

УДК 551.466.6

©А. Ю. Базыкина, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь
aleksa.44.33@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН ЦУНАМИ В АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ

Статья поступила в редакцию 10.12.2018, после доработки 01.08.2019

В рамках модели нелинейных длинных волн выполнено численное моделирование эволюции волн цунами в Азово-Черноморском бассейне для 10 эллиптических очагов, которые соответствовали уже имевшим место цунами-генным подводным землетрясениям. Рассчитано время добегания волн до побережья Черного и Азовского морей. Оно составило от нескольких минут для ближайших к очагу участков побережья до 4.5 часов для участков побережья вблизи Одессы. В результате численных экспериментов получены максимальные повышения уровня моря вдоль побережья Черного и Азовского морей при распространении волн цунами из зон локальных землетрясений. Выявлены наиболее подверженные воздействию волн цунами участки побережья. Повышения уровня моря вдоль побережья при прохождении волн цунами, вызванных землетрясениями магнитудой 7, составляют десятки сантиметров и в некоторых зонах достигают 1 м. Показаны зависимости амплитудных характеристик волн цунами от магнитуды землетрясения и от местоположения очагов генерации цунами. При смещении локального очага цунами в глубоководную часть моря амплитуды колебаний уровня вблизи берега возрастают. Увеличение магнитуды землетрясения приводит к усилению колебаний уровня моря, которые могут превысить высоту начального возмущения.

Ключевые слова: цунами в Азово-Черноморском бассейне, численное моделирование, амплитудные характеристики волн цунами.

A. Yu. Bazykina, V. V. Fomin

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

AMPLITUDE CHARACTERISTICS OF TSUNAMIS WAVES IN THE AZOV-BLACK SEA REGION

Received 10.12.2018., in final form 01.08.2019

A numerical simulation of the evolution of tsunami waves in the Azov-Black Sea basin was carried out for 10 elliptical foci, which corresponded to the already existing tsunami by underwater earthquakes. The time of the wave propagation to the coast of the Black and Azov Seas is calculated. It is from a few minutes for the nearest to the tsunami focus coastal regions to 4.5 hours for Odessa coast. The maximum sea level elevations along the coast of the Black and Azov Seas caused by the propagation of tsunami waves from zones of local earthquakes were obtained. The most dangerous coastal zones are identified. The sea level increase along the coast during the propagation of tsunami waves caused by earthquakes with magnitude about 7 reaches from tens of centimeters to more than 1 m. The changes of the amplitude characteristics of tsunami waves from the earthquake magnitude and the location of sources tsunami are shown. The displacement of the local tsunami focus to the deep part of the sea leads to growth of the amplitude of the level oscillations near the coast. The increase of the earthquake magnitude results in amplification of the sea level fluctuations, which may exceed the height of the initial perturbation.

Keywords: tsunami in the Azov-Black Sea basin, numerical modeling, amplitude characteristics of tsunami waves.

1. Введение

Как известно [1], Азово-Черноморский бассейн является областью сейсмической активности, что может, хотя и редко, но вызвать волны цунами. За последние 3000 лет здесь произошло 50 событий, которые вызвали цунами, из них 32 подводных землетрясения, породивших волны цунами различной интенсивности [2].

Первое известное событие отмечается в районе пролива Босфор, при котором наблюдалось несколько крупных волн [3]. Три явления цунами XX в. подводного сейсмического происхождения были

Ссылка для цитирования: Базыкина А.Ю., Фомин В.В. Моделирование волн цунами в Азово-Черноморском регионе // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 4. С. 21—31.

For citation: Bazykina A.Yu., Fomin V.V. Amplitude characteristics of tsunamis waves in the Azov-Black Sea region. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 4, 21—31.

DOI: 10.7868/S2073667319040038

зафиксированы с помощью мареографов. Это два события, вызванные землетрясениями 1927 г. и событие 1966 г. Ялтинские землетрясения в июне и в сентябре 1927 г. вызвали волны цунами, которые были зафиксированы прибрежными мареографами. Согласно записям мареографов, высота волн составляла от нескольких сантиметров до полуметра. По словам очевидцев, на некоторых участках крымского побережья наблюдались значительные колебания уровня моря. Так, в Балаклавской бухте наблюдалось снижение уровня моря на 0.5–1 м. После чего произошел стремительный подъем уровня на 0.5 м. В Севастополе также уровень моря снизился до 0.5 м [4].

26 декабря 1939 г. в г. Фатса (Турция) началось катастрофическое землетрясение, которое сопровождалось отступлением моря на 50 м, и затем набеганием на 20 м вглубь. При этом, по мареографическим данным, наибольшие колебания уровня моря составили: в Новороссийске — 53.4 см, Севастополе — 50 см, и Туапсе — 40 см [5].

В июле 1966 г. произошло землетрясение с эпицентром в Черном море, недалеко от Анапы. [6]. Сведения о волнах цунами, сопровождавших это землетрясение, получены лишь из мареографических данных, так как волны имели малую высоту, и подошли к берегу в темный период времени. Согласно данным мареографа, максимальная высота волны наблюдалась в Геленджике и составила 0.4 м. К последнему цунами, возникшему в результате подводного землетрясения, предположительно можно отнести событие 19 июля 2017 г. в Азовском море. Ранее считалось, что это явление — не что иное, как сгон воды, вызвавший колебания уровня моря до 1.5 м. Однако эти колебания наблюдались только в Белосарайском заливе, что не характерно для сгонно-нагонных процессов. В работе [7] это явление назвали «мини-цунами» и выдвинули предположение, что оно является отголоском землетрясения, произошедшего 15 июля на о. Крит.

Также стоит упомянуть о вероятности возникновения цунами несейсмического происхождения. Явление продолжительных колебаний уровня моря трехметровой высоты 7 мая 2007 г. вдоль болгарского побережья Черного моря и отсутствие цунамигенного землетрясения в этом районе, предположительно, было классифицировано как метеоцунами [8]. В то же время в [9] оценили возможность того, что источником мог стать подводный оползень.

Во время события 27 июня 2014 г. в районе Одессы (от Черноморки до Ильичевска) внезапно возникли две волны высотой 2–3 м, которые буквально смыли людей вместе с вещами, зонтами, шезлонгами. Несколько человек получили травмы. По разным мнениям, это событие могло иметь как метеорологическую природу, так и спровоцировано подводным оползнем [10].

Несмотря на то, что каталог цунами в Черном и Азовском морях постоянно пополняется новыми сведениями, информации на сегодняшний день об этом явлении в данном регионе недостаточно. Поэтому возникает необходимость проведения численного моделирования для определения возможных высот волн при распространении цунами в прибрежной зоне Черного и Азовского морей. Опасность явления цунами заключается в том, что волны цунами могут усиливаться другими природными явлениями — например, сгонно-нагонными колебаниями уровня моря, штормовыми волнами, сейшмами, что в результате может нанести существенный урон населению, инфраструктуре и экологии побережья [11].

Модельные расчеты черноморских цунами проводились в [11–19], где оценивались возможные высоты уровня моря вдоль побережья при распространении волн из модельных очагов цунами. В работах [12, 13] представлены результаты расчетов из круговых очагов, которые излучают волны одинаково во всех направлениях. В [14–20] моделирование выполнялось с учетом эффектов асимметрии очага генерации цунами. В [21] говорится, что наиболее вероятными цунамигенными зонами являются южный участок шельфа Крымского полуострова, Западно-Кубанское, Сухумское и Северное побережье Турции. В [14] изложены результаты численного моделирования особенностей распространения цунами в Черном море из зон наиболее вероятной сейсмической генерации волн. Анализ максимальных повышений и понижений уровня Азовского моря у берега при подводных землетрясениях различной магнитуды проводился в [22]. В работе [18] исследовались волновые характеристики при движении волн цунами из Черного моря через Керченский пролив в Азовское море и наоборот.

Настоящая работа посвящена исследованию распространения волн из модельных очагов генерации цунами в Черном и Азовском морях, которые соответствовали уже имевшим место цунамигенным подводным землетрясениям. Несмотря на то, что будущие события, вероятно, могут произойти и в других зонах, это не исключает возможности повторения подобных землетрясений. В результате численных экспериментов получены максимальные повышения уровня моря вдоль побережья Черного и Азовского морей при распространении волн цунами из зон локальных землетрясений с магнитудой 7. Для каждой зоны рассчитано время добегания волн до побережья Черного и Азовского морей.

Выявлены наиболее подверженные воздействию волн участки побережья. Также рассчитаны зависимости амплитудных характеристик цунами от магнитуды землетрясений и от местоположения очагов генерации цунами. Данное исследование не позволяет дать прогностические оценки цунами для всего Азово-Черноморского региона, однако оно направлено на проведение анализа опасности цунами участков побережья от различных источников. Детальное изучение этой проблемы может стать полезным при разработке защитных укреплений для диссипации энергии волн и проведении мероприятий по уменьшению разрушительного воздействия волн цунами.

2. Численная модель и входные данные

Для построения расчетной сетки использовалась батиметрия Азово-Черноморского бассейна, заданная на прямоугольной сетке 1920×960 узлов с 30-секундным пространственным разрешением (GEBCO1 Digital Atlas).

Моделирование генерации цунами осуществлялось заданием в начальный момент времени эллиптического смещения уровня моря с центром в точке (x_0, y_0) при нулевом поле скорости:

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

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 ; L и W – большая и малая оси эллипса соответственно.

В зависимости от магнитуды землетрясения M размеры эллиптической зоны генерации определялись по эмпирическим формулам для цунамигенных землетрясений [23]

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

Начальные смещения свободной поверхности, вызванные землетрясениями с магнитудой 7, имеют высоту $a_0 = 1$ м, большая и малая оси эллиптической области равны соответственно 50 и 29 км. Продольная ось эллипса ориентирована по направлениям изобаты 1000 м в Черном море и 10 м в Азовском.

Процесс распространения волн цунами описывается при помощи нелинейной двумерной модели поверхностных длинных волн, учитывающей квадратичное донное трение:

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

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 положения равновесия; $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t)$ – динамическая глубина жидкости; $H(x, y)$ – глубина бассейна при невозмущенном состоянии жидкости; g – ускорение свободного падения; $k = 0,013 \text{ с/м}^{1/3}$ – параметр шероховатости Маннинга.

Расчеты проводились на 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. Такой метод позволяет оценить изменения уровня моря вдоль побережья, поскольку для расчета наката волн на берег требуется более подробная батиметрическая сетка с проведением более сложных расчетов и большими затратами времени.

3. Результаты численных экспериментов

Произошедшие за 3000 лет 32 цунамигенных подводных землетрясения вызвали волны различной интенсивности. Очаги этих землетрясений представлены на рис. 1. Координаты положения очагов взяты из каталога исторических цунами «Historical Tsunami Database for the World Ocean» [http://tsun.

sscc.ru/nh/tsun_descr.html]. Все эти землетрясения происходили, в основном, на материковом склоне вдоль изобат, не превышающих 1500 м.

Численное моделирование проводилось для 10 сейсмически активных зон генерации цунами. Большинство этих зон находятся в Черном море: у Крымского побережья – вблизи Севастополя, Ялты, Феодосии; вдоль Кавказского побережья – вблизи Анапы, Сочи, Сухума; у побережья Турции – около порта Бартын, а также недалеко от пролива Босфор; и, наконец, у берегов Болгарии вблизи Варны. Один очаг расположен в Азовском море – вблизи м. Казантип.

Местоположение указанных очагов показано на рис. 2. Все они размещены таким образом, чтобы большая ось эллипса была вытянута вдоль изобаты. Черноморские очаги располагались вдоль изобаты 1000 м, а очаг в Азовском море (1) – вдоль изобаты 10 м.

Как показали расчеты, в результате опускания начального возвышения образуется кольцевая волна, которая распространяется неравномерно вследствие неоднородностей рельефа дна и спустя 3 ч. волновые движения охватывают всю акваторию Черного моря.

Время добегания волн до различных участков побережья показано на рис. 3. Видно, что наименьшее время добегания волн из эпицентра землетрясения до ближайших к очагу участков побережья

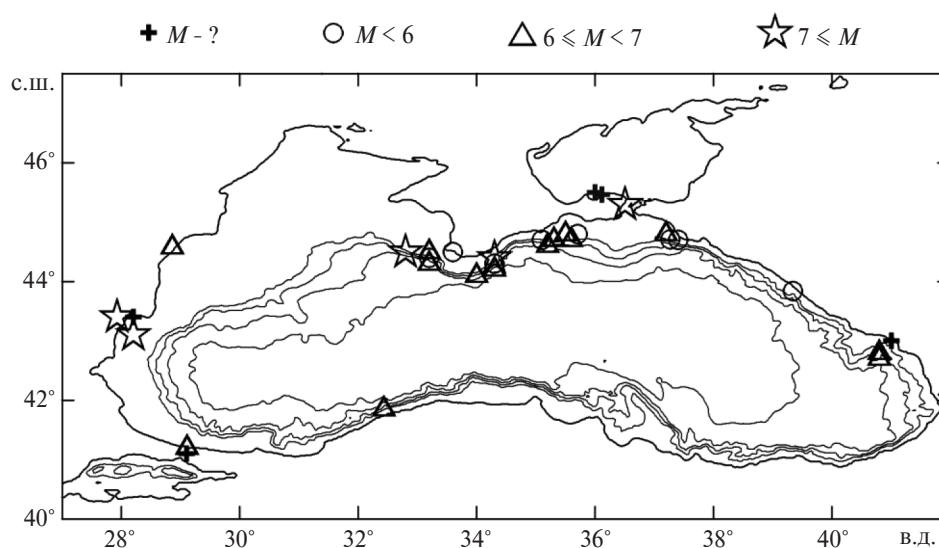


Рис. 1. Местоположение очагов цунамигенных подводных землетрясений в Азово-Черноморском бассейне, произошедших за 3000 лет.

Fig. 1. Location of foci of tsunamigenic underwater earthquakes in the Azov-Black Sea basin that occurred over 3000 years.

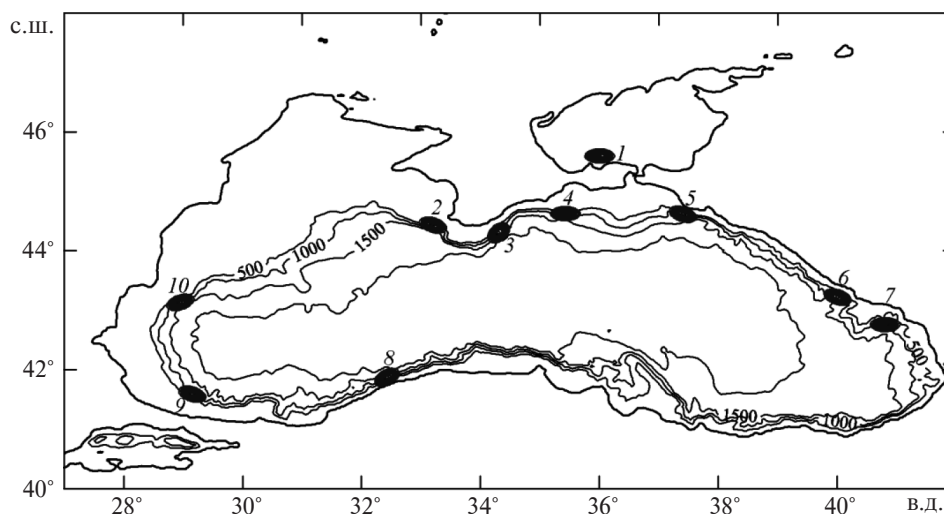


Рис. 2. Расчетные эллиптические очаги генерации цунами в Азово-Черноморском бассейне.

Fig. 2. Calculated elliptical focuses of tsunami generation in the Azov-Black Sea basin.

составляет несколько минут. Максимальное время распространения волн во всех случаях прослеживается для участков побережья вблизи Одессы и составляет от 3 до 4.5 ч, что обусловлено низкой скоростью распространения на шельфе в северо-западной части моря.

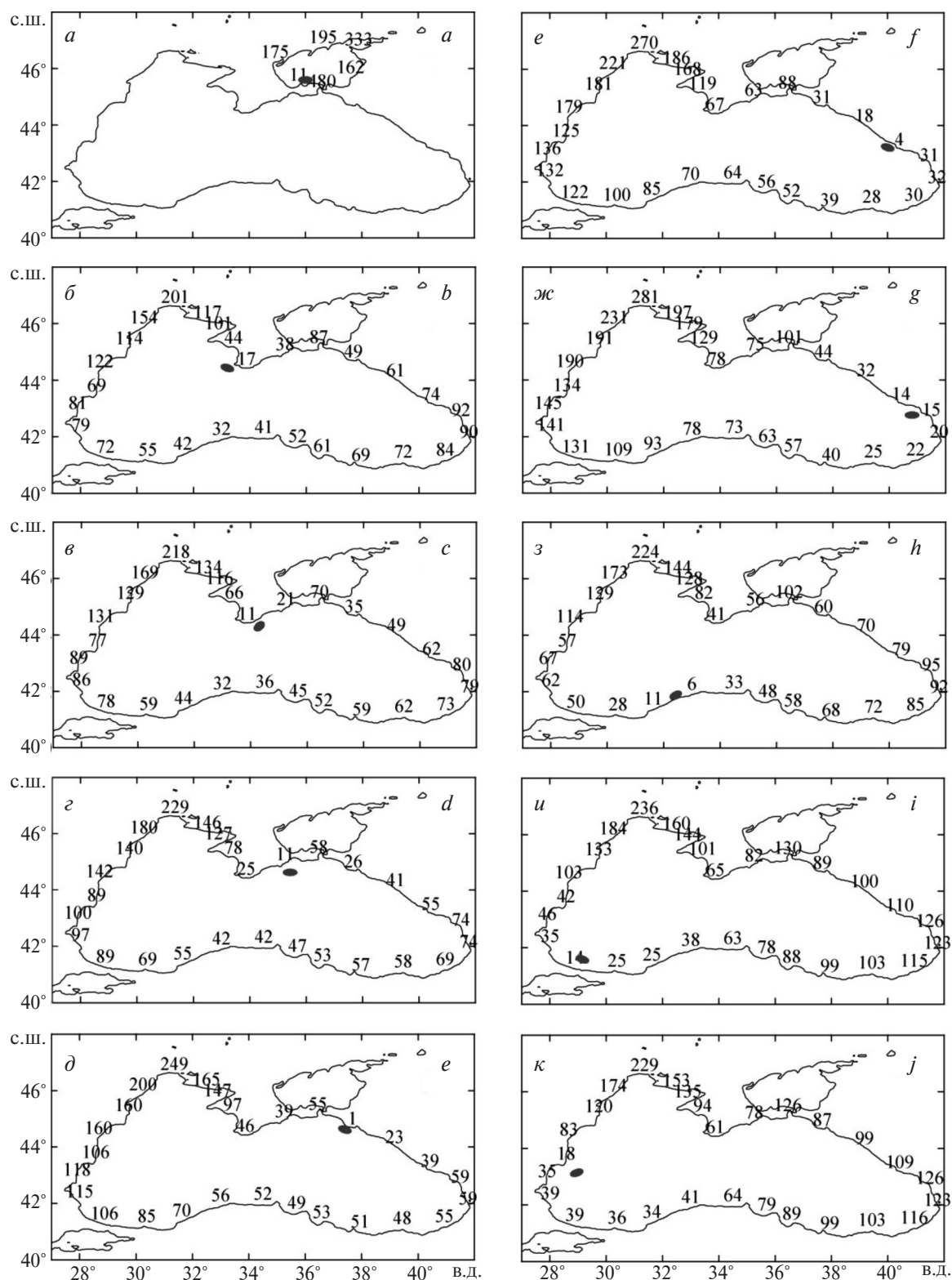


Рис. 3. Время добегания волн цунами (мин) до побережья Азово-Черноморского бассейна при различном положении эллиптических очагов цунами: а – 1, б – 2, в – 3, г – 4, д – 5, е – 6, ж – 7, з – 8, и – 9, к – 10.

Fig. 3. Travel time of tsunami waves (min) to the coast of the Azov-Black Sea basin at different positions of elliptical focuses of tsunami: a – 1, б – 2, в – 3, г – 4, е – 5, f – 6, g – 7, h – 8, i – 9, j – 10.

Если очаг землетрясения расположен вблизи Крымского побережья, то волны достигают Турецкого берега порядка получаса — 40 мин, Болгарского — около 1—2 ч, Кавказского — от получаса до полутора часов. Волны цунами из очага, который находится вдоль Кавказского побережья, добегают до берегов Крыма и Турции от 40 мин до полутора часов, до Болгарии — около 2 ч.

Из очага у Турецкого побережья волны достигают берегов Крыма в течение 40—60 мин, Кавказского и Кавказского побережий — за 1—2 ч. Из района Болгарского побережья волны добегают до берегов Турции за время от 40 мин 1.5. Крымского и Кавказского побережья волны от Болгарского побережья достигают за — 1.5—2 ч.

Максимальные повышения уровня моря вдоль побережья Азово-Черноморского бассейна при различном положении эллиптических очагов цунами показаны на рис. 4. Отсюда следует, что наибо-

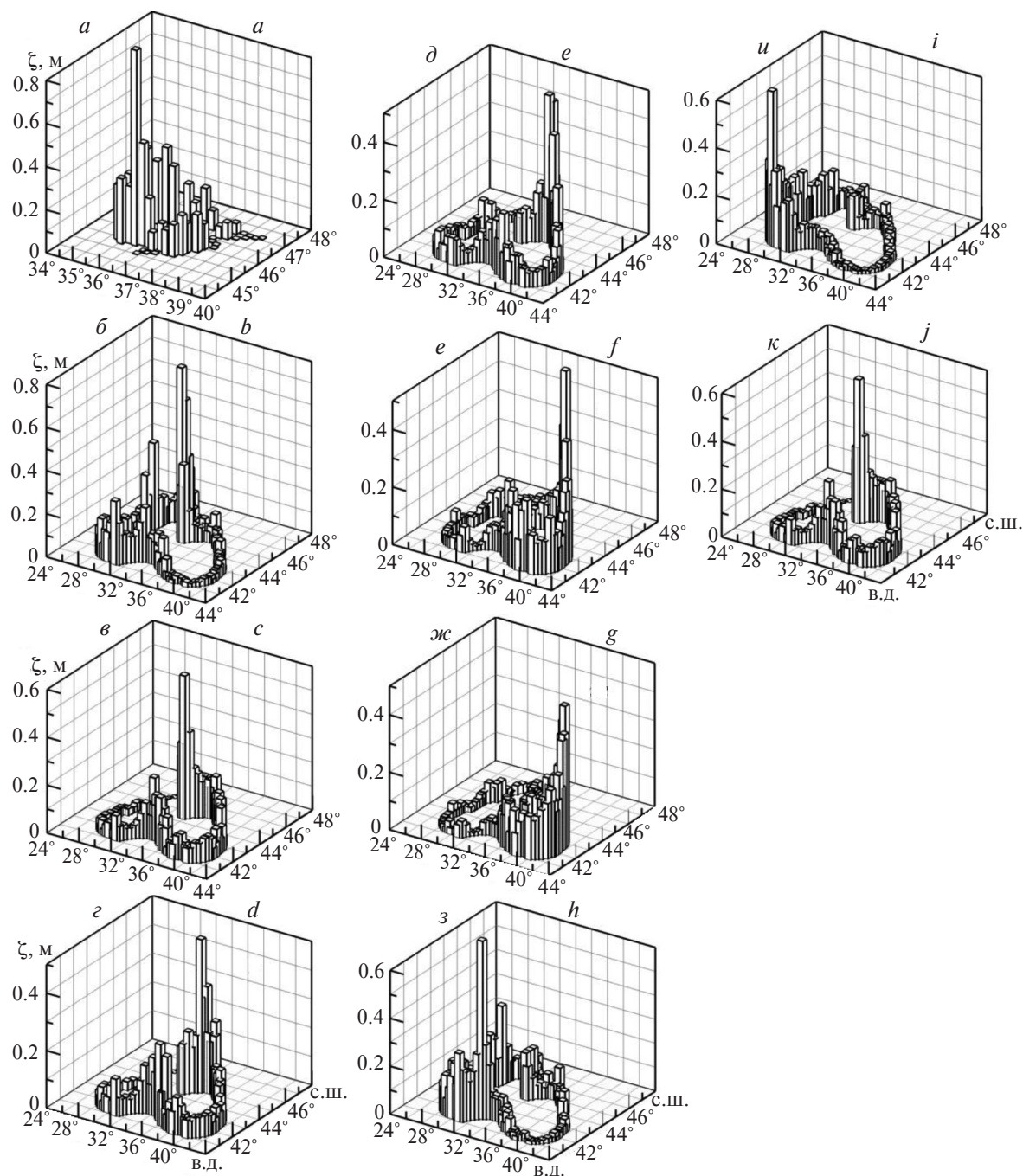


Рис. 4. Максимальные возвышения уровня моря при распространении волн из эллиптических очагов цунами:
а — 1, б — 2, в — 3, г — 4, д — 5, е — 6, ж — 7, з — 8, и — 9, к — 10.

Fig. 4. Maximum sea level elevations during wave propagation from elliptical tsunami foci:
а — 1, б — 2, в — 3, г — 4, е — 5, ф — 6, г — 7, h — 8, i — 9, j — 10.

лее подвержены цунами ближайшие к очагу участки побережья. Волны, которые распространяются из очага, расположенного в Азовском море (рис. 4, а), через Керченский пролив проникают в существенно более глубокий бассейн Черного моря и быстро затухают. Если очаг землетрясения расположен в западной части Черного моря, то максимальные высоты волн в этой части более значительные, чем в восточной, и наоборот, что также отмечалось в работе [24].

Распределение максимумов высот волн цунами вдоль побережья Азово-Черноморского бассейна показано на рис. 5. Как видно, наиболее подверженными цунами являются участки Крымско-Кавказского побережья и Болгарии. Северо-Западная часть Черного моря наименее подвержена воздействию волн цунами, вызванных подводными землетрясениями.

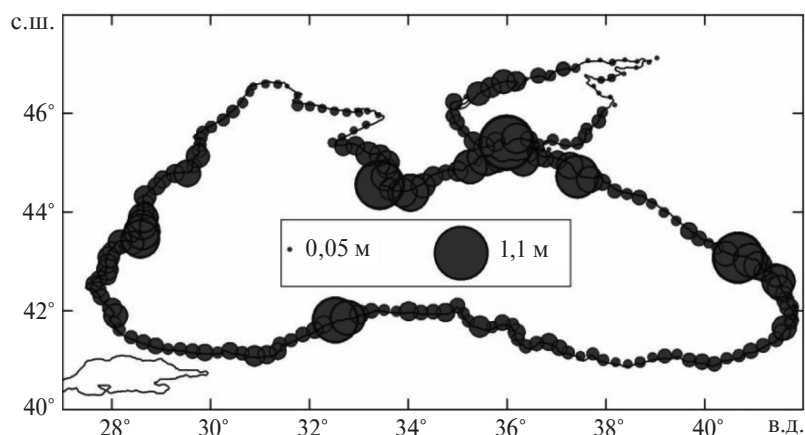


Рис. 5. Распределение максимальных возвышений уровня моря при распространении волн из 10 эллиптических очагов цунами.

Fig. 5. Distribution of maximum sea level elevations during wave propagation from 10 elliptical tsunami focuses.

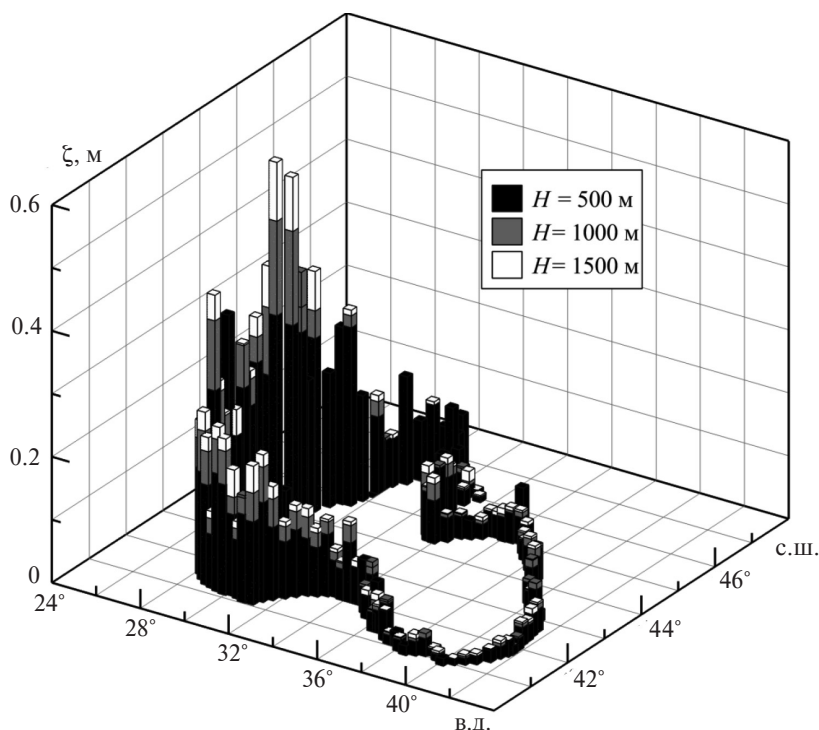


Рис. 6. Распределение максимальных повышений уровня моря вдоль побережья Черного моря при распространении волн из эллиптического очага генерации цунами 10 в зависимости от местоположения очага.

Fig. 6. The distribution of maximum sea level elevations along the Black Sea coast during the propagation of waves from an elliptical source of tsunami generation 10 depending on the location of the source.

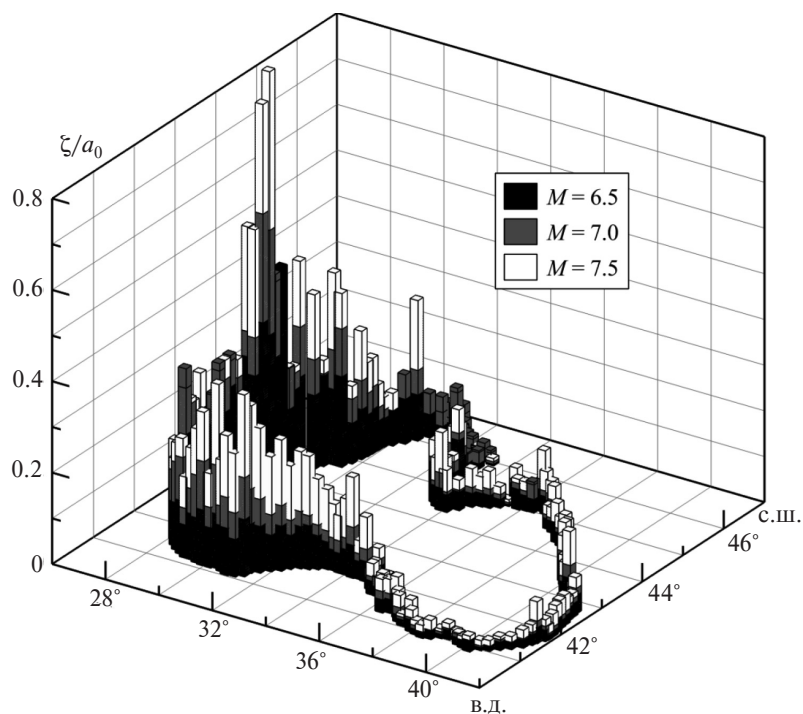


Рис. 7. Распределение относительных максимальных амплитуд волн вдоль побережья Черного моря при распространении волн из эллиптического очага генерации цунами 10, вызванного землетрясениями с магнитудой 6.5; 7.0; 7.5.

Fig. 7. Distribution of maximum wave amplitudes along the Black Sea coast during wave propagation from an elliptical focuses of tsunami generation 10, caused by earthquakes of magnitude 6.5; 7.0; 7.5.

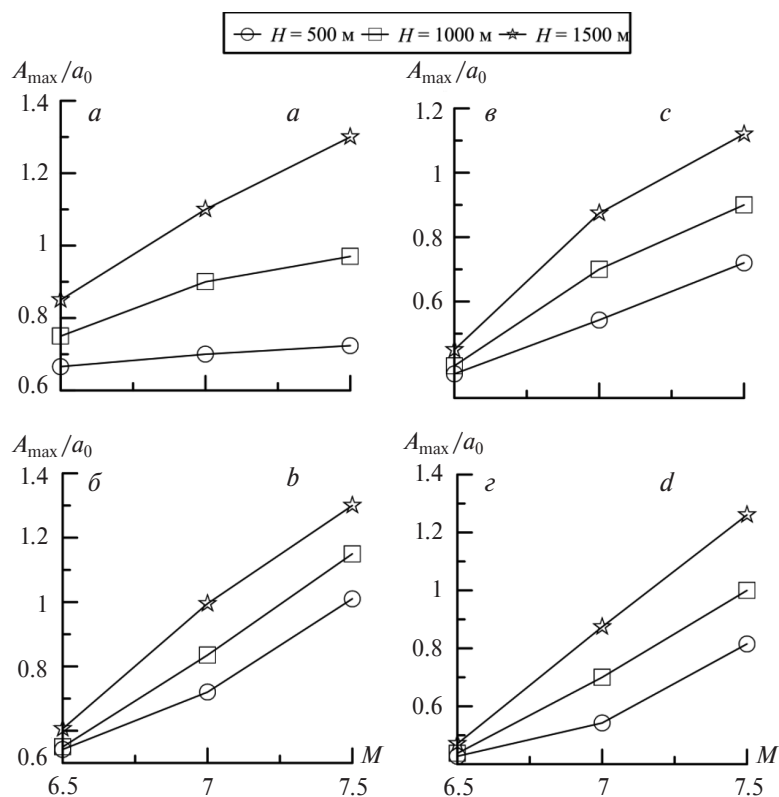


Рис. 8. Изменения максимальных повышений уровня моря в ближайших к очагу генерации цунами пунктах побережья в зависимости от магнитуды землетрясения для очагов: а – 2, б – 7, в – 8, г – 10.

Fig. 8. Changes in maximum sea level rise at the coastal points closest to the tsunami generation source, depending on the magnitude of the earthquake for the sources: а – 2, б – 7, в – 8, г – 10.

На примере очага 10, расположенного вблизи Варны, рассчитаны максимальные повышения уровня моря вдоль побережья в случае изменения местоположения эллиптического очага генерации цунами: над изобатами 500, 1000 и 1500 м. На рис. 6 показано распределение максимальных высот волн вдоль побережья Черного моря для этих трех случаев. Отсюда видно, что с увеличением глубины бассейна, в зоне которой происходит генерация локального очага цунами, колебания уровня моря возрастают. Так, в случае смещения очага генерации цунами из зоны с глубиной бассейна $H = 1000$ м в зону с $H = 1500$ м, происходит усиление волновых колебаний до 20%.

Также были получены зависимости амплитудных характеристик волн от магнитуды землетрясения, вызвавшего цунами. Согласно формулам (2), при землетрясении с магнитудой $M = 6.5$ параметры очага генерации цунами имеют следующие значения: $L = W = 25$ км, $a_0 = 0.4$ м. При $M = 7.5$ параметры очага следующие: $L = 100$ км, $W = 35$ км, $a_0 = 2.5$ м.

На рис. 7 представлены относительные повышения уровня моря при распространении волн из очага генерации цунами 10 при землетрясении с магнитудами, равными 6.5; 7.0 и 7.5. Увеличение магнитуды землетрясения приводит к росту начального возвышения уровня локального очага генерации цунами, что может значительно повлиять на высоту колебаний вдоль морского побережья. При землетрясении с магнитудой 7.5 повышения уровня моря при подходе волн цунами могут усиливаться до 40% по сравнению с колебаниями уровня, вызванными землетрясением с магнитудой 7.0.

Для нескольких очагов генерации цунами приведены оценки изменения максимальных повышений уровня моря в ближайших к очагам пунктах в зависимости от магнитуды землетрясения и местоположения очага. Из рис. 8 видно, что амплитуды волн увеличиваются с ростом магнитуды землетрясения, а также при смещении очага генерации цунами в более глубоководную область моря. При расположении очага в районе изобаты 1500 м максимальные повышения уровня моря вдоль побережья могут превышать высоту начального смещения уровня.

4. Заключение

Выполнена серия численных экспериментов по исследованию эволюции волн цунами в Азово-Черноморском бассейне для нескольких эллиптических очагов, расположенных в зонах повышенной сейсмической активности. Анализ результатов моделирования показал, что локальное возвышение уровня со временем трансформируется в кольцевую волну, которая распространяется по всей акватории. Время добегания волн цунами из различных очагов генерации до береговой зоны составляет от нескольких минут для ближайших к источнику участков побережья до 4 часов для участков черноморского северо-западного шельфа. Показано, что наиболее подвержены влиянию волн ближайшие к источнику генерации цунами участки побережья. Повышения уровня моря вдоль побережья при прохождении волн цунами, вызванных землетрясениями магнитудой 7, составляют десятки сантиметров и в некоторых зонах достигают 1 м. Подтверждено, что если очаг землетрясения расположен в западной части Черного моря, то максимальные высоты волн в этой части более значительные, чем в восточной, и наоборот. При смещении локального очага цунами в зону с большими глубинами амплитуды волн вблизи берега возрастают. При увеличении магнитуды землетрясения, вызвавшего цунами, колебания уровня моря могут превысить высоту начального смещения уровня.

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»).

Литература

1. Moldovan I.A., Diaconescu M., Partheniu R., Constantin A.P., Popescu E., Toma-Danila D. Probabilistic seismic hazard assessment in the Black sea area // Romanian Journal of Physics. 2017. V. 62, N 809. 14 p.
2. 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.
3. Никонов А.А. Аргонавты на пути в Понт: испытание цунами // Природа. 2017. № 2. С. 38—45.
4. Никонов А.А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика Земли. 1997. № 1. С. 86—96.
5. Григораши З.К., Корнева Л.А. Мареографические данные о цунами в Черном море при Турецком землетрясении в декабре 1939 г. // Океанология. 1972. Т. XII, вып. 3. С. 417—422.

6. Григораш З.К., Корнева Л.А. Волны цунами, сопровождавшие Анапское землетрясение 12 июля 1966 г. // *Океанология*. 1969. Т. 9, вып. 6. С. 988—995.
7. Рязанцев Г.Б., Монин В.Л. Мини-цунами на Азовском море // *Система Планета Земля*. М., Изд-во Моск. ун-та, 2018. С. 86—88.
8. Vilibić I., Šepić J., Rangelov B., Mahović N.S., Tinti S. Possible atmospheric origin of the 7 May 2007 western Black Sea shelf tsunami event // *Journal of Geophysical Research*. 2010. V. 115. C07006.
9. Rangelov B., Tinti S., Pagnoni G., Tonini R., Zaniboni F., Armigliato A. The nonseismic tsunami observed in the Bulgarian Black Sea on May, 7th 2007. Was it due to a submarine landslide? // *Geophys. Res. Lett.* 2008. 35. L18613.
10. Никонов А.А., Флейфель Л.Д. Цунами в Одессе: природный или рукотворный феномен? // *Природа*. 2015. № 4. С. 36—43.
11. 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*. 2012. 26(2). С. 287—300.
12. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н. Прогноз высот волн цунами на Российском побережье Черного моря // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 6. С. 965—973.
13. Пелиновский Е.Н., Зайцев А.И. Оценка и картирование опасности цунами на Черноморском побережье Украины // *Тр. Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*. 2011. № 3(90). С. 44—50.
14. Доценко С.Ф., Ингерев А.В. Характеристика волн цунами сейсмического происхождения в бассейне Черного моря по результатам численного моделирования // *Морской гидрофизический журнал*. 2013. № 3. С. 25—34.
15. Yalciner A., Pelinovsky E., Talipova T., Kurlin A., Kozelkov A., Zaitsev A. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental and numerical data // *Journal of Geophysical Research*. 2004. V. 109. C12023.
16. Доценко С.Ф., Ингерев А.В. Численные оценки цунамиопасности Крымско-Кавказского побережья Черного моря // *Доповіді НАН України*. 2009. № 6. С. 119—125.
17. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Колчина Е.А. Оценки максимальных волн цунами для побережья г. Сочи при возможных сильных землетрясениях // *Доклады Академии наук*. 2014. Т. 456, № 5. С. 604—609.
18. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Баранова Е.А., Тугарев А.М. Численное моделирование распространения Черноморских и Азовоморских цунами через Керченский пролив // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 2 (200). С. 111—122.
19. Доценко С.Ф., Ингерев А.В. Численное моделирование распространения и усиления волн цунами у Крымского полуострова и северо-восточного побережья Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 1. С. 3—15.
20. Мазова Р.Х., Кисельман Б.А., Осипенко Н.Н., Колчина Е.А. Анализ спектральных характеристик черноморских цунами // *Тр. Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*. 2013. № 2(99). С. 52—66.
21. Доценко С.Ф. Оценка уровня цунамиопасности Черного моря // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 1998. № 4. С. 19—23.
22. Доценко С.Ф., Ингерев А.В. Численный анализ цунамиопасности побережья Азовского моря // *Доповіді НАН України*. 2011. № 4. С. 105—110.
23. 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.
24. Доценко С.Ф. Излучение длинных волн из сейсмоактивных зон Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 1995. № 5. С. 3—9.

References

1. Moldovan I.A., Diaconescu M., Partheniu R., Constantin A.P., Popescu E., Toma-Danila D. Probabilistic seismic hazard assessment in the Black sea area. *Romanian Journal of Physics*. 2017, 62, 809, 14 p.
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, 59, 2, 193—205.
3. Nikonov A.A. Argonauts on their way to Pontus: tsunami experience. *Priroda*. 2017, 2, 38—45 (in Russian).
4. Nikonov A.A. Tsunami Occurrence on the Coasts of the Black Sea and the Sea of Azov. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1997, 33(1), 77—87.
5. Grigorash Z.K., Korneva L.A. Mareograph data about the Black Sea tsunami caused by the Turkish earthquake in December 1939. *Oceanology*. 1972, 12, 3, 417—422 (in Russian).
6. Grigorash Z.K., Korneva L.A. Tsunami Waves that Accompanied the Anapa Earthquake on July 12, 1966. *Oceanology*. 1969, IX (6), 988—995 (in Russian).

7. Ryazantsev G.B., Monin V.L. Mini-tsunami at the Azov Sea. *Systema Planeta Zemlya. M., Izd-vo Mosk. Un-ta*, 2018, 86—89 (in Russian).
8. Vilibić I., Šepić J., Rangelov B., Mahović N.S., Tinti S. Possible atmospheric origin of the 7 May 2007 western Black Sea shelf tsunami event. *Journal of Geophysical Research*. 2010, 115, C07006.
9. Rangelov B., Tinti S., Pagnoni G., Tonini R., Zaniboni F., Armigliato A. The nonseismic tsunami observed in the Bulgarian Black Sea on May, 7th 2007. Was it due to a submarine landslide? *Geophys. Res. Lett.* 2008, 35, L18613.
10. Nikonov A.A., Fleifel L.D. Tsunami in Odessa: Natural or man-made phenomenon? *Priroda*. 2015, 4, 36—43 (in Russian).
11. Dotsenko S.F. Numerical modeling of tsunamis in the Black, Azov and Caspian Seas as a necessary element of regional tsunami early warning systems. *Ecologicheskaya Bezopasnost Pribrezhnoj i Shelfovoj Zon i Kompleksnoe Ispolzovanie Resursov Shelfa*. 2012, 26(2), 287—300 (in Russian).
12. Zaitsev A.I., Pelinovsky E.N. Forecasting of Tsunami Wave Heights at the Russian Coast of the Black Sea. *Oceanology* [e-journal]. 2011, 51(6), 907—915.
13. Pelinovsky E.N., Zaytsev A.I. The estimation and mapping of tsunami dangerous at the Ukrainian Black Sea Coast. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2011, 3, 90, 44—50 (in Russian).
14. Dotsenko S.F., Ingerov A.V. Characteristics of tsunami waves of seismic origin in the Black Sea basin by numerical simulation results. *Morsk. Gidrofiz. Zh.* 2013, 3, 25—34 (in Russian).
15. Yalciner A., Pelinovsky E., Talipova T., Kurkin A., Kozelkov A., Zaitsev A. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental and numerical data. *Journal of Geophysical Research*. 2004, 109, C12023.
16. Dotsenko S.F., Ingerov A.V. Numerical assessments of tsunami hazard of the Crimean-Caucasian coast of the Black Sea. *Dopovidi NAN Ukrainy*. 2009, 6, 119—125 (in Russian).
17. Lobkovsky L.I., Mazova R.Kh., Kolchina E.A. Estimation of maximum heights of tsunami waves for the Sochi coast from strong submarine earthquakes. *Dokl. Earth Sc.* 2014, 456, 2, 749—754.
18. Lobkovsky L.I., Mazova R.Kh., Baranova E.A., Tugaryov A.M. Numerical Simulation of Propagation of the Black Sea and the Azov Sea Tsunami through the Kerch Strait. *Physical Oceanography* [e-journal]. 2018, 25(2), 102—113.
19. Dotsenko S.F., Ingerov A.V. Numerical simulation of the propagation and intensification of tsunami waves near the Crimean Peninsula and the northeast coast of the Black Sea. *Morsk. Gidrofiz. Zh.* 2010, 1, 3—15 (in Russian).
20. Mazova R.Kh., Kiselman B.A., Osipenko N.N., Kolchina E.A. Analysis of spectral characteristics of Black sea tsunami. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2013, 2(99), 52—66 (in Russian).
21. Dotsenko S.F. Tsunami hazard assessment for the Black Sea. *Moscow University Physics Bulletin*. 1998, 53(4), 17—22.
22. Dotsenko S.F., Ingerov A.V. Numerical analysis of the tsunami hazard of the Azov Sea coast. *Dopovidi NAN Ukrainy*. 2011, 4, 105—110 (in Russian).
23. Ulomov V.I., Polyakova T.P., Shumilina L.S. et al. The experience of mapping the earthquakes. *Seysmichnost i Seysmicheskoe Rayonirovanie Severnoy Evrazii. M., IFZ RAN*. 1993, 1, 99—108 (in Russian).
24. Dotsenko S.F. Long wave radiation from seismically active zones of the Black Sea. *Morsk. Gidrofiz. Zh.* 1995, 5, 3 —9 (in Russian).