

УДК 551.466.6

© А. Ю. Белоконов*, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Капитанская ул., 2, Севастополь

*E-mail: aleksa.44.33@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ

Статья поступила в редакцию 05.10.2020, после доработки 23.11.2020

Выполнено численное моделирование распространения волн цунами из нескольких сейсмических очагов Азово-Черноморского бассейна, представляющих потенциальную опасность для Керченского пролива. На первом этапе для всего Азово-Черноморского бассейна моделировалась эволюция четырех модельных очагов генерации цунами — два ближайших к проливу очага в Черном и Азовском морях, удаленный черноморский очаг, а также очаг, подобный тому, который вызвал Ялтинское землетрясение 12 сентября 1927 г. Начальные условия задавались в виде эллиптического возвышения уровня моря, параметры эллипса находились по эмпирическим формулам, соответствующим землетрясению с магнитудой 7. Для указанных очагов проанализированы мареограммы на входе в пролив со стороны Черного и Азовского моря. Показано, что на входе в пролив черноморские цунами обладают меньшими периодами по сравнению с азовоморскими. На втором этапе на сетке с высоким разрешением моделировалось проникновение волн цунами в Керченский пролив. В качестве краевых условий на жидких границах пролива использовались модельные данные из первого этапа. Выявленные области максимального повышения уровня моря расположены вдоль побережья пролива при распространении волн как со стороны Черного, так и из Азовского моря. Показано, что остров Тузла оказывает блокирующее влияние на распространение цунами в проливе.

Ключевые слова: цунамиопасность Азово-Черноморского региона, цунами в Керченском проливе, численное моделирование, максимальные повышения уровня моря.

© А. Ю. Белоконов*, В. В. Фомин

Marine Hydrophysical Institute of RAS, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

*E-mail: aleksa.44.33@gmail.com

SIMULATION OF TSUNAMI WAVE PROPAGATION IN THE KERCH STRAIT

Received 05.10.2020, in final form 23.11.2020

The results of numerical modeling of the propagation of tsunami waves from several seismic sources of the Azov-Black Sea basin, which represent a potential hazard for the Kerch Strait, are presented. At the first stage, for the entire Azov-Black Sea basin, the evolution of four model sources of tsunami generation was simulated — two sources closest to the strait in the Black and Azov Seas, a remote Black Sea source, and also a source similar to the one that caused the Yalta earthquake on the 12th September of 1927. The initial conditions were set in the form of an elliptical rise in sea level, the parameters of the ellipse were found according to empirical formulas corresponding to an earthquake with a magnitude of 7. For these foci, tide gauges were analyzed at the entrance to the strait from the Black and Azov Seas. It was revealed that at the entrance to the strait, the Black Sea tsunamis have shorter periods than the Azov Sea ones. At the second stage, the penetration of tsunami waves into the Kerch Strait was modeled on a high-resolution grid. Model data from the first stage were used as boundary conditions at the liquid boundaries of the strait. The identified areas of maximum sea level rise are located along the coast of the strait when waves propagate from both the Black and Azov Seas. It is shown that Tuzla Island has a blocking effect on the propagation of tsunami in the strait.

Key words: tsunami hazard of the Azov-Black Sea region, tsunami in the Kerch Strait, numerical modeling, maximum sea level rise.

1. Введение

Керченский пролив является важным звеном в формировании гидрологического режима Азово-Черноморского бассейна. Водообмен в проливе происходит попеременно из одного моря в другое благодаря ветру [1]. Помимо этого, пролив представляет собой важнейшую транспортную магистраль, а его побережье обладает развитой инфраструктурой. Для обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры возникает необходимость подробного изучения динамики вод в этом районе.

Ссылка для цитирования: Белоконов А.Ю., Фомин В.В. Моделирование распространения волн цунами в Керченском проливе // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 1. С. 67–78. doi: 10.7868/S207366732101007X

For citation: *Belokon A. Yu., Fomin V.V. Simulation of Tsunami Wave Propagation in the Kerch Strait. Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 1, 67–78. doi: 10.7868/S207366732101007X

Цунами в акваториях Азовского и Черного морей — редкое, но весьма вероятное событие, которое может произойти в любой момент [2]. Всего за 3 тыс. лет в этом регионе известно 50 случаев цунами [3]. Большинство из них имели сейсмическую природу, некоторые — оползневую или метеорологическую.

Побережье Керченского пролива может иметь высокую цунамиопасность в связи с узостью акватории пролива по сравнению с водными пространствами на юге и севере, откуда приходят цунами, а также извилистостью берегов, что может приводить к протяженному накату [4]. Район пролива находится в непосредственной близости от Южно-Азовской очаговой зоны [5]. Сам пролив долгое время считался сейсмически малоопасной областью. И лишь в 2015 г. была выделена Керченская сейсмогенерирующая зона. В ней за 2.6 тыс. лет отмечено семь сильных землетрясений [4, 6]. Так, в 63 г. до н. э. в северной части Керченского пролива, у западного берега произошло разрушительное землетрясение [4]. А в 1959 г. и 1969 г. при полном штиле на восточном побережье пролива наблюдались волны, которые накатывались на берег. Также известно два случая, когда источником цунами в проливе могли послужить грязевые вулканы. В 1799 г. вблизи пос. Темрюк наблюдались колебания уровня моря до 4 м. А в 1994 г. у пос. Тамань в безветренную погоду и абсолютный штиль к берегу стали подходить полуметровые волны [3]. В самом проливе в 1980-х гг. выявлены залегания несовместимых по фракциям слоев, которые иначе как воздействием сильного цунами объяснить не удастся [4].

Нельзя исключать появление здесь подобных событий в будущем. Сейсмический потенциал этих зон характеризуется вероятностью возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 7.0$ со средней частотой равной одному событию в несколько сотен лет [5]. К тому же, по прогнозам А.А. Никонова [7], вероятность реализации сильного землетрясения в Керченской зоне в ближайшие десятилетия повышается, поскольку временной промежуток после последнего сильного события длится свыше 260 лет (при среднем интервале 250 лет).

Настоящая работа посвящена исследованию распространения волн цунами в Керченском проливе, приходящих как из Черного, так и из Азовского моря. Моделирование черноморских и азовоморских цунами в проливе проводилось в [8]. В работе [9] представлены результаты моделирования распространения волн цунами в проливе от очага, расположенного у юго-востока Крымского полуострова. В этих двух работах показано, что при сильных подводных землетрясениях с $M \geq 7.0$ побережье Керченского пролива, а также берег о. Тузла, на котором расположена часть важнейшего гидротехнического сооружения — Крымского моста, могут подвергнуться воздействию волн большой высоты.

Ниже представлены результаты численного моделирования цунами в Керченском проливе, выполненные на сетке с пространственным разрешением 60 м, что позволяет более подробно, по сравнению с работами [8, 9], воспроизвести влияние нерегулярностей рельефа дна и береговой линии на распространение волн цунами в проливе. Задача решалась с помощью численной нелинейной модели длинных волн, ранее использованной для моделирования волн цунами в Азово-Черноморском бассейне [10]. Волновые возмущения на входе в пролив задавались из решения задачи цунами для всего бассейна. На основе численных экспериментов изучена эволюция волнового поля в проливе при разном положении источников цунами. Получены карты распределения зон, наиболее подверженных воздействию цунами.

2. Математическая модель

Численное моделирование волн цунами выполнялось в 2 этапа. На первом этапе с использованием батиметрических данных Азово-Черноморского бассейна с 30-секундным разрешением *General Bathymetric Chart of the Oceans Digital Atlas* (<https://www.gebco.net/>) проводилось моделирование эволюции гипотетических сейсмических очагов цунами.

Генерация очагов осуществлялась смещением свободной поверхности моря в форме эллипса. Задавались следующие начальные условия:

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

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

Оси эллиптической зоны генерации определялись в зависимости от магнитуды землетрясения M по эмпирическим формулам [11]:

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

Задача решалась численно на основе конечно-разностной аппроксимации системы нелинейных 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 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 в состоянии равновесия; g — ускорение свободного падения; $k = 0.013 \text{ с/м}^{1/3}$ — параметр шероховатости Маннинга. При решении поставленной задачи сила Кориолиса не учитывалась, поскольку в масштабах Азово-Черноморского бассейна ее влияние на динамику возможных здесь волн цунами незначительно.

При преобразовании батиметрических данных из географической системы координат в декартову погрешность минимальна в масштабах данного региона и составляет менее 1 %. Поэтому использовалась прямоугольная сетка, в которой 1° широты составлял 111 км, а 1° долготы — 80 км. Пространственный шаг составил 500 м, шаг по времени — 1 с. Береговые границы расчетной области проходили вдоль изобаты 4 м, где нормальная компонента полного потока принималась равной нулю.

На втором этапе моделировалось проникновение волн цунами в Керченский пролив. Батиметрия пролива получена на основе оцифровки крупномасштабных навигационных карт. Расчеты выполнялись на равномерной прямоугольной сетке с пространственным шагом $\Delta x = \Delta y = 60$ м и шагом интегрирования по времени $\Delta t = 0.1$ с. Береговая линия пролива ограничивалась изобатой 3 м, которая отдалена от линии уреза в пределах нескольких сотен метров, что на порядок меньше длины подходящей к берегу волны цунами. Поэтому полученные результаты можно считать приблизительными оценками изменения уровня моря вдоль побережья.

Полученные на первом шаге мареограммы выполняли роль граничных условий со стороны Черного или Азовского моря. При этом на противоположной жидкой границе ставилось условие свободного выхода волн:

$$\frac{\partial V}{\partial t} \pm C \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

где $C = \sqrt{gH}$ — фазовая скорость волн. Условие со знаком « \rightarrow » соответствует свободному выходу волн цунами в Черное море, знак « $+$ » задается для беспрепятственного распространения волн в Азовское море.

3. Результаты численных экспериментов

В численных экспериментах параметры очага генерации цунами определялись в зависимости от магнитуды землетрясения по эмпирическим формулам (2). Высота локального смещения поверхности моря a_0 в зоне землетрясения принималась равной 1 м, а большая и малая оси эллипса равнялись 50 и 29 км, что соответствует землетрясению магнитудой $M = 7$. Выбор такой магнитуды обусловлен тем, что в каталоге о черноморских цунами, произошедших вблизи Крымского побережья, нет сведений о более сильных землетрясениях [3]. Начальное возвышение располагалось так, чтобы большая ось эллипса была вытянута вдоль изобаты 1500 м, поскольку все известные черноморские цунамигенные землетрясения происходили на материковом склоне вдоль изобат, не превышающих этой величины. Исходя из этих соображений, рассматривалось четыре очага генерации цунами.

На рис. 1 показано положение эллиптических очагов генерации цунами: 1 и 2 — очаги, наиболее близко расположенные к Керченскому проливу как со стороны Черного, так и Азовского моря; 3 — удаленный черноморский очаг; 4 — очаг, подобный тому, который вызвал Ялтинское землетрясение 12 сентября 1927 г.

Как показали результаты моделирования, при опускании эллиптического возвышения образуются волны цунами, которые распространяются по всей акватории бассейна. Возмущения, сгенерированные

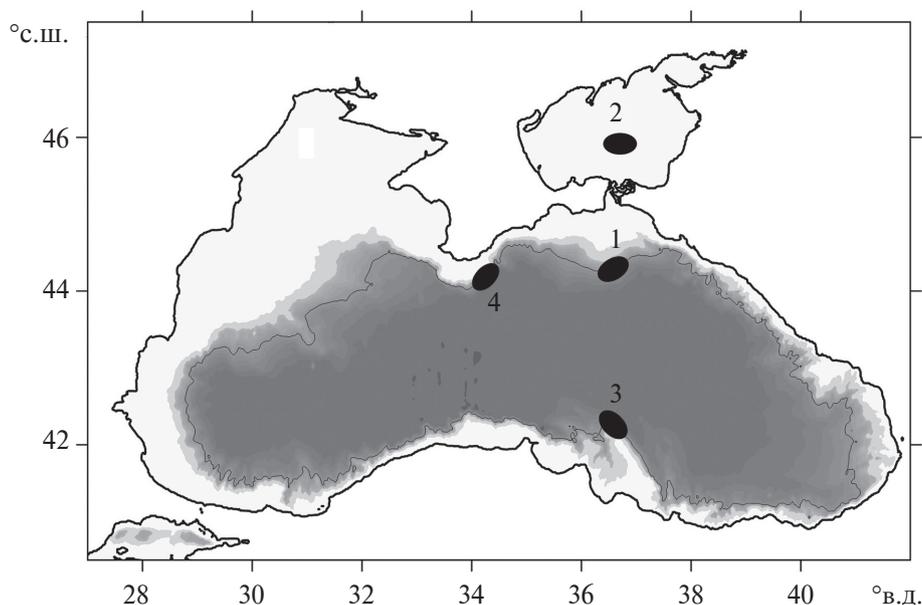


Рис. 1. Местоположение цунамигенных очагов в Черном и Азовском морях.

Fig. 1. Location of tsunamigenic foci in the Black and Azov Seas.

очагом 1, достигают южной границы Керченского пролива спустя 40 мин. Мареограмма для этой границы приведена на рис. 2, а. Мареограмма на северной границе Керченского пролива для очага 2, расположенного в Азовском море, показана на рис. 2, б. Волны из этого очага добегают до границы пролива за 2 ч. Мареограмма для удаленного очага 3 показана на рис. 2, в. В этом случае волны пересекают глубоководную часть моря всего за 30 мин, достигая пролива за 1 ч 10 мин. Из очага 4, расположенного в Ялтинской сейсмогенерирующей зоне, волны добегают до входа в пролив за 1 ч.

Из рис. 2, а–в видно, что черноморские волны цунами являются достаточно высокочастотными по сравнению с волнами, пришедшими из Азовского моря. Это связано с принципиальной разницей в изменениях глубины обоих бассейнов. Черноморский очаг цунами локализуется в глубоководной зоне. Периоды (длины волн) колебаний быстро уменьшаются при подходе к проливу под воздействием резкого уменьшения глубин. Глубины Азовского моря сопоставимы с глубинами Керченского пролива, поэтому у северной границы пролива волны цунами сохраняют свою первоначальную частоту. Наибольшей является первая — головная волна. Ее амплитуда для черноморских очагов 1, 3 и 4 составила соответственно 0.3 м, 0.2 м и 0.15 м; для Азовоморского очага 2—0.4 м.

Батиметрия Керченского пролива показана на рис. 3. Длина пролива составляет 45 км, его ширина меняется от 4.5 до 15 км, а наибольшая глубина равна 18 м. В качестве граничного условия на южной (или северной) жидкой границе пролива использовалась одна для всей этой границы мареограмма, полученная из решения задачи на грубой сетке. Такой упрощенный подход представляется вполне оправданным, поскольку рассматриваемые очаги цунами расположены достаточно далеко от пролива и волновой фронт на входе в пролив является практически плоским.

На рис. 4 показаны этапы эволюции волн цунами в Керченском проливе из черноморского сейсмического очага 1. Как видно, при проникновении волн в пролив их фронт приобретает форму дуги, длины волн существенно уменьшаются (рис. 4, а, б). Через 20 мин. после входа цунами в пролив волны достигают о. Тузла. Остров оказывает блокирующее влияние на распространение волн цунами в северном направлении. Тем не менее, часть энергии цунами проникает в северную часть пролива (рис. 4, в) на участке между северо-восточной оконечностью острова и Павловским мысом и на участке между юго-восточной оконечностью острова и Таманским полуостровом.

Далее происходит многократное отражение волн от твердых границ (рис. 4, г, д). В северной и восточной частях пролива волновые возмущения постепенно затухают вследствие их продолжительного распространения по мелководью (рис. 4, е). Спустя 1 ч 40 мин с момента входа в Керченский пролив волновые возмущения охватывают всю его акваторию и со временем покидают пролив через его жидкие границы.

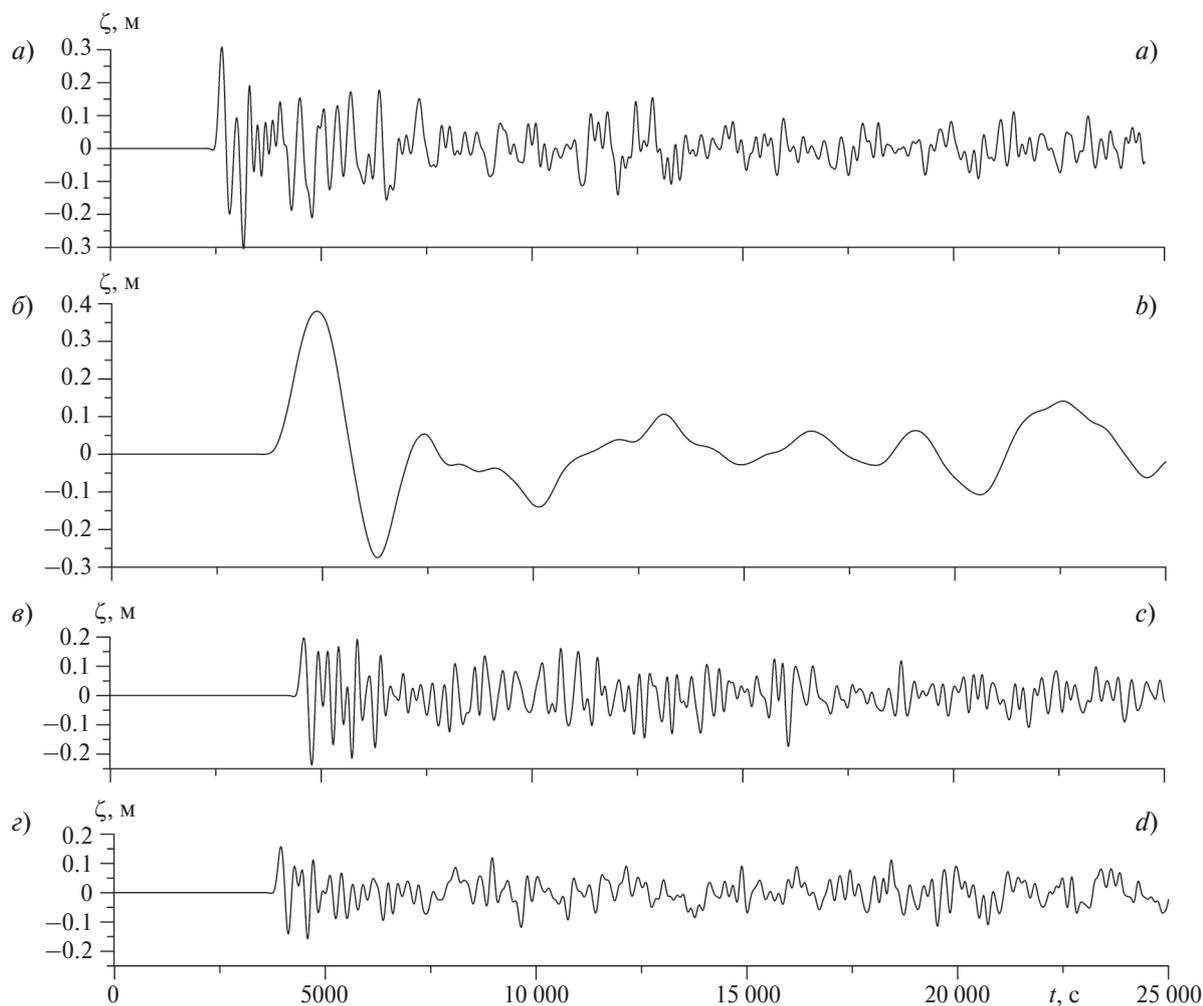


Рис. 2. Колебания уровня моря на границе Керченского пролива, вызванные очагами цунами в Черном и Азовском морях: *a* — очаг 1; *b* — очаг 2; *c* — очаг 3; *d* — очаг 4.

Fig. 2. Sea level fluctuations at the border of the Kerch Strait caused by tsunami focuses in the Black and Azov Seas: *a* — focus 1; *b* — focus 2; *c* — focus 3; *d* — focus 4.

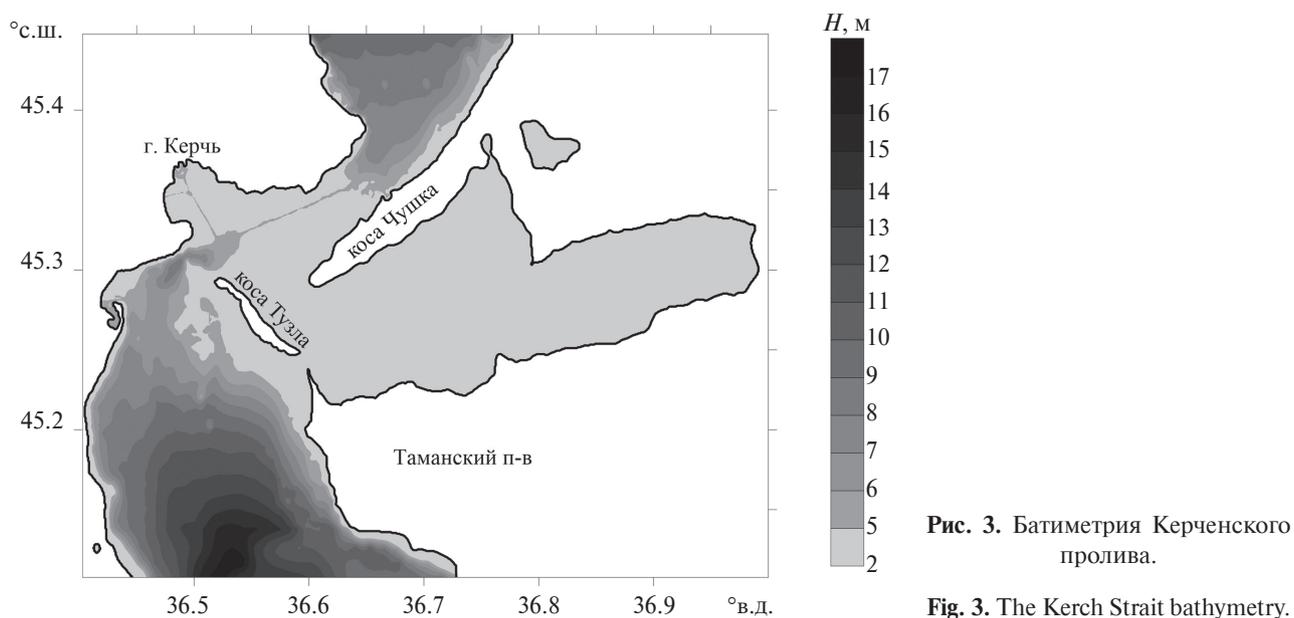


Рис. 3. Батиметрия Керченского пролива.

Fig. 3. The Kerch Strait bathymetry.

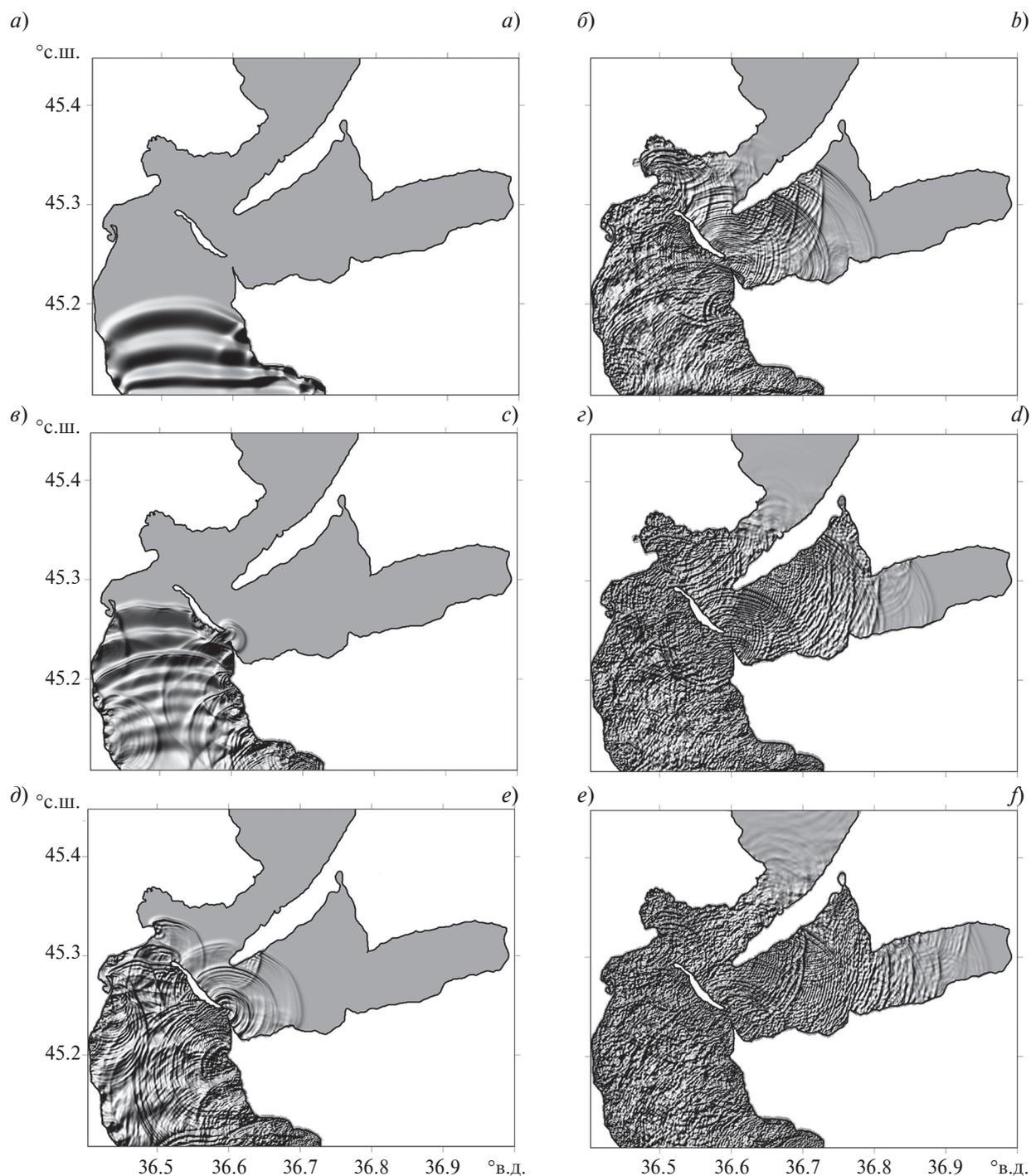


Рис. 4. Эволюция распространения волны цунами в Керченском проливе из сейсмического очага 1, расположенного в Черном море, в моменты времени: *a* — 1 ч 20 мин, *b* — 1 ч 25 мин, *в* — 1 ч 35 мин, *г* — 1 ч 50 мин, *д* — 2 ч 10 мин; *e* — 2 ч 25 мин.

Fig. 4. Evolution of tsunami wave propagation in the Kerch Strait from seismic focus 1 located in the Black Sea, at times: *a* — 1 h 20 min, *b* — 1 h 25 min, *c* — 1 h 35 min, *d* — 1 h 50 min, *e* — 2 h 10 min, *f* — 2 h 25 min.

На рис. 5 представлены этапы распространения волн цунами из азовоморского очага 2. Из северной части пролива волна цунами проникает в его узкую часть, расположенную между побережьем Керчи и косой Чушка (рис. 5, *a*, *b*). Спустя полчаса цунами подходит к о. Тузла. Головная волна излучается в южную часть пролива слева от Тузлы. При взаимодействии цунами с островом возникают более короткие волны, которые частично отражаются обратно, а частично проникают в южную область пролива (рис. 5, *г*, *д*). От-

раженные от Тузлы волны проникают также и в Таманский залив (рис. 5, *d, e*). В причерноморской области пролива высота волн значительно уменьшается из-за проникновения из мелководной зоны в более глубоководную (рис. 5, *e*). Со временем волны покидают акваторию пролива, проникая обратно в Азовское, а также Черное море.

Волновая картина, подобная рис. 4, характерна для черноморских цунами и из других очагов — при распространении волн из удаленного очага 3 (рис. 6) и из Ялтинского очага 4 (рис. 7).

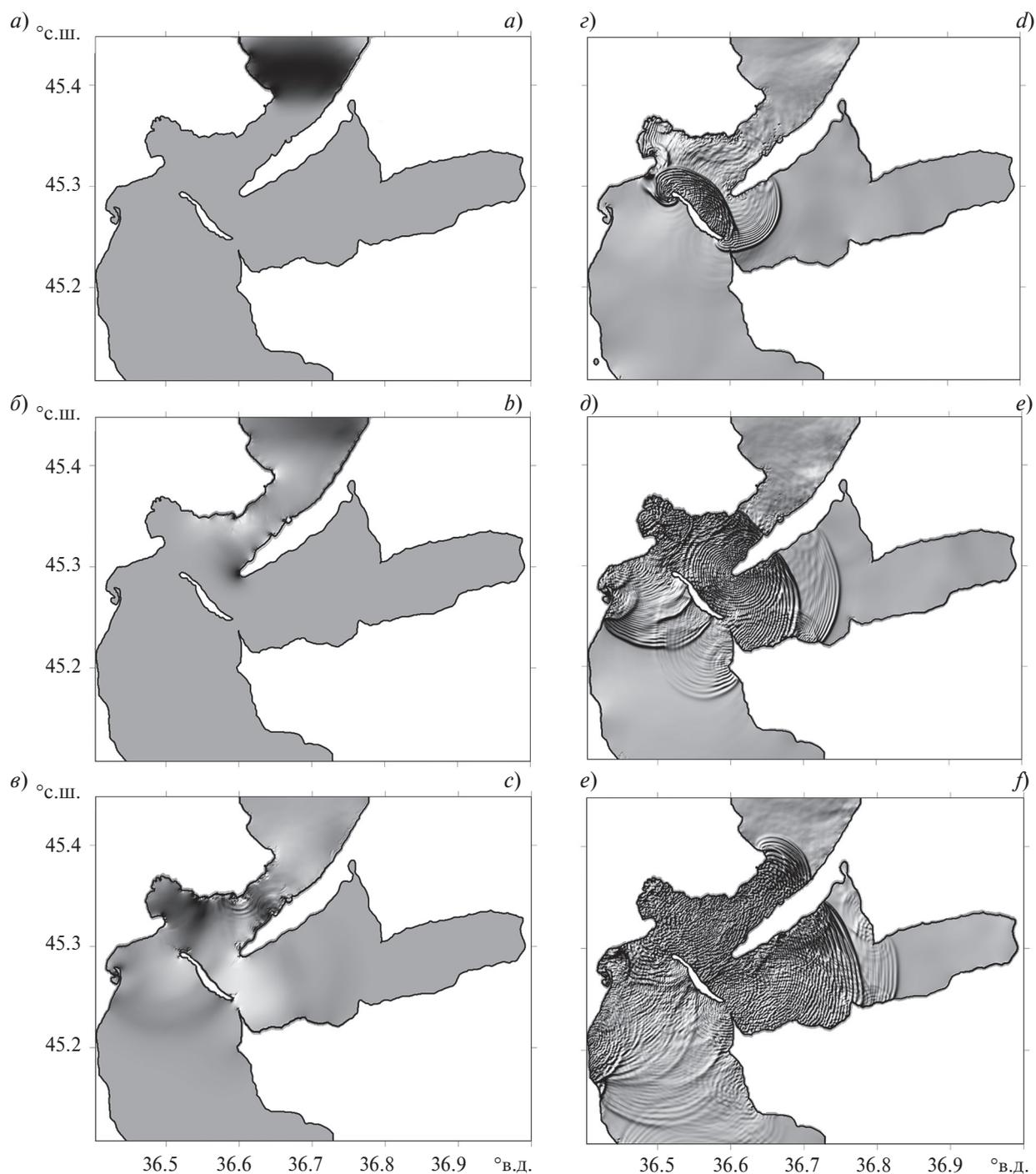


Рис. 5. Эволюция распространения волны цунами в Керченском проливе из сейсмического очага 2, расположенного в Азовском море, в моменты времени: *a* — 2 ч 15 мин, *b* — 2 ч 30 мин, *c* — 2 ч 50 мин, *d* — 3 ч 5 мин, *e* — 3 ч 20 мин; *f* — 3 ч 35 мин.

Fig. 5. Evolution of tsunami wave propagation in the Kerch Strait from seismic focus 2, located in the Azov Sea, at times: *a* — 2 h 15 min, *b* — 2 h 30 min, *c* — 2 h 50 min, *d* — 3 h 5 min, *e* — 3 h 20 min, *f* — 3 h 35 min.

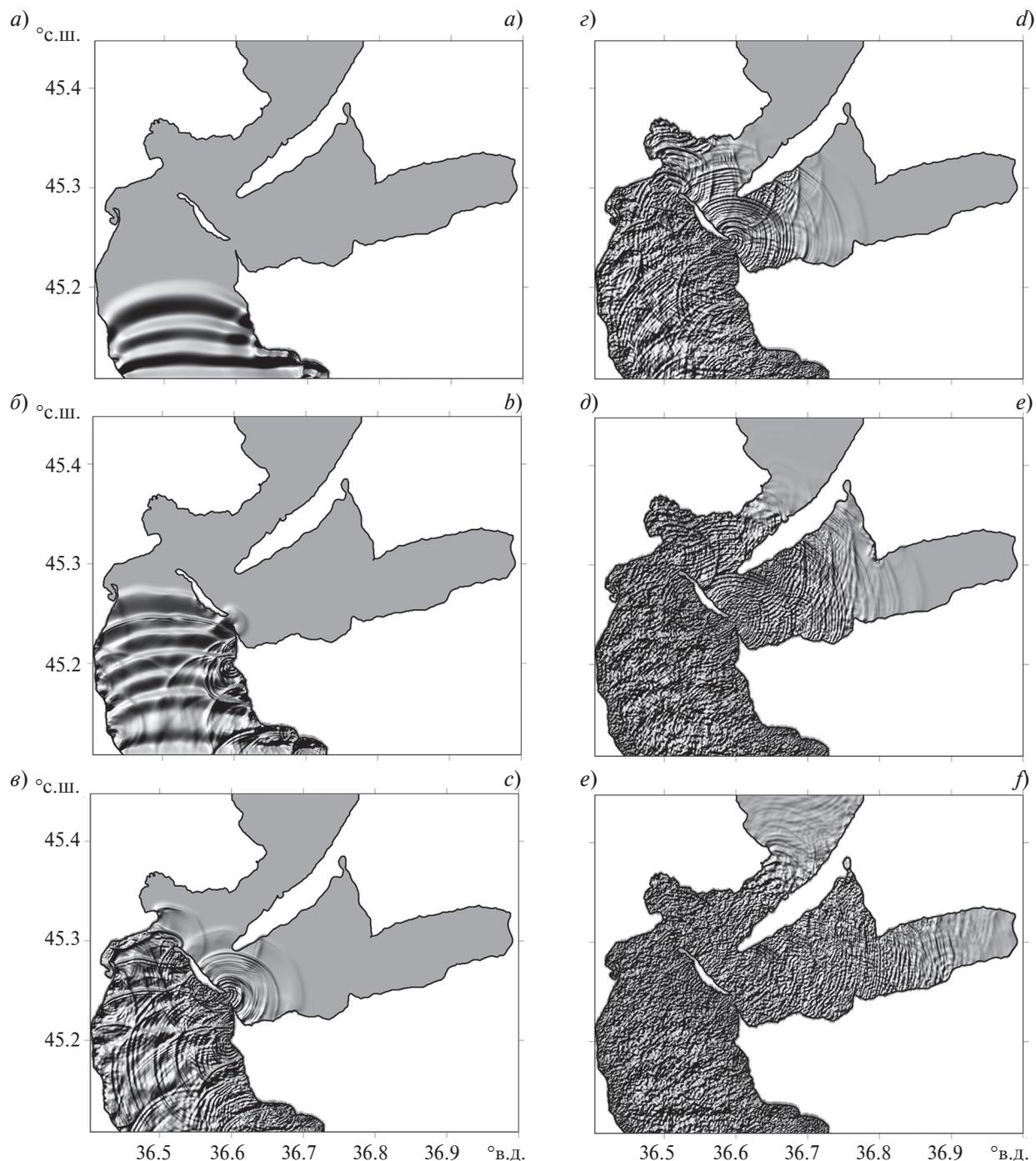


Рис. 6. Эволюция распространения волны цунами в Керченском проливе из удаленного сейсмического очага 3, расположенного в Черном море, в моменты времени: *a* — 2 ч 20 мин, *б* — 2 ч 25 мин, *в* — 2 ч 35 мин, *г* — 2 ч 50 мин, *д* — 3 ч 10 мин; *е* — 3 ч 25 мин.

Fig. 6. Evolution of tsunami wave propagation in the Kerch Strait from a remote seismic focus 3 located in the Black Sea at times: *a* — 2 h 20 min, *b* — 2 h 25 min, *c* — 2 h 35 min, *d* — 2 h 50 min, *e* — 3 h 10 min, *f* — 3 h 25 min.

Для исследования зон, наиболее подверженных воздействию цунами, были рассчитаны максимальные возвышения уровня моря в ряде пунктов вдоль побережья Керченского пролива. На рис. 8, *a* показаны максимально возможные высоты волн вдоль берега при распространении черноморских цунами. Наибольшие высоты получены для юго-восточной части пролива, где они достигают 2 м, а также у южного побережья Тузлы — свыше 1 м. Для азовоморских цунами максимальные амплитуды колебаний уровня моря возникают вблизи северного побережья Тузлы, где они составляют 1.5 м (рис. 8, *б*). В самой узкой части пролива — между побережьем г. Керчь и косой Чушка — максимальные высоты достигают 1 м.

При прохождении в Керченском проливе волн из удаленного черноморского очага 3 уровень моря может повышаться на 1.4 м вдоль юго-восточного побережья (рис. 8, *в*). Здесь также отмечаются максимальные колебания уровня моря и для очага 4, расположенного в Ялтинской сейсмогенерирующей зоне. Максимальная амплитуда колебаний в этом случае вдвое меньше и составляет 0.65 м (рис. 8, *з*).

Таманский залив остается зоной, слабо подверженной воздействию волн цунами. Он защищен с юга и юго-запада Таманским полуостровом, с запада — о. Тузла, а с севера и северо-запада — косой Чушка. Наибольшие колебания уровня моря здесь могут достигать 0.5 м при распространении азовоморских волн цунами, отраженных от Тузлы.

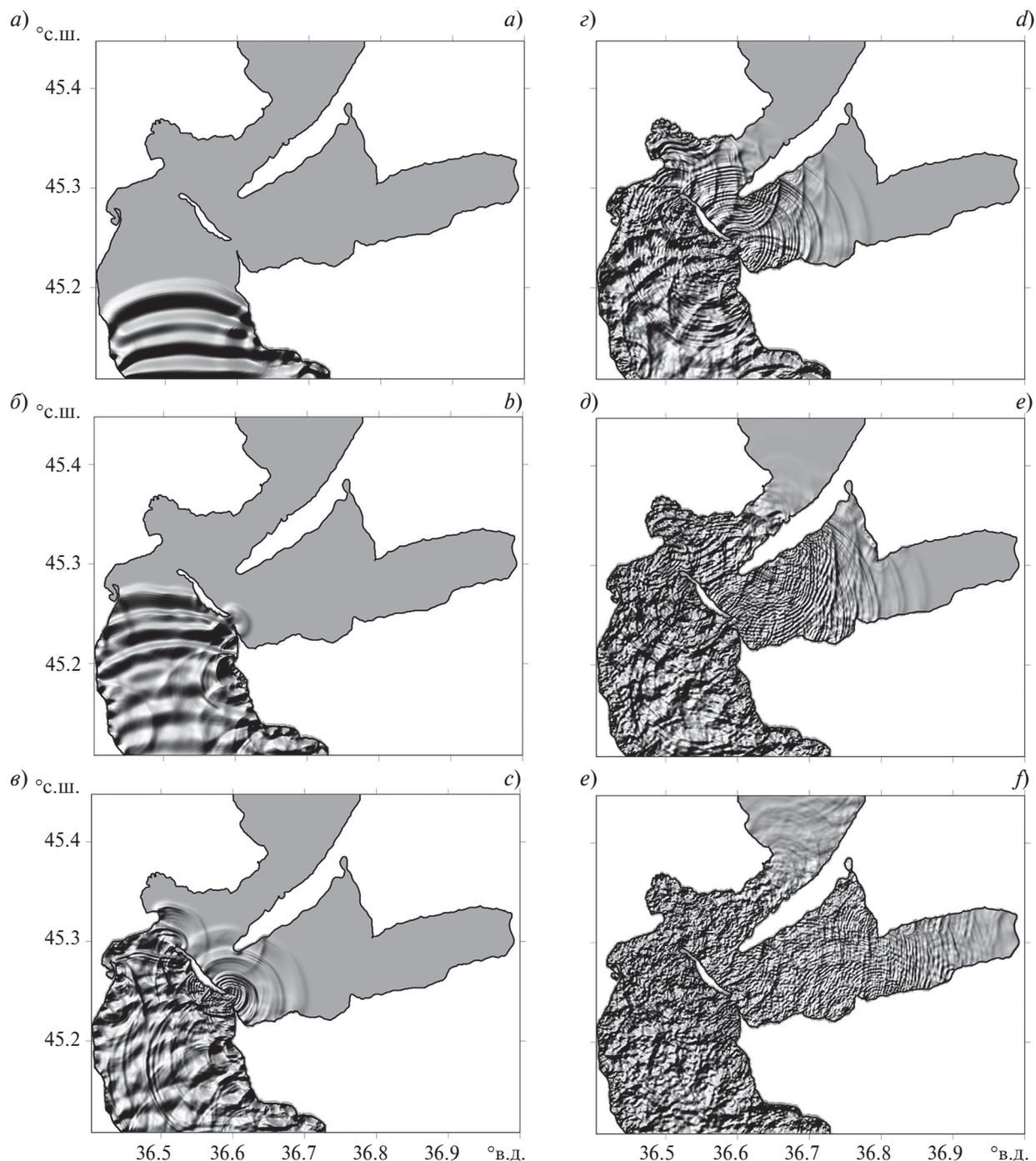


Рис. 7. Эволюция распространения волны цунами в Керченском проливе из удаленного сейсмического очага 4, расположенного в Черном море вблизи Ялты, в моменты времени: *a* — 60 мин, *б* — 1 ч 5 мин, *в* — 1 ч 15 мин, *г* — 1 ч 30 мин, *д* — 1 ч 50 мин; *е* — 2 ч 5 мин.

Fig. 7. Evolution of tsunami wave propagation in the Kerch Strait from a remote seismic focus 4, located in the Black Sea near Yalta, at times: *a* — 60 min, *b* — 1 h 5 min, *c* — 1 h 15 min, *d* — 1 h 30 min, *e* — 1 h 50 min, *f* — 2 h 5 min.

Согласно результатам работы [8], максимальные высоты черноморских волн цунами в проливе могут достигать 2.3 м, азовоморских — до 0.5 м. По данным работы [9], для очага цунами с $M = 7$, расположенного в Ялтинской сейсмогенерирующей зоне, высоты волн в проливе не превышают 0.5 м. Разница в полученных результатах статей [8, 9] и настоящей работы связана с разными начальными условиями очагов и их местоположений, пространственным разрешением численной модели, а также учетом в данной работе о. Тузлы, который оказывает принципиальное влияние на особенности распространения волн в проливе. В настоящей работе используется гидродинамический источник цунами, анизотропия излучения которого связана только с вытянутой формой очага и расположением его большой оси вдоль изобат. В случае же использования очага более сложной структуры, как, например, в [8, 9], возможны интерференции волновых пакетов, приводящие к фокусированию волн цунами в одних направлениях и ослаблению в других. Однако в целом сохраняется тенденция больших периодов волн цунами, пришедших из Азовского моря, по сравнению с черноморскими волнами, а также особенности распространения волн в проливе. Черноморские цунами могут оказать значительное воздействие на юго-восточную часть побережья Керченского пролива, а азовоморские цунами — на северную область. Как первые, так и вторые цунами, при любом сценарии усиливаются при вхождении в пролив, а также при взаимодействии с о. Тузла.

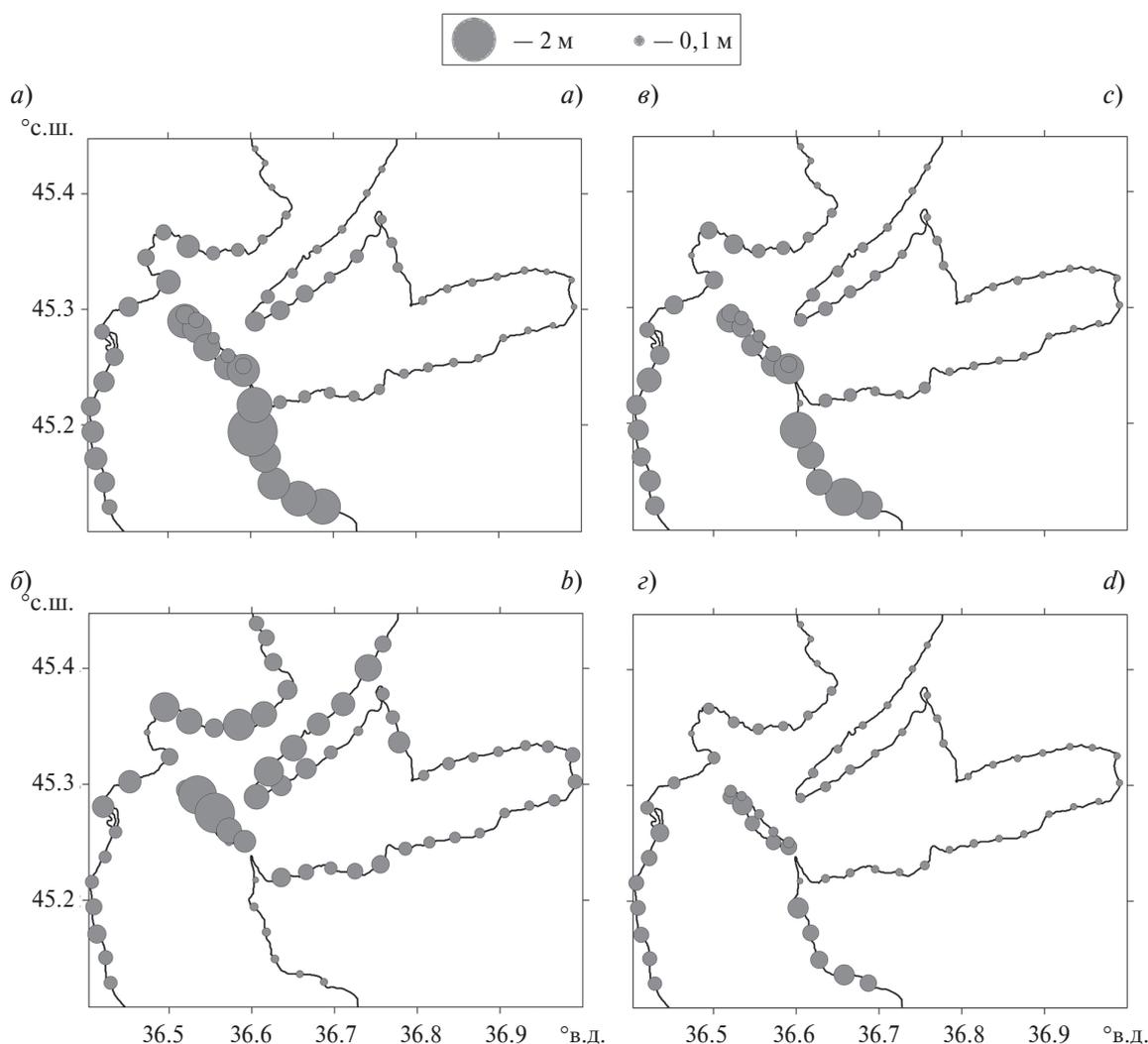


Рис. 8. Максимальные повышения уровня моря вдоль побережья Керченского пролива при распространении волн цунами из очагов, расположенных в Черном и в Азовском морях: *a* — очаг 1; *b* — очаг 2; *в* — очаг 3; *г* — очаг 4.

Fig. 8. Maximum sea level rise along the coast of the Kerch Strait during the propagation of tsunami waves from focuses located in the Black and Azov Seas: *a* — focus 1, *b* — focus 2, *c* — focus 3, *d* — focus 4.

4. Выводы

В данной работе представлены результаты численного моделирования распространения волн цунами из нескольких сейсмических очагов Азово-Черноморского бассейна, представляющих потенциальную опасность для Керченского пролива.

Задача решалась в два этапа. На первом этапе для всего Азово-Черноморского бассейна моделировалась эволюция четырех модельных очагов генерации цунами — два ближайших к проливу очага в Черном и Азовском морях и удаленный черноморский очаг. Очаги задавались в виде эллиптического возвышения уровня моря, параметры эллипса находились по эмпирическим формулам, соответствующим землетрясению с магнитудой 7. Выявлено, что на входе в пролив черноморские цунами обладают меньшими периодами по сравнению с азовоморскими цунами.

На втором этапе на сетке с высоким разрешением моделировалось проникновение волн цунами в Керченский пролив. В качестве краевых условий на жидких границах пролива использовались модельные данные из первого этапа. Выявлены области максимального повышения уровня моря вдоль побережья пролива при распространении волн как со стороны Черного, так и из Азовского моря. Показано, что наибольшие повышения уровня моря для черноморских цунами возникают вблизи юго-восточной части побережья Керченского пролива, а также у южного побережья Тузлы, и могут достигать 2 м для ближнего очага и около 1.4 м — для удаленного очага. Что касается азовоморских цунами, то их наибольшему влиянию подвержена северная часть пролива и северное побережье Тузлы, а их максимальные высоты составили порядка 1.5 м. В случае повторения события в Ялтинской сейсмогенерирующей зоне, подобного произошедшему 12 сентября 1927 г., максимальный подъем уровня в проливе составит 0.65 м.

5. Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827–2020–0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).

Литература

1. *Фомин В.В., Лазоренко Д.И., Фомина И.Н.* Численное моделирование водообмена через Керченский пролив для различных типов атмосферных воздействий // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 4. С. 82–93. doi: 10.22449/0233–7584–2017–4–82–93
2. *Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Катастрофические природные явления Азово-Черноморского региона. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 193 с.
3. *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. doi: 10.15372/GiG20180208
4. *Никонов А.А.* Мощное цунами. В проливе... Керченском // *Природа*. 2016. № 5. С. 29–38.
5. *Винокуров Н.И., Корженков А.М., Родкин М.В.* К оценке сейсмической опасности района Керченского пролива по данным археосейсмологии // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2015. Т. 42, № 2. С. 51–66.
6. *Никонов А.А.* Мощное цунами. В проливе... Керченском // *Природа*. 2016. № 7. С. 30–40.
7. *Никонов А.А.* Главные особенности геодинамики, напряженного состояния и распределения сильных землетрясений в Азово-Черноморском регионе // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Т. 1. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН Москва, 2016. С. 493–501.
8. *Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Баранова Е.А.* и др. Численное моделирование распространения черноморских и азовоморских цунами через Керченский пролив // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 2. С. 111–122. doi: 10.22449/0233–7584–2018–2–111–122
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. *Базыкина А.Ю., Фомин В.В.* Моделирование волн цунами в Азово-Черноморском регионе // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 21–31. doi: 10.7868/S2073667319040038
11. *Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С.* и др. Опыт картирования очагов землетрясений // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. М.: ИФЗ РАН. Вып. 1. 1993. С. 99–108.

References

1. Fomin V.V., Lazorenko D.I., Fomina I.N. Numerical Modeling of Water Exchange through the Kerch Strait for Various Types of the Atmospheric Impact. *Physical Oceanography*. 2017, 4, 79–89. doi: 10.22449/1573–160X-2017–4–79–89
2. Dotsenko S.F., Ivanov V.A. Catastrophic natural phenomena of the Azov-Black Sea region. *Sevastopol, ECO-SI-Gidrofizika*, 2013. 193 p. (in Russian).
3. 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. doi: 10.1016/j.rgg.2018.01.016
4. Nikonov A.A. A powerful tsunami. In the strait ... Kerch. *Priroda*. 2016, 5, 29–38. (in Russian).
5. Vinokurov N.I., Korzhenkov A.M., Rodkin M.V. Seismic hazard assessment of the Kerch Strait region by archeoseismology data. *Vopr. Inzh. Seismol.* 2015, 42(2), 51–66 (in Russian).
6. Nikonov A.A. A powerful tsunami. In the strait ... Kerch. *Priroda*. 2016, 7, 30–40 (in Russian).
7. Nikonov A.A. The main features of geodynamics, stress state and distribution of strong earthquakes in the Azov-Black Sea region. *Fourth tectonophysical conference at the IPE RAS tectonophysics and topical issues of earth sciences. Institute of Physics of the Earth named after O. Yu. Schmidt RAS Moscow*. 2016, 1, 493–501 (in Russian).
8. Lobkovsky L.I., Mazova R. Kh., Baranova E.A. and Tugaryov A.M. Numerical Simulation of Propagation of the Black Sea and the Azov Sea Tsunami through the Kerch Strait. *Physical Oceanography*. 2018, 25(2), 102–113. doi: 10.22449/1573–160X-2018–2–102–113
9. Baranova E.A., Mazova R. Kh. 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*. 2020, 27(2), 110–125. doi: 10.22449/1573–160X-2020–2–110–125
10. Bazykina A. Yu., Fomin V.V. Simulation of tsunami waves in the Azov-Black sea region. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2019, 12, 4, 21–31 (in Russian). doi: 10.7868/S2073667319040038
11. Ulomov V.I., Polyakova T.P., Shumilina L.S. et al. Experience in mapping earthquake sources. *Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia. Moscow, IPE RAS*. 1993, 1, 99–108 (in Russian).