численное моделирование цунами в Черном море, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г.

А. Ю. Базыкина*, С. Ю. Михайличенко, В. В. Фомин

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

Поступила в редакцию 01.03.2018 г., после доработки – 04.04.2018 г.

В рамках нелинейной модели длинных волн выполнено численное моделирование эволюции цунами в Черном море, вызванного Ялтинским землетрясением 12 сентября 1927 г. Реализовано две задачи о распространении волн цунами из эллиптического очага: для всей акватории Черного моря и для локального участка южной части Крымского побережья. Расчеты для первого численного эксперимента проводились на 30-секундной батиметрической сетке Черного моря. Для ряда пунктов Крымского и Кавказского побережий рассчитаны колебания уровня моря, которые сопоставлены с имеющимися записями мареографов. Амплитуды модельных колебаний уровня в прибрежной зоне при распространении волн цунами оказались больше амплитуд, зафиксированных инструментально, что связано с неточностью моделирования очага генерации цунами вследствие малого объема информации о данном событии. Во всех пунктах, кроме Ялты, колебания уровня моря не превысили по высоте начальное возвышение очага цунами. В Ялте высота волн может достигать 2 м, в Евпатории – 0,2 м, в Севастополе – 0,4 м, в Феодосии – 0,5 м, в Керчи – 0,4 м, в Новороссийске – 0,5 м, в Туапсе – 0,3 м, в Батуми – 0,5 м. Во втором численном эксперименте проведен расчет эволюции цунами с последующим накатом волн на Южный берег Крыма. Использована батиметрическая сетка с 50-метровым разрешением. Для 10 пунктов Южного берега Крыма рассчитаны колебания уровня моря во время цунами и оценены амплитудные характеристики при накате волн на берег. Наиболее подвержен воздействию волн участок побережья в районе Ялты, Никиты и Гурзуфа. Высота наката волн цунами на берег в Никите может достигать 2 м, а понижение уровня моря при осушении побережья – более 3 м.

Ключевые слова: нелинейные длинные волны, численное моделирование, цунами в Черном море, Ялтинское землетрясение 12 сентября 1927 г., цунамиопасность Черноморского побережья.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).

Для цитирования: 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

Numerical Simulation of Tsunami in the Black Sea Caused by the Earthquake on September 12, 1927

A. Yu. Bazykina*, S. Yu. Mikhailichenko, V. V. Fomin

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
**e-mail: aleksa.44.33@gmail.com*

Within the framework of the nonlinear model of long waves, the numerical simulation of the tsunami evolution in the Black Sea caused by the Yalta earthquake of September 12, 1927 is performed. Two problems on propagation of tsunami waves from the elliptical source are solved: for the whole Black Sea water area and for the local part of the Crimea Southern coast. The calculations for the first numerical experiment are carried out on a 30-second bathymetric grid of the Black Sea. The sea level oscillations for several points on the Crimean and Caucasian coasts are calculated and compared with the available records of the tide gauges. The amplitudes of the model level oscillations in the coastal zone during propagation of tsunami waves are larger than those recorded instru-

mentally. This fact is related to inaccuracy in modeling the tsunami generation site due to small amount of information on this event. In all the points, except for Yalta, the sea level oscillations did not exceed the height of the tsunami center initial elevation. In Yalta the wave height can attain 2 m, in Evpatoria – 0.2 m, in Sevastopol – 0.4 m, in Feodosia – 0.5 m, in Kerch – 0.4 m, in Novorossiysk – 0.5 m, in Tuapse – 0.3 m and in Batumi – 0.5 m. The second numerical experiment implies calculation of the tsunami evolution followed by the wave run-up on the Crimea Southern coast. The 50-meter bathymetric grid is applied. For 10 points of the Crimea Southern coast, the sea level oscillations occurring during tsunamis are calculated and the amplitude characteristics during the waves' run-up are assessed. The coastline in the region of Yalta, Nikita and Gurzuf is the most strongly affected. The height of the tsunami waves' run-up on the coast in Nikita can make up 2 m, and the sea level decrease at draining the coast – more than 3 m.

Keywords: nonlinear long waves, numerical simulation, tsunami in the Black Sea, Yalta earthquake of September 12, 1927, tsunami hazard of the Black Sea coast.

Acknowledgements: the study is carried out within the framework of the state task on the theme № 0827-2018-0004 “Complex interdisciplinary investigations of the oceanologic processes conditioning functioning and evolution of the ecosystems in the Black and Azov seas' coastal zones” (code “Coastal investigations”).

For citation: 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. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(4), pp. 318-328. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-318-328 (in Russian).

Введение

Из-за редкой повторяемости цунами в Черном море и малого объема натуральных данных цунамиопасность Черноморского региона исследована недостаточно. Однако в последние годы интерес к этой проблеме растет, появляются новые источники информации и совершенствуются методы и подходы к выявлению событий, которые могли вызвать цунами. Если 20 лет назад каталог цунами Азово-Черноморского региона насчитывал 22 события за 2000 лет [1], то на сегодняшний день уже известно 50 цунамигенных событий, произошедших за последние 3000 лет [2]. Таким образом, цунами различной интенсивности могут возникать в Черном море в среднем 1–2 раза в 100 лет.

Информация о черноморских цунами исходит в основном из наблюдений очевидцев, описанных в летописях и легендах. Известно, что исторические цунами носили разрушительный характер. Среди них обнаружены разрушительные явления с высотами волн более 2 м. Цунами имели место вдоль многих участков побережья Черного моря. Чаще всего они были вызваны местными землетрясениями: большинство – с эпицентрами в море, некоторые – с эпицентрами на суше. Четыре явления цунами XX в., которые имеют сейсмическое происхождение, были зафиксированы с помощью мареографов. Это два события, вызванных землетрясениями 1927 г., а также события 1939 г. и 1966 г. В работах [1, 3–8] исследовались зафиксированные прибрежными мареографами колебания уровня моря для нескольких пунктов Черноморского побережья. По инструментальным записям оценивались период волн, время прихода первой волны цунами, характер колебаний. Мареографы воспроизвели волны цунами высотой лишь несколько сантиметров. По словам очевидцев, в действительности высоты волн были значительно больше [5], что связано с их усилением при накате волн на берег.

Учитывая тот факт, что сведений о цунами в Черном море на сегодняшний день недостаточно, отметим, что это явление остается хоть и редким, но довольно небезопасным для побережья данного региона. Поэтому возникает необходимость проведения численных расчетов для определения возможных высот волн при распространении цунами в прибрежной зоне Черного моря.

Цунамиопасность Черноморского побережья исследовалась численно в [9–13]. Расчеты показывают, что распределения уровня моря и горизонтальных скоростей существенно зависят от особенностей рельефа дна бассейна, формы берегов, положения очага цунами и магнитуды землетрясения. В работе [10] выполнены расчеты по моделированию двух цунами, вызванных землетрясениями 1939 г. и 1966 г. В [14] на основании расчетов на 15-километровой сетке проведен анализ характера колебаний уровня моря при распространении волн цунами во время землетрясений 1927 г.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования эволюции цунами, вызванного Ялтинским землетрясением 12 сентября 1927 г. В отличие от работы [14] расчеты проводились с использованием более подробной батиметрической сетки с разрешением 30". Исследована эволюция волн из эллиптического очага цунами по всей акватории Черного моря. Для ряда пунктов Крымского и Кавказского побережий модельные мареограммы сопоставлены с имеющимися записями мареографов. В частности, изучено распространение волн из очага цунами на шельфе южной части Крымского побережья, наиболее подверженном разрушительному воздействию. Проанализированы мареограммы для этого участка побережья и максимальные возвышения и понижения уровня моря при накате волн на берег.

Ялтинское землетрясение 12 сентября 1927 г.

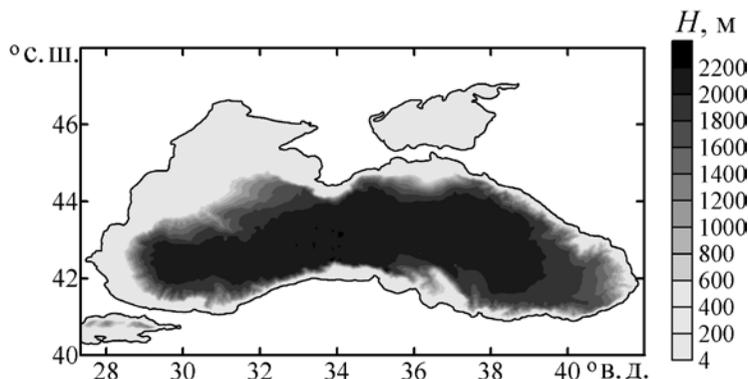
Наиболее сильное черноморское землетрясение XX в., породившее волны цунами, произошло 12 сентября 1927 г. в 30 км восточнее Ялты, в зоне повышенной сейсмической активности Черноморской впадины [3]. Оно имело магнитуду 6,5 по данным [3, с. 484; 15, с. 12] и $6,8 \pm 0,1$ по данным [10, с. 6; 16, с. 948; 17, с. 89]. Нет точной информации о протяженности участка землетрясения, предположительно она составила 86–100 км [18]. Волны цунами были зарегистрированы прибрежными мареографами Крымского и Кавказского побережий. Наибольшая высота волн, записанная инструментально, зафиксирована у побережья Евпатории и составила 0,5 м [3]. По наблюдениям очевидцев [17, 18], во многих прибрежных пунктах Крыма явление цунами, вызванное землетрясением, не осталось незамеченным.

Так, в Балаклавской бухте при полном штиле уровень моря упал на 1 м ниже среднего уровня, а затем превысил его более чем на 1 м [18]. Вода отошла на несколько метров так, что на мели остались мелкие суда. Затем она стремительно хлынула на берег и затопила часть суши [17]. В Севастополе 12 сентября мареограф морской обсерватории весь день отмечал непрерывные изменения уровня воды в бухтах. В Евпатории на море был штиль, но после толчка появился прибой, который мог быть вызван сотрясениями морского дна западнее побережья. В Ялте уровень моря резко понизился и его колебания усилились [17]. Всего было зафиксировано несколько подземных толчков, разнесенных во времени, и колебания уровня моря продолжались несколько дней.

Таким образом, наибольшему воздействию волн, возникших в результате этого землетрясения, было подвержено Крымское побережье. И хотя цунами в бассейне Черного моря происходит редко, нельзя пренебрегать вероятностью возникновения этого катастрофического явления, которое может нанести серьезный урон населению и экономике прибрежных районов.

Математическая постановка задачи

Рассматривается бассейн, рельеф дна которого и форма береговой черты моделируют Черное море. В расчетах использовалась 30-секундная батиметрия Мирового океана (данные взяты из *General Bathymetric Chart of the Oceans Digital Atlas* (URL: <https://www.gebco.net/>)). Она представлена на рис. 1.



Р и с. 1. Распределение глубин в бассейне Черного моря
Fig. 1. Distribution of depths in the Black Sea basin

В связи с отсутствием информации о параметрах очага описываемого землетрясения моделирование генерации цунами осуществлялось заданием начального смещения уровня моря в эллиптической области при нулевом поле скорости. Начальное смещение свободной поверхности моря с центром в точке (x_0, y_0) , большой и малой осями L и W задавалось в виде распределения

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

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

Известно, что очаг цунами был довольно протяженным. Параметры эллиптического возвышения взяты из работы [14]. Таким образом, максимальное смещение поверхности моря в зоне землетрясения принималось равным $a_0 = 1$ м, большая и малая оси эллипса равны $L = 65$ км, $W = 25$ км соответственно. Эпицентр землетрясения, по данным работы [5], располагался на подводном склоне к востоку от Ялты на расстоянии 30 км и на глубине, приблизительно равной 1200 м, координаты очага землетрясения $44^\circ 31'$ с. ш., $34^\circ 30'$ в. д. Начальное возвышение располагаем так, чтобы продольная ось эллипса была вытянута вдоль изобаты 1200 м.

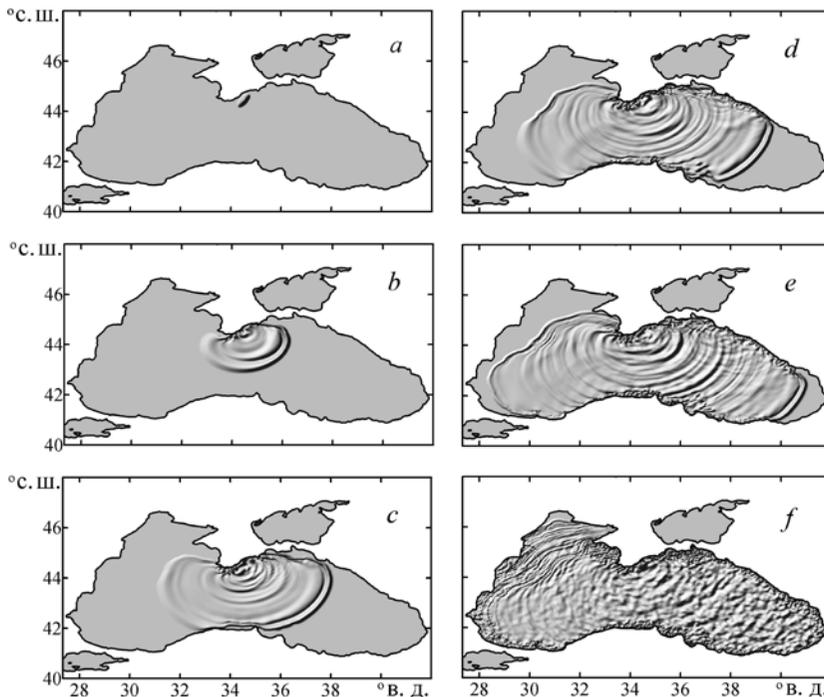
Для описания процесса распространения волн цунами использовалась нелинейная двумерная модель поверхностных длинных волн, учитывающая квадратичное донное трение:

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

где x, y – зональная и меридиональная координаты; t – время; $U(x, y, t)$ и $V(x, y, t)$ – проекции вектора полного потока жидкости на оси x и y соответственно; $\zeta(x, y, t)$ – смещение свободной поверхности жидкости от горизонтального положения; $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t)$ – полная (динамическая) глубина жидкости, $H(x, y)$ – глубина бассейна при невозмущенном состоянии жидкости; g – ускорение свободного падения; $k = 0,013 \text{ c/m}^{1/3}$ – параметр шероховатости Маннинга.

Результаты численных экспериментов

В первом численном эксперименте моделировалось цунами для всего Черного моря на сетке с пространственным шагом 500 м. Шаг интегрирования по времени составлял 1 с, расчеты выполнялись до изобаты 4 м. На твердых береговых границах расчетной области нормальные компоненты полного потока жидкости приравнивались нулю.

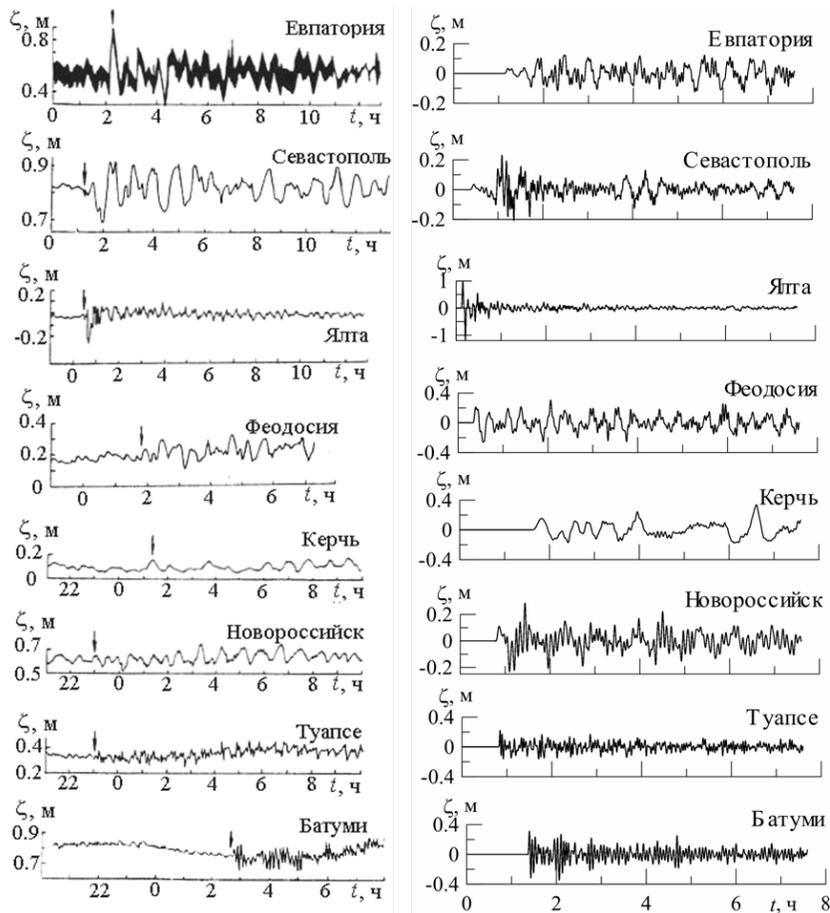


Р и с. 2. Эволюция волн цунами в Черном море из эллиптического возвышения, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г.: структура волнового поля в моменты времени 0 (a), 15 мин (b), 35 мин (c), 50 мин (d), 1 ч 10 мин (e), 3 ч (f)

Fig. 2. Evolution of tsunami waves in the Black Sea propagating from the elliptical elevation induced by the earthquake of September 12, 1927: the wave field structure at the time moments 0 (a), 15 min. (b), 35 min. (c), 50 min. (d), 1 hr 10 min. (e), 3 hr (f)

Характерные этапы эволюции волн цунами, полученные в результате модельных расчетов, показаны на рис. 2. Как видно, кольцевая волна, возникшая в результате опускания начального возвышения, распространяется неравномерно вследствие неоднородностей рельефа дна. При подходе волн к берегу их длины уменьшаются с уменьшением глубины бассейна. Быстрее всего волны цунами достигают Южного берега Крыма, затем берегов Турции, Кавказского и Болгарского побережий. И только спустя 3 ч после начала действия источника волн цунами начинают проявляться на северо-западном шельфе.

В левой части рис. 3 для 8 пунктов Крымского и Кавказского побережий (Евпатория, Севастополь, Ялта, Феодосия, Керчь, Новороссийск, Туапсе, Батуми) приведены колебания уровня моря, зафиксированные мареографами во время землетрясения 12 сентября 1927 г. (данные взяты из работ [8, с. 273] и [14, с. 392]). Отчетливо прослеживаются колебания уровня моря при распространении волн цунами. Максимальные высоты зарегистрированных волн в этих пунктах не превысили 0,5 м.



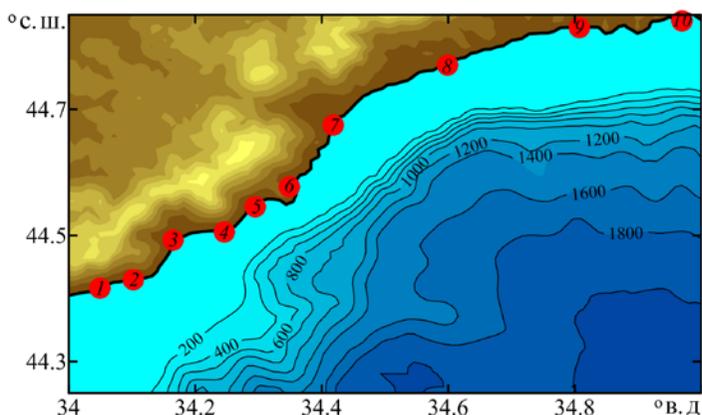
Р и с. 3. Мареограммы для некоторых пунктов Крымского и Кавказского побережий Черного моря во время цунами, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г.: слева – записи мареографов [8, с. 273; 14, с. 392]; справа – рассчитанные колебания уровня моря в рамках данной модели
F i g. 3. Mariograms for some points of the Crimean and Caucasian coasts of the Black Sea during tsunami induced by the earthquake of September 12, 1927: to the left – the mareographs' records [8, p. 273; 14, p. 392]; to the right – the sea level oscillations calculated within the framework of the model

В правой части рис. 3 для этих же пунктов показаны модельные мареограммы. Хорошо прослеживается момент прихода волн в пункт наблюдений. Во всех пунктах он сопровождается первоначальным поднятием уровня моря. Видно, что первая волна не всегда оказывается максимальной. Наблюдается качественное сходство периодов колебаний, рассчитанных численно и зафиксированных инструментально. Амплитуды колебаний, полученные численно, в некоторых пунктах превышают зафиксированные мареографами. Расхождение полученных результатов с имеющимися измерениями связано с невозможностью промоделировать данное событие более точно вследствие малого объема информации о параметрах очага землетрясения и о количестве и времени возникновения подводных толчков. Кроме того, на характеристики волн цунами в прибрежной зоне могут оказывать влияние и такие локальные факторы, как сгонно-нагонные или сейшевые колебания.

Как показывает анализ модельных мареограмм, наиболее интенсивные волны наблюдаются в ближайшем к очагу цунами пункте бассейна – в Ялте. Высота волн здесь может достигать 2 м. В Евпатории максимальная высота волны как расстояние от впадины до гребня составила около 0,2 м, в Севастополе – 0,4 м, в Феодосии – 0,5 м, в Керчи – 0,4 м, в Новороссийске – 0,5 м, в Туапсе – 0,3 м, в Батуми – 0,5 м.

Во втором численном эксперименте проводился детальный расчет эволюции цунами для южной части Крымского побережья. Этот участок расположен наиболее близко к очагу землетрясения и значительно более других подвержен воздействию волн цунами. Расчеты проводились на сетке с пространственным разрешением 50 м и шагом по времени 0,1 с. Для моделирования наката волн на берег применялся алгоритм, описанный в работе [19]. На жидких границах расчетной области ставилось условие свободного прохождения для длинных волн.

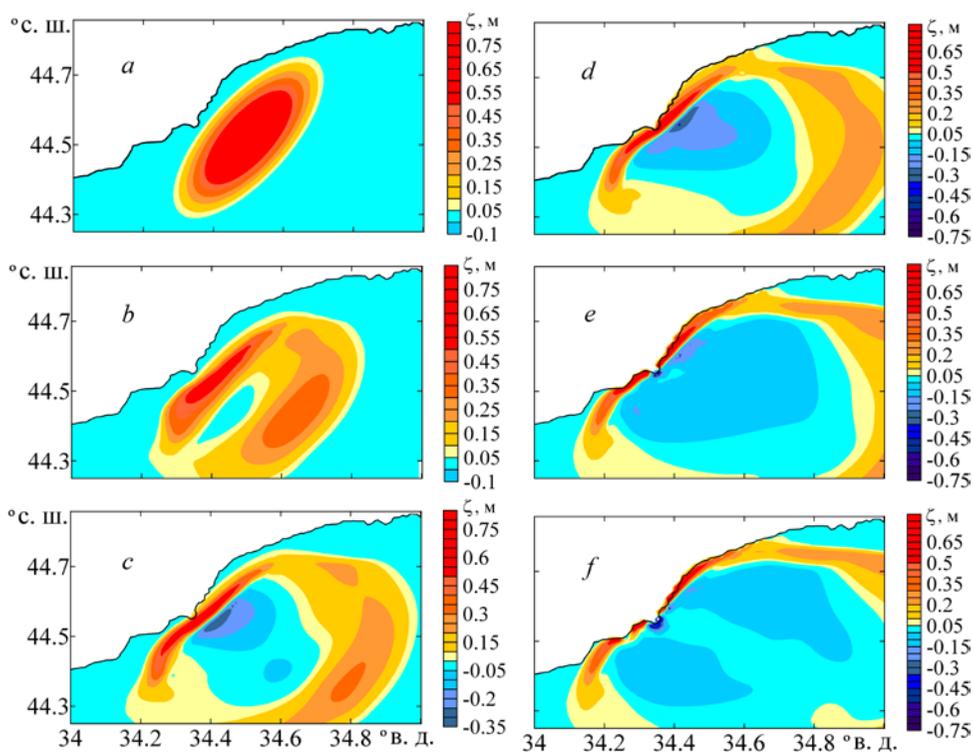
На рис. 4 представлены батиметрия и рельеф Южного берега Крыма. Данные по глубинам взяты из оцифрованных крупномасштабных навигационных карт Азово-Черноморского бассейна. Для описания рельефа суши использованы данные о возвышении земной поверхности из массива *Digital Terrain Elevation Data Level-1* с пространственным шагом 3" (URL: <https://eros.usgs.gov/>).



Р и с. 4. Батиметрия участка Черного моря в районе Южного берега Крыма. Отмеченные пункты: 1 – Алупка, 2 – Гаспра, 3 – Ялта, 4 – Никита, 5 – Гурзуф, 6 – Партеит, 7 – Алушта, 8 – Рыбачье, 9 – Морское, 10 – Судак

F i g. 4. Bathymetry of the Black Sea area in the region of the Crimea Southern coast. 1 – Alupka, 2 – Gaspra, 3 – Yalta, 4 – Nikita, 5 – Gurbzuf, 6 – Partenit, 7 – Alushta, 8 – Rybachie, 9 – Morskoe, 10 – Sudak

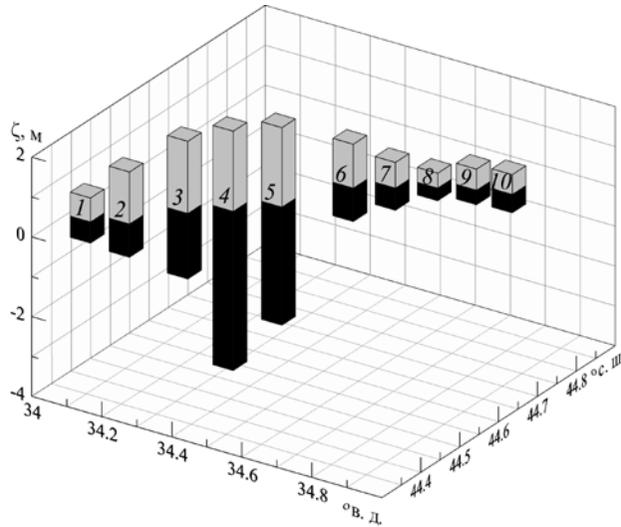
Результаты расчета формирования волн цунами от эллиптического начального возвышения уровня моря показаны на рис. 5. На начальной стадии эволюции цунами происходит опускание центральной части начального возвышения уровня моря, затем формируется кольцевая волна цунами (рис. 5, *b*). Высота волны наибольшая в направлениях, перпендикулярных продольной оси эллиптической зоны генерации. При подходе волн к берегу происходит уменьшение их длин. На мелководье высоты волн увеличиваются, их передний фронт становится более крутым вследствие уменьшения глубины бассейна в направлении берега. Далее начинается процесс наката волн на берег, который состоит в попеременном движении уровня моря вверх по берегу и откате от него, при этом происходит либо затопление, либо осушение побережья. Время добегания первой волны до ближайшего участка побережья составляет ~ 5 мин.



Р и с. 5. Структура волнового поля при распространении волн цунами из эллиптического возвышения, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г., в моменты времени 0 с (*a*), 100 с (*b*), 200 с (*c*), 250 с (*d*), 300 с (*e*), 400 с (*f*)

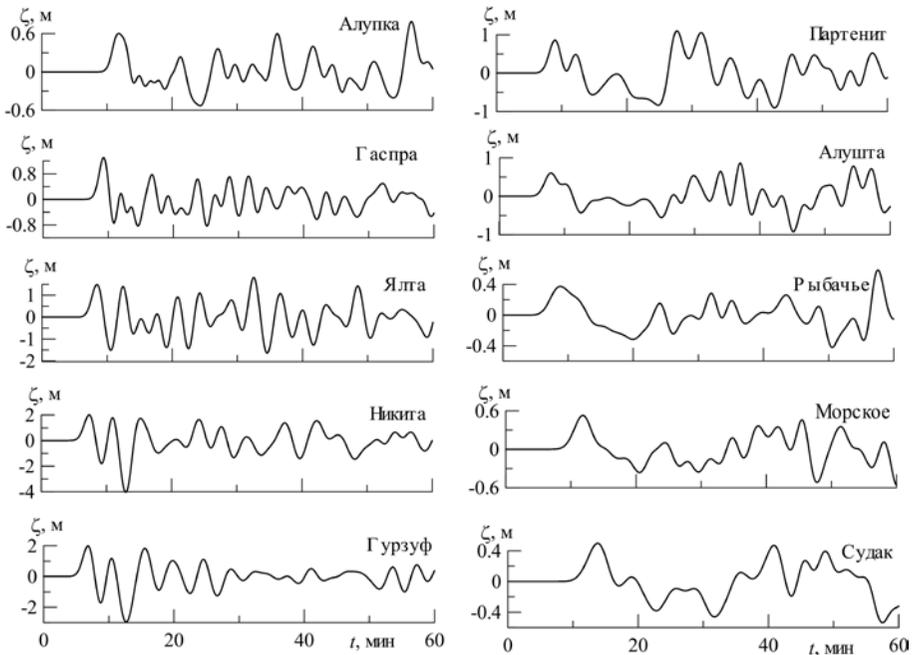
F i g. 5. The wave field structure at the tsunami waves' propagation from the elliptical elevation induced by the earthquake of September 12, 1927 at the time moments 0 s (*a*), 100 s (*b*), 200 s (*c*), 250 s (*d*), 300 s (*e*), 400 s (*f*)

Рассмотрим амплитудные характеристики волн цунами на исследуемом участке побережья. На рис. 6 показаны максимальные подъемы и опускания уровня моря при накате волн на берег для ряда пунктов Южного берега Крыма. Как видно, подъемы уровня могут достигать 2 м, а в некоторых пунктах (Никита, Гурзуф) понижения уровня по абсолютной величине превышают высоту наката.



Р и с. 6. Максимальные возвышения и понижения уровня моря при накате на берег волн цунами, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г., для следующих пунктов Южного берега Крыма: 1 – Алушка, 2 – Гаспра, 3 – Ялта, 4 – Никита, 5 – Гурзуф, 6 – Партенит, 7 – Алушта, 8 – Рыбачье, 9 – Морское, 10 – Судак

F i g. 6. Maximum sea level elevations and drops at the tsunami waves' run-up on the coast induced by the earthquake of September 12, 1927 for the following inhabited localities of the Crimea Southern coast: 1 – Alupka, 2 – Gaspra, 3 – Yalta, 4 – Nikita, 5 – Gurzuf, 6 – Partenit, 7 – Alushta, 8 – Rybachie, 9 – Morskoe, 10 – Sudak



Р и с. 7. Рассчитанные мареограммы для некоторых пунктов Южного берега Крыма при распространении и накате на берег волн цунами, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г.

F i g. 7. The calculated marigrams for some points of the Crimea Southern coast at the tsunami waves' propagation and run-up induced by the earthquake of September 12, 1927

На рис. 7 для нескольких пунктов исследуемого побережья показаны модельные мареограммы. Видно, что время подхода волны к берегу в различных пунктах составляет от 5 до 10 мин. Колебания уровня моря продолжают довольно долго после прихода первой волны. При этом первая волна не всегда является максимальной. Вследствие многократного отражения волн от берега наблюдаются попеременные поднятия и понижения уровня. Максимум волны цунами приходится на участок побережья от Гаспры до Алушты. Здесь амплитуды колебаний волн достигают 1–2 м. В Никите разброс амплитуд колебаний наибольший, до 6 м (от –4 до 2 м). Минимальные колебания уровня наблюдаются в Алушке, Рыбачьем, Морском, Судаке и составляют от –0,6 ... –0,4 до 0,4 ... 0,6 м.

Выводы

Выполнено численное моделирование эволюции волн цунами, вызванного Ялтинским землетрясением 12 сентября 1927 г. в бассейне Черного моря. Локальное возвышение уровня эллиптической формы со временем трансформируется в кольцевую волну, которая распространяется по всей акватории моря. В результате волна цунами подходит к побережью как плоская знакопеременная волна. Проведено сопоставление результатов моделирования с данными записей прибрежных мареографов. Амплитуды колебаний уровня моря в прибрежной зоне при распространении волн цунами из заданного эллиптического очага более значительные, чем те, которые были зафиксированы инструментально. Максимально подверженными влиянию волн оказались ближайшие к источнику генерации цунами участки побережья. Наиболее интенсивные волны, превышающие возвышение уровня моря в очаге, возникают в районе Ялты. В остальных пунктах подъемы уровня не превышают начальное возвышение в очаге. Более детальный расчет для южной части Крымского побережья показал, что высота наката волн цунами на берег может достигать 2 м, а глубина осушения побережья в некоторых пунктах – более 3 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никонов А. А.* Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика Земли. 1997. № 1. С. 86–96. URL: http://neotec.ginras.ru/comrus/_nikonov-a-a-1997-cunami-na-beregah-chernogo-i-azovskogo-morey.pdf (дата обращения: 21.02.2018).
2. *Nikonov A. A., Gusiakov V. K., Fleifel L. D.* 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. 2018. Vol. 59, iss. 2. P. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.01.016>
3. *Dotsenko S. F.* The Black Sea tsunamis // Atmospheric and Oceanic Physics. 1995. Vol. 30, no. 4. P. 483–489. URL: <http://eos.wdcb.ru/transl/izva/9404/pap12.ps> (дата обращения: 21.02.2018).
4. *Доценко С. Ф., Иванов В. А.* Катастрофические природные явления Азово-Черноморского региона. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 193 с.
5. *Григораиш З. К.* Черноморские цунами 1927 года по мареографическим записям // Труды Морского гидрофизического института. 1959. Т. XVII. С. 59–67.
6. *Григораиш З. К.* Распространение цунами 1927 г. в Черном море // Труды Морского гидрофизического института. 1959. Т. XVIII. С. 113–116.
7. *Григораиш З. К., Корнева Л. А.* Волны цунами, сопровождавшие Анапское землетрясение 12 июля 1966 г. // Океанология. 1969. Т. IX, вып. 6. С. 988–995.

8. *Григораш З. К.* Обзор удаленных мареограмм некоторых цунами в Черном море // Труды Сахалинского комплексного научно-исследовательского института Дальневосточного научного центра. 1972. № 29. С. 271–278.
9. *Pelinovsky E.* Preliminary estimates of tsunami danger for the Northern part of the Black Sea // *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*. 1999. Vol. 24, iss. 2. P. 175–178. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(99\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(99)00015-0)
10. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalçiner [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2004. Vol. 109, C12023. <https://doi.org/10.1029/2003JC002113>
11. *Dotsenko S. F., Ingerov A. V.* Characteristics of tsunami waves in the Black Sea according to the data of measurements // *Physical Oceanography*. 2007. Vol. 17, iss. 1. P. 17–28. <https://doi.org/10.1007/s11110-007-0002-z>
12. *Доценко С. Ф., Ингеров А. В.* Численные оценки цунамиопасности Крымско-Кавказского побережья Черного моря // *Доповіді НАН України*. 2009. № 6. С. 119–125. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/8658> (дата обращения: 21.02.2018).
13. *Zaitsev A. I., Pelinovsky E. N.* Forecasting of tsunami wave heights at the Russian coast of the Black Sea // *Oceanology*. 2011. Vol. 51, iss. 6. P. 907–915. <https://doi.org/10.1134/S0001437011050225>
14. *Dotsenko S. F., Konovalov A. V.* Tsunami waves in the Black Sea in 1927: Observations and numerical modeling // *Physical Oceanography*. 1996. Vol. 7, iss. 6. P. 389–401. <https://doi.org/10.1007/BF02509653>
15. *Oaie G., Seghedi A., Rădulescu V.* Natural marine hazards in the Black Sea and the system of their monitoring and real-time warning // *Geo-Eco-Marina*. 2016. No. 22. P. 5–28. <http://doi.org/10.5281/zenodo.889593>
16. Tsunami hazard in the Black Sea and the Azov Sea: a new tsunami catalogue / G. A. Papadopoulos [et al.] // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 11. P. 945–963. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-945-2011>
17. *Никонов А. А.* Крымские землетрясения 1927 года: неизвестные явления на море // *Природа*. 2002. № 9. С. 13–20. URL: <http://www.pseudology.org/Crimea/CrimeaEarthquake1927.pdf> (дата обращения: 21.02.2018).
18. *Шнюков Е. Ф., Митин Л. И., Цемко В. П.* Катастрофы в Черном море. Киев : Манускрипт, 1994. 297 с.
19. *Kowalik Z., Murty T. S.* Numerical simulation of two-dimensional tsunami runup // *Marine Geodesy*. 1993. Vol. 16, iss. 2. P. 87–100. <http://dx.doi.org/10.1080/15210609309379681>

Об авторах:

Базыкина Александра Юрьевна, младший научный сотрудник, отдел вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 5633-9877, ORCID: 0000-0002-1299-0983, ResearcherID: M-6839-2018**, aleksa.44.33@gmail.com

Михайличенко Сергей Юрьевич, младший научный сотрудник, отдел вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 7351-9338, ORCID: 0000-0001-6332-1395, ResearcherID: M-5788-2018**, liham1984@rambler.ru

Фомин Владимир Владимирович, старший научный сотрудник, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 6992-2688, ORCID: 0000-0002-9070-4460, ResearcherID: H-8185-2015**, v.fomin@ukr.net