

Численное моделирование распространения черноморских и азовоморских цунами через Керченский пролив

Л. И. Лобковский¹, Р. Х. Мазова^{2,*}, Е. А. Баранова², А. М. Тугарев²

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: raissamazova@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.09.2017 г. После доработки 27.09.2017 г.

Рассмотрены возможные сильные цунамигенные землетрясения, очаги которых локализованы в бассейне Черного моря на входе в Керченский пролив и на выходе из пролива в акватории Азовского моря. Поскольку в настоящее время оценки цунамиопасности принято проводить для критических значений магнитуд землетрясения, были исследованы возможные сильные землетрясения с магнитудой $M = 7$. Рассматривались сейсмические очаги эллиптической формы. При выборе локализации очага на северо-востоке Черного моря принимались во внимание наиболее сейсмически опасные участки рассматриваемой акватории. Численное моделирование проводилось в рамках нелинейных уравнений мелкой воды с учетом диссипативных эффектов. Проанализированы два возможных сценария распространения цунами для выбранных локализаций источников. Получены волновые характеристики при движении волны цунами как из Черного моря через Керченский пролив в Азовское море, так и по всему Керченскому проливу. Рассмотрена также симметричная задача при движении цунами из Азовского моря через Керченский пролив в акваторию Черного моря. Для расчетной акватории выполнен спектральный анализ волнового поля цунами. Особенно детально проведены оценки волновых и энергетических характеристик волн цунами в районе строящегося Крымского моста.

Ключевые слова: очаг землетрясения, волны цунами, численное моделирование, спектральные характеристики волнового поля.

Для цитирования: Численное моделирование распространения черноморских и азовоморских цунами через Керченский пролив / Л. И. Лобковский [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 111–122. doi: 10.22449/0233-7584-2018-2-111-122

Numerical simulation of propagation of the Black Sea and the Azov Sea tsunami through the Kerch Strait

L. I. Lobkovsky¹, R. Kh. Mazova^{2,*}, E. A. Baranova², A. M. Tugarev²

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*e-mail: raissamazova@yandex.ru

Considered are possible strong tsunamigenic earthquakes the sources of which are localized in the Black and Azov seas at the input and exit of the Kerch Strait, respectively. Since at present the tsunami risks are usually assessed for the critical earthquake magnitude values, possible strong earthquakes with a magnitude $M = 7$ are studied. The seismic sources of elliptical shape are considered. When choosing the source location in the north-east of the Black Sea, the most seismically dangerous areas of the water area under consideration are allowed for. Numerical simulation is carried out within the framework of the nonlinear shallow water equations with the dissipative effects taken into account. Two possible scenarios of tsunami propagation at the chosen sources' locations are analyzed. The wave characteristics are obtained for a tsunami wave motion both from the Black Sea through the Kerch Strait to the Azov Sea, and throughout the Kerch Strait. Also considered is the symmetrical problem for a tsunami wave propagation from the Sea of Azov through the Kerch Strait to the Black Sea. Spectral analysis of the tsunami wave field is done for the water area under study. The wave and energy characteristics of the tsunami waves in the region of the bridge across the Kerch Strait are subjected to the detailed examination and assessment.

Keywords: source of earthquake, tsunami waves, numerical modeling, spectral characteristics of a wave field.

For citation: Lobkovsky, L.I., Mazova, R.Kh., Baranova, E.A. and Tugarev, A.M., 2018. Numerical simulation of propagation of the Black Sea and the Azov Sea tsunami through the Kerch Strait. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, 34(2), pp. 111–122. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-111-122 (in Russian).

© Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Баранова Е.А., Тугарев А.М., 2018

Введение. По данным гидрогеологов, Керченский пролив является фактически местом тектонического разлома и керченский и таманский берега расположены на разных тектонических блоках. Сейсмичность площадки составляет 9 баллов. Рельеф дна Керченского пролива имеет достаточно сложное строение. Поперечный профиль ложа пролива асимметричен, а сам пролив разграничен двумя перемычками на три части [1]. Колебания уровня воды в Керченском проливе имеют разную природу, наиболее значимы по величине стоннонагонные колебания [2]. Керченский пролив, разделяющий Керченский п-ов Крыма и Таманский п-ов континентальной России, является важнейшей водной артерией, соединяющей акватории Черного и Азовского морей [3].

Как известно, начиная с VII в. до н. э. существовало сообщение между западным и восточным берегами Керченского пролива. Неоднократно возникали проекты по строительству моста через Керченский пролив, но реализации этих проектов помешали начавшиеся Первая и Вторая мировые войны. И только в 1944 г. был построен керченский железнодорожный мост, который просуществовал до февраля 1945 г. [4]. В марте 2014 г. в связи с воссоединением Крыма и России подготовка к строительству моста значительно активизировалась. В июне 2014 г. проект был одобрен, и строительство моста планируется реализовать к концу 2018 г. Планируемая высота моста 35 м, его длина – 19 км.

Как было отмечено выше, геологические условия в Керченском проливе достаточно сложные: сейсмичность, тектонический разлом, слабые грунты. Мост спроектирован с учетом устойчивости при землетрясениях силой до 9,1 балла, которые в данной местности происходят примерно один раз в 1000 лет (см., напр., [5–8]). Однако кроме учета возможности землетрясения в самой акватории Керченского пролива необходимо учитывать возможность появления волн цунами, приходящих из акватории как Черного, так и Азовского моря.

О цунами сейсмогенной природы в Азовском море известно мало [9–13]. Эпицентры исторических относительно слабых подводных землетрясений сосредоточены в его южной и юго-западной частях [5–7, 11]. Азовское море – относительно небольшой водоем, являющийся фактически заливом Черного моря. Между тем здесь штормит 61–98 раз в году [14], отмечено и прохождение цунами. Так, цунами было зафиксировано 11–12 сентября 1927 г., 28 декабря 1939 г. и 12 июля 1966 г. при прохождении волн из Черного в Азовское море через Керченский пролив. Отголоски этих цунами зарегистрированы в ряде пунктов Азовского моря [15]. Так, 28 октября 1969 г. на юго-востоке Азовского моря цунами проявилось 5-метровым водным валом. В 1971 г. подобное событие, но в больших масштабах повторилось для этой же части Азовского моря [11, 14].

Прогнозом цунами в Черном и Азовском морях занимались ряд авторов [7, 9, 10, 16, 17]. Так, в работе С. Ф. Доценко и А. В. Ингерова проведен численный анализ распространения волн цунами в Азовском море. Как пишут авторы, «вопрос об эффективности генерации цунами в Азовском море сейсмическими источниками остается актуальным и мало исследованным» [10, с. 3]. В настоящее время этот вопрос встает очень остро в связи со строительством моста через Керченский пролив.

Численное моделирование. Для численного моделирования генерации и распространения волн цунами были рассмотрены северо-восточная часть Черного моря, Керченский пролив и южная часть Азовского моря (рис. 1, *а*). Вдоль побережий на 4-метровой изобате расположены виртуальные мареографы, регистрирующие уровень воды с шагом по времени $t = 1$ мин (рис. 1, *б*). Для данных участков морской акватории были рассмотрены два сценария возможных сильных землетрясений с магнитудой $M = 7$ от двух гипотетических очагов землетрясения эллипсоидной формы. Размеры очагов землетрясения, определенные с помощью формул Wells (см, напр., [18]), составляют около $16,4 \times 68$ км.

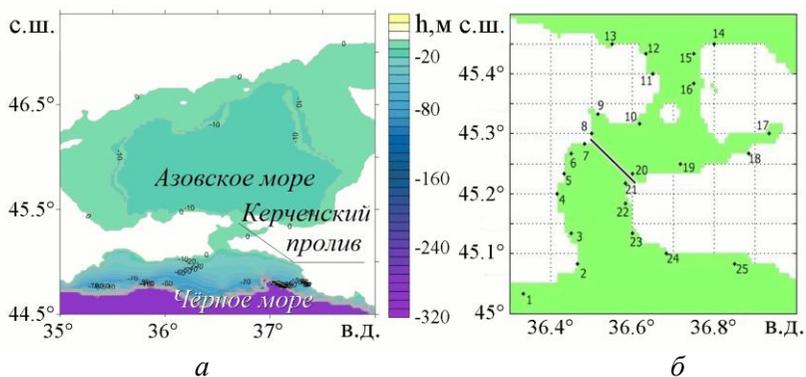


Рис. 1. Батиметрическая карта, используемая при моделировании, – *а*; схема расположения виртуальных мареографов – *б*. Темная линия – схематическое изображение положения строящегося моста

Fig. 1. Bathymetric map applied during the modeling, – *a*; a plan of virtual tide gauge location – *b*. The dark line is a schematic representation of the position of the bridge under construction

Рассматривалось знакоположительное вертикальное смещение в очаге до 2,1 м. Сейсмический очаг для реализации **Сценария 1** (северо-восточная часть Черного моря) расположен в зоне активных разломов земной коры (рис. 2, *а*), очаг для **Сценария 2** – в южной части Азовского моря (рис. 2, *б*). Расчетная область в данной задаче выбиралась в квадрате $35\text{--}38^\circ$ в. д., $44,5\text{--}47,5^\circ$ с. ш. с сеткой, включающей в себя число узлов $345 \times 361 = 124545$. Для моделирования использовалась батиметрия Черного моря с разрешением 500 м.

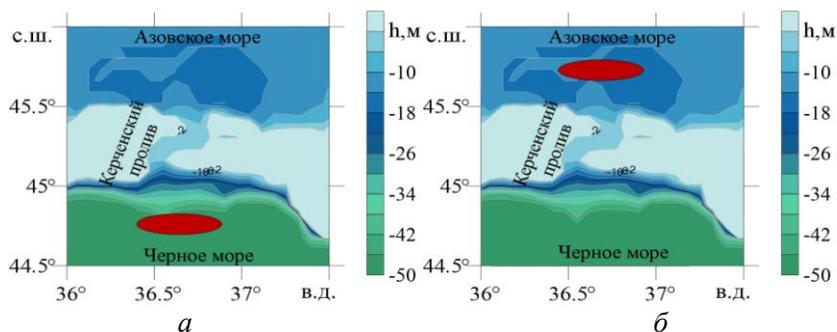


Рис. 2. Положение рассматриваемых очагов землетрясения по **Сценарию 1** (*а*) и **Сценарию 2** (*б*)

Fig. 2. The position of the considered earthquake source by **Scenario 1** (*a*) and **Scenario 2** (*b*)

Моделирование проводилось с временным шагом 1 с. В последней морской точке на глубине 4 м поставлено условие полного отражения (вертикальная стенка), позволяющее зафиксировать на этой глубине максимальную и минимальную величины смещения волнового уровня. При численном решении использовалась схема, построенная по аналогии со схемой [19].

Для описания процесса генерации и распространения волны, вызванной процессами в сейсмическом источнике, была использована нелинейная система уравнений мелкой воды в двумерной постановке с учетом диссипативных эффектов и донного трения (см., напр., [20–22]).

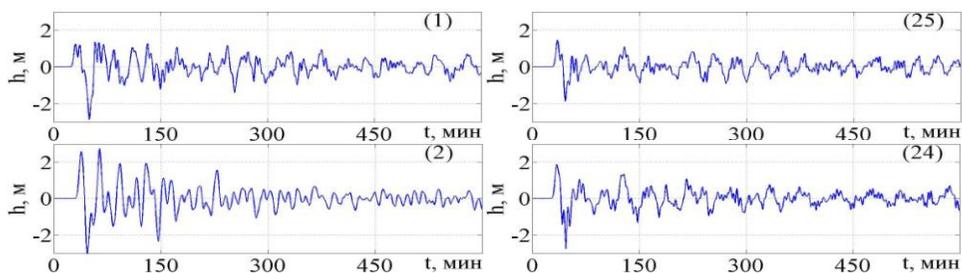


Рис. 3. Данные с 4 виртуальных мареографов на входе в Керченский пролив из Черного моря для **Сценария 1**. В правом верхнем углу указан номер виртуального мареографа: (1) – с. Яковенково; (2) – с. Заветное; (24) – пос. Волна; (25) – пос. Артющенко

Fig. 3. The data from 4 virtual tide gauges located at the Kerch Strait entrance from the Black Sea for **Scenario 1**. Virtual tide gauge number is indicated in the upper right corner: (1) – Yakovenkovo; (2) – Zavetnoye; (24) – Volna; (25) – Artyushchenko

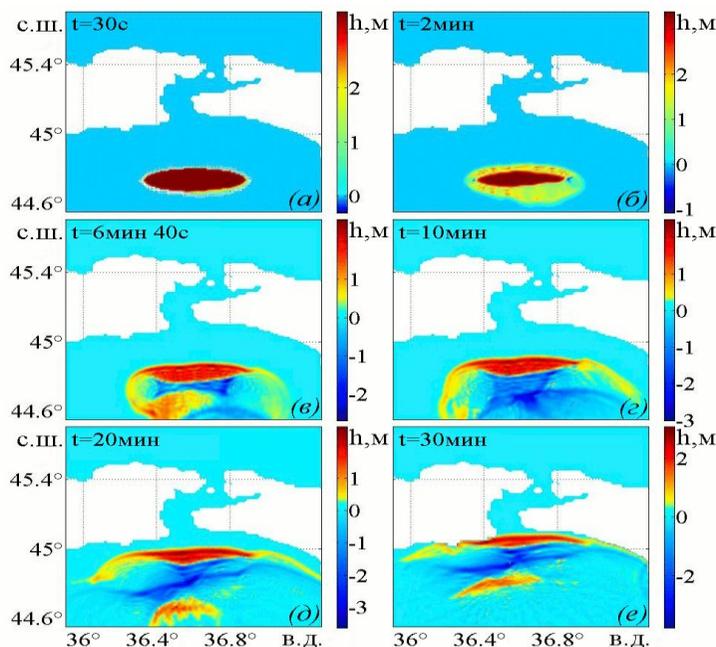


Рис. 4. Положение фронтов волн цунами для 6 моментов времени при реализации **Сценария 1**

Fig. 4. Position of tsunami wave fronts for 6 time moments when implementing **Scenario 1**

При реализации численного моделирования были получены волновые поля смещений и поля скоростей вдоль северо-восточного побережья Черного моря, побережий Азовского моря и Керченского пролива. На рис. 3 при реализации **Сценария 1** можно видеть данные с виртуальных мареографов, схема расположения которых представлена на рис. 1, б. Расчетные мареограммы показаны для п. 1, 2, 24, 25, расположенных на входе в пролив. Хорошо видно, что максимальный разброс в колебаниях уровня моря в этих пунктах составляет почти 5 м: от +2,3 до -2,5 м. Для этого же сценария на рис. 4 приведены положения фронтов волн.

Хорошо видно (рис. 4, е), что через 30 мин после начала землетрясения к входу в Керченский пролив подходит фронт волны высотой до 2,3 м.

На рис. 5 показаны расчетные мареограммы для пунктов, расположенных на западном и восточном побережьях Керченского пролива (рис. 1, б). Видно, что максимальные высоты первых волн, подходящих почти ко всем пунктам (кроме п. 22), не достигают 1 м.

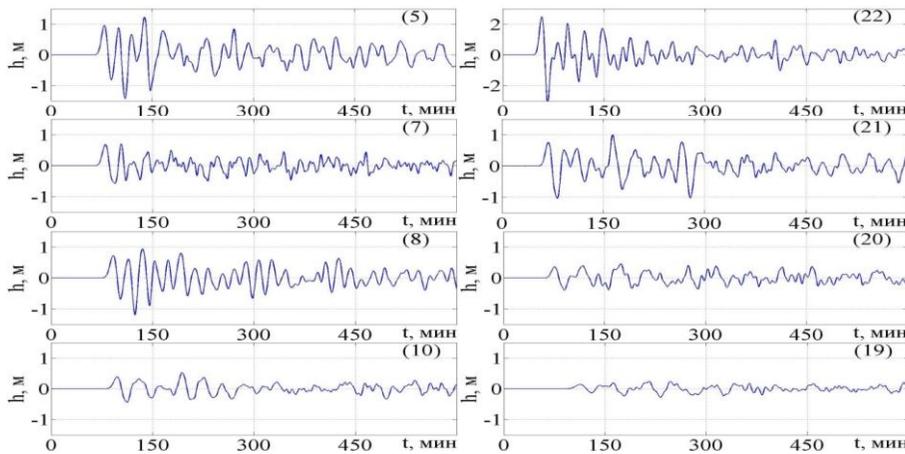


Рис. 5. Данные с 8 виртуальных мареографов вдоль Керченского пролива для **Сценария 1**: (5) – южная часть г. Керчь; (7) – юго-западный край моста; (8) – северо-западный край моста; (10) – восточная часть г. Керчь; (19) – ст. Тамань; (20) – северо-восточный край моста; (21) – юго-восточный край моста; (22) – берег о. Тузла

Fig. 5. The data from 8 virtual tide gauges located along the Kerch Strait for **Scenario 1**: (5) – the southern part of the city of Kerch; (7) – the southwestern edge of the bridge; (8) – the northwestern edge of the bridge; (10) – the eastern part of the city of Kerch; (19) – Taman; (20) – the northeastern edge of the bridge; (21) – southeastern edge of the bridge; (22) – Tuzla Island shore

На рис. 6 для данного сценария представлена картина прохождения волны цунами по Керченскому проливу. Передний фронт волны возвышения имеет выпуклую, дугообразную форму по всей ширине канала. Высота гребня в проливе через час после начала события достигает 1,5 м. Через 1 ч 13 мин правый край фронта волны высотой до 0,7 м (п. 20 на рис. 5) достигает опор моста в районе косы Тузла. Остальная часть фронта продолжает распространение в северном направлении и примерно через 8 мин обрушивается на южное побережье Камыш-Бурунской бухты и достигает западных опор моста. Высота гребня волны в п. 7 (рис. 5) около 0,7 м. После прохождения

косы Тузла высота правой половины фронта волны снижается почти вдвое и волновой фронт разворачивается в сторону Таманского залива (рис. 6, в). Средняя часть фронта волны распространяется в сторону северного побережья Керченской бухты и достигает его через 10 мин с высотой около 1 м (рис. 6, г). В остальной части бухты высота волны на 4-метровой изобате около 0,5 м. В районе моста в это время наблюдается понижение уровня воды примерно на 1 м.

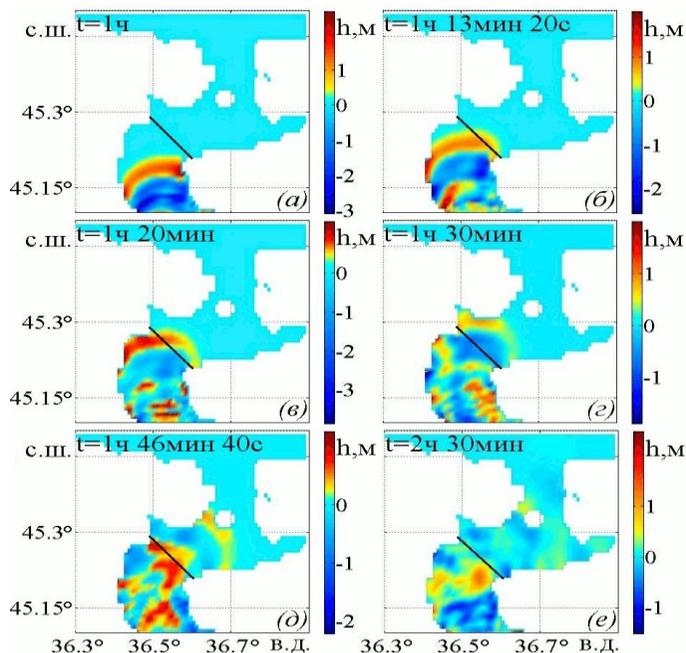


Рис. 6. Положение фронтов волн цунами и распределение уровня воды в акватории Керченского пролива для 6 моментов времени при реализации **Сценария 1**
Fig. 6. Positions of tsunami wave fronts and water level distribution in the Kerch Strait basin for 6 time moments when implementing **Scenario 1**

При $t \sim 1$ ч 46 мин от начала сейсмического процесса (рис. 6, д) к мосту подходит гребень волны, состоящий из двух частей. Центр моста подвергается атаке гребня волны, имеющего заостренную форму, именно в районе косы Тузла, где расположены восточные опоры моста. Другой участок волнового фронта атакует опоры моста в месте его изгиба в районе м. Ак-Бурун. Высота второго гребня волны в п. 7 (рис. 5) также около 0,7 м. В это же время передний фронт волны достигает косы Чушка, однако высота гребня здесь менее 0,5 м. Примерно через 2 ч 30 мин после начала сейсмического процесса область косы Тузла (рис. 6, е) снова подвергается атаке волны с гребнем высотой около 1 м (п. 20 на рис. 5).

По данным рис. 5 и 6 можно сделать вывод, что при движении волны на всем протяжении Керченского пролива максимальное значение высоты ее переднего фронта составляет около 2,2 м (п. 22). Волна проходит весь пролив и достигает акватории Азовского моря за 2 ч 20 мин (рис. 7), имея при этом максимальную высоту всего лишь около 0,2 м.

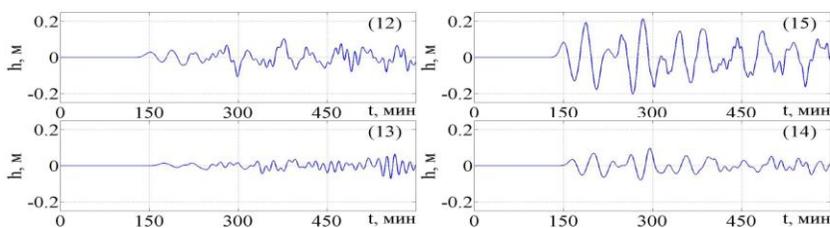


Рис. 7. Данные с 4 виртуальных мареографов для **Сценария 1** на выходе из Керченского пролива в Азовское море: (12) – с. Овосины; (13) – с. Юркино; (14) – пос. Приазовский; (15) – пос. Ильич
Fig. 7. The data from 4 virtual tide gauges for **Scenario 1** located at the exit from the Kerch Strait to the Sea of Azov: (12) – Ovosiny; (13) – Yurkino; (14) – Priazovskiy; (15) – Plych

Фронты цунами в акватории Азовского моря имеют круговую форму (рис. 8). Средняя высота волны составляет 0,2 м. Волна с отметкой 0,05 м достигает северного побережья моря за 5 ч 50 мин (рис. 8, *з*). Во время распространения волн по Азовскому морю максимальная высота волны сохраняется такой же, как и на выходе из Керченского пролива, что хорошо видно по данным с мареографов 12–15 (рис. 7).

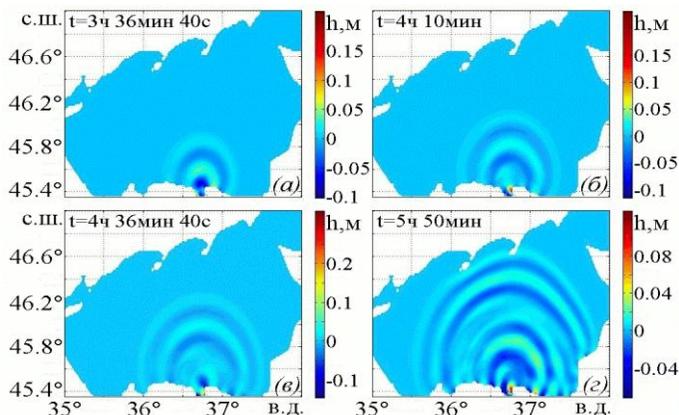


Рис. 8. Положение фронтов волн цунами и распределение уровня воды в акватории Азовского моря для 4 моментов времени по **Сценарию 1**
Fig. 8. Positions of tsunami wave fronts and water level distribution in the basin of the Sea of Azov for 4 time moments by **Scenario 1**

При реализации **Сценария 2**, когда очаг землетрясения локализован в акватории Азовского моря напротив входа в Керченский пролив, картина прохождения волны цунами по проливу существенно меняется (рис. 9, 10). В отличие от **Сценария 1** передний фронт волны возвышения после входа в пролив через 1 ч после начала события порядка 0,5 м. Через 1 ч 46 мин фронт волны (п. 19, 20 на рис. 10) доходит до южного побережья Таманского залива с высотой гребня до 0,5 м в районе Тамани, а также достигает опор моста в районе косы Тузла с высотой волны до 0,4 м. Остальная часть фронта продолжает распространение в юго-западном направлении, достигая северного побережья Керченской бухты, и через 8 мин обрушивается на южное побережье Камыш-Бурунской бухты и достигает восточной опоры моста. Высота гребня волны в п. 7 (рис. 10) около 0,7 м.

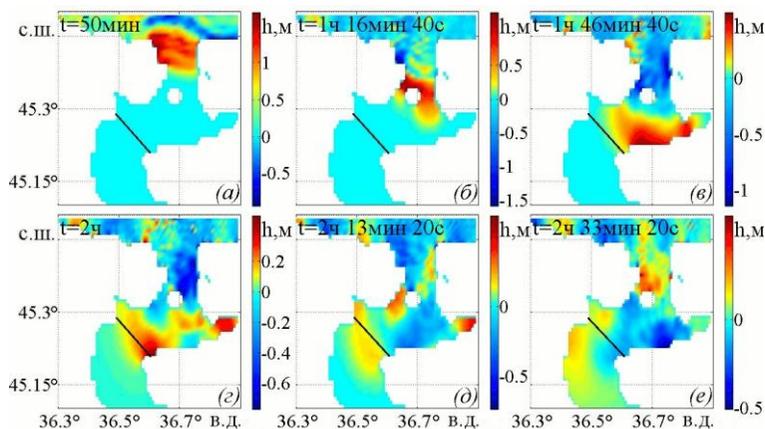


Рис. 9. Положение фронтов волн цунами и распределение уровня воды в акватории Керченского пролива для 6 моментов времени при реализации **Сценария 2**

Fig. 9. Positions of tsunami wave fronts and water level distribution in the Kerch Strait basin for 6 time moments when implementing **Scenario 2**

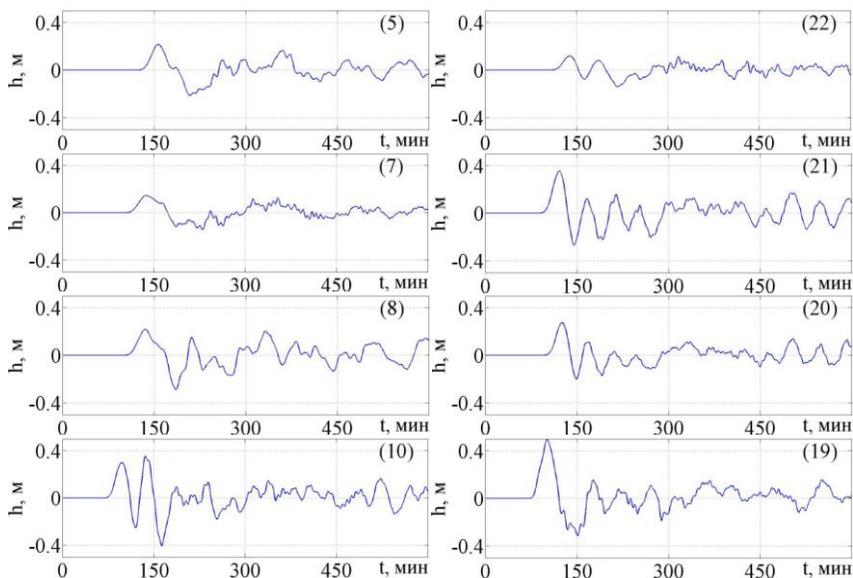


Рис. 10. Данные с 8 виртуальных мареографов вдоль Керченского пролива для **Сценария 2**: (5) – южная часть г. Керчь; (7) – юго-западный край моста; (8) – северо-западный край моста; (10) – восточная часть г. Керчь; (19) – ст. Тамань; (20) – северо-восточный край моста; (21) – юго-восточный край моста; (22) – берег о. Тузла

Fig. 10. The data from 8 virtual tide gauges located along the Kerch Strait for **Scenario 2**: (5) – the southern part of the city of Kerch; (7) – the southwestern edge of the bridge; (8) – the northwestern edge of the bridge; (10) – the eastern part of the city of Kerch; (19) – Taman; (20) – the northeastern edge of the bridge; (21) – southeastern edge of the bridge; (22) – Tuzla Island shore

Средняя часть фронта волны распространяется в сторону южного побережья Керченской бухты и достигает его через 10 мин с высотой до 0,5 м в районе порта Тамани (рис. 9, з). Правая часть волнового фронта распространяется в юго-западном направлении, достигая западных опор моста

и южного побережья Керченской бухты. Через 2 ч после генерации цунами волновой фронт достигает опор моста по всей его длине и заходит в Керченскую бухту (рис. 9, з). Высота волны 0,4 м в районе косы Тузла (п. 20, 21 на рис. 10) падает до 0,2 м в районе м. Ак-Бурун (п. 7, 8 на рис. 10). Примерно через 13 мин волна проходит район моста, оставаясь только в акватории Керченской бухты. При дальнейшем распространении волновой фронт становится более пологим с максимальной высотой около 0,2 м, достигая побережья Камыш-Бурунской бухты и далее рассеиваясь по проливу.

Спектральный анализ. Для анализа прохождения волн через Керченский пролив был проведен спектральный анализ волнового процесса с использованием данных, полученных с виртуальных мареографов 2, 7, 8, 12, 15, 20, 21, 25 (рис. 1, б) (см., напр., [19, 20]). На рис. 11, а приведена *wavelet*-спектрограмма для п. 2, который находится на западной границе входа в Керченский пролив.

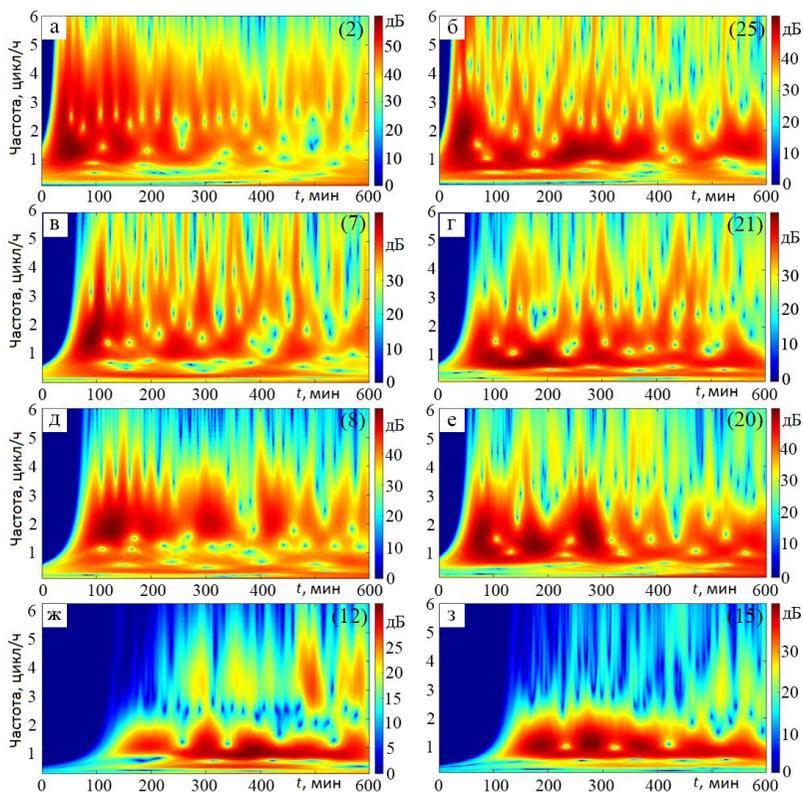


Рис. 11. Энергетические характеристики волн цунами в Керченском проливе
Fig. 11. Energy characteristics of tsunami waves in the Kerch Strait

Хорошо видно, что на интервале Δt 0–300 мин энергия волны распределена практически равномерно по всей частотной области с интенсивностью до 50 дБ, однако основная доля энергии волны сконцентрирована в области низких частот в диапазоне 1–2,5 цикл/ч, что соответствует $T \sim 15$ –60-минут-

ным волнам на интервале времени Δt 0–180 мин. Интенсивность – около 60 дБ. На южной точке входа в пролив, в п. 25, энергия распределена более равномерно по всему диапазону наблюдения, что хорошо видно на графике *wavelet*-спектрограммы для этой точки (рис. 11, б). Наибольшая волновая интенсивность, до 55 дБ, в диапазоне 1–3 цикл/ч наблюдается на интервале Δt 20–80 мин и до 2 цикл/ч – на интервале Δt 200–380 мин. При подходе к Крымскому мосту часть волновой энергии теряется (рис. 11, в, г), преобладает низкочастотная составляющая 1–2 цикл/ч. Интенсивность – около 50 дБ. В районе западной части моста при переходе от п. 7 к п. 8 происходит концентрация энергии в области частот до 4 цикл/ч. Для восточной части пролива в п. 20 перед мостом на спектрограмме (рис. 11, е) хорошо видны три временных интервала Δt : ~50–100, ~150–200, ~250–300 мин в диапазоне частот 1–3 цикл/ч. Интенсивность – 50 дБ. На выходе из Керченского пролива вся энергия волн сосредоточивается в узком низкочастотном интервале 1–2 цикл/ч со значительно ослабленной энергией волны (рис. 11, е, ж). На интервале времени Δt 100–600 мин в *wavelet*-спектрограммах для мареографов 12 и 15 присутствует практически перманентная составляющая с частотой $f \sim 1$ –2 цикл/ч (период 30–60 мин) и интенсивностью до 40 дБ. Таким образом, можно видеть, что при прохождении волн через Керченский пролив волновая энергия высокочастотного интервала практически теряется, а низкочастотного – значительно ослабевает.

Заключение. Как видно из проведенного расчета, при возможных сильных землетрясениях с магнитудой $M = 7$ в акватории Черного моря высоты волн цунами в Керченском проливе в районе строящегося моста могут достигать 1,5–2 м. При движении волны цунами из акватории Черного моря в Азовское через Керченский пролив скорость водного потока в окрестности западных опор моста, огибающего м. Ак-Бурун, может превышать 8,5 м/с (~30 км/ч), что необходимо учитывать при эксплуатации моста. В восточной части моста коса Тузла служит естественной дамбой, гасящей разрушительную энергию цунами. Через 1 ч 45 мин после генерации цунами к середине моста подходит гребень волны высотой до 1 м, при этом левая часть волнового фронта атакует западную часть моста. К восточному участку моста в районе косы Тузла волна высотой до 1 м подходит через 45 мин. Дальнейшее распространение волны происходит с меньшими высотами.

При обратной постановке задачи, когда потенциальный источник цунами расположен в Азовском море, высоты волн в Керченском проливе заметно меньше, до 0,5 м. Основной удар волны приходится на южное побережье Таманского залива, так что когда часть волнового фронта подходит к линии моста, ее энергия уже существенно погашена. Характерной чертой распространения цунами по проливу является плоская форма волнового фронта как при движении вдоль косы Чушка, так и при подходе непосредственно к мосту. В отличие от предыдущего случая, когда источник цунами расположен в Черном море, волна возвышения атакует мост по всей его ширине – от косы Тузла на востоке до м. Ак-Бурун на западе. Заметим, что высота волны здесь существенно меньше, чем в первом случае, однако атаке подвергается сразу вся конструкция моста. Полученные результаты хорошо согласуются как с немногочисленными данными наблюдений, так и с исследованиями других авторов.

Как показывает проведенный анализ, при прохождении волны цунами из Черного моря через Керченский пролив на участке до Крымского моста ее амплитуда и мощность значительно гасятся. Фронт волны в течение часа после генерации цунами достигает и проходит через восточные опоры моста в районе косы Тузла. В этой части моста ширина частотной области, где сосредоточена основная энергия, увеличивается в 1,5 раза (1–3 цикл/ч) и интенсивность также увеличивается в ~1,3 раза, хотя основная частотная составляющая волны цунами остается практически без изменения (~1–2 цикл/ч). На графике мгновенной мощности при прохождении этих опор возникают 3 пика вместо одного, наблюдаемого при подходе. Через западные опоры моста вблизи м. Ак-Бурун фронт волны проходит примерно через 10 мин после достижения восточных опор. Хотя ширина частотного диапазона области, где сосредоточена основная энергия при прохождении района этих опор, увеличивается незначительно (1–3,5 цикл/ч), временной промежуток расширяется более чем в 2 раза при практически неизменной интенсивности (~50 дБ). Основная частотная составляющая волны цунами при прохождении района западных опор моста также возрастает примерно в ~1,5 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полубок Т. Н.* Изученность процессов литолого-геоморфологических изменений дна Керченского пролива // Вісник Одеського державного екологічного університету. 2013. Вип. 15. С. 187–196.
2. *Еремеев В. Н., Иванов В. А., Ильин Ю. П.* Океанографические условия и экологические проблемы Керченского пролива // Морской экологический журнал. 2003. Т. II, № 3. С. 27–40.
3. *Тормасов Ю. Б.* Проект-концепция «Универсальный транспортный переход через Керченский пролив» [Электронный ресурс]. URL: http://kerch-most.ru/pdf/original-booklet_3docx.pdf (дата обращения 15.08.2017).
4. Керченский мост: мифы и реальность [Электронный ресурс]. URL: <http://history-paradox.ru/kerch-most.php> (дата обращения 15.08.2017).
5. *Никонов А. А.* Признаки молодой тектонической активности в зоне Южно-Азовского и Керченского разломов // Геотектоника. 1994. № 5. С. 16–27.
6. *Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е.* Сейсмичность Черноморской впадины // Геофизический журнал. 1991. Т. 13, № 1. С. 14–19.
7. *Соловьева О. Н., Кузин И. П.* Сейсмичность и цунами северо-восточной части Черного моря // Океанология. 2005. Т. 45, № 6. С. 826–840.
8. *Уломов В. И., Богданов М. И.* Новый комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2012) // Инженерные изыскания. 2013. № 8. С. 30–39. URL: <http://seismos-u.ifz.ru/p/ulomov-bogdanov.pdf> (дата обращения 16.08.2017).
9. *Никонов А. А.* Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика Земли. 1997. № 1. С. 86–96. URL: <http://neotec.ginras.ru/pubrus/nikonov-a-a-1997-cunami-na-beregah-chernogo-i-azovskogo-morey.html> (дата обращения 16.08.2017).
10. *Доценко С. Ф., Ингеров А. В.* Численный анализ распространения и усиления волн цунами сейсмической генерации в Азовском море // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 5. С. 3–13.
11. *Tsunami hazard in the Black Sea and the Azov Sea: a new tsunami catalogue / G. A. Papadopoulos [et al.] // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. Vol. 11, iss. 3. P. 945–963. doi:10.5194/nhess-11-945-2011*

12. Tsunami Modeling Scenarios for Some of the Seismic Sources in the Black Sea Area, Using Tsunami Analysis Tool Software / R. Partheniu [et al.] / 8th Congress of the Balkan Geophysical Society. 2015. doi:10.3997/2214-4609.201414139
13. *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(1). P. 5–28. <http://doi.org/10.5281/zenodo.889593>
14. *Шнюков Е. Ф., Митин Л. И., Цемко В. П.* Катастрофы в Черном море. Киев: Манускрипт, 1994. 296 с.
15. *Григораш З. К.* Обзор удаленных мареограмм некоторых цунами в Черном море // *Тр. СахКНИИ ДВО АН СССР. Ю.-Сахалинск : СахКНИИ*, 1972. Вып. 29. С. 271–278.
16. *Доценко С. Ф.* Оценка уровня цунамиопасности Черного моря // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 1998. № 4. С. 19–23.
17. *Доценко С. Ф.* Оценки параметров волн цунами вдоль южного побережья Крымского полуострова // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 3. С. 3–10. URL: <http://vnu.phys.msu.ru/search/get?f17774> (дата обращения 17.08.2017).
18. *Wells D. L., Coppersmith K. J.* New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1994. Vol. 84, no. 4. P. 974–1002. URL: https://www.researchgate.net/publication/215755871_New_Empirical_Relationships_among_Magnitude_Rupture_Length_Rupture_Width_Rupture_Area_and_Surface_Displacement (дата обращения 17.08.2017).
19. *Sielecki A., Wurtele M. G.* The numerical integration of the nonlinear shallow-water equations with sloping boundaries // *J. Comput. Phys.* 1970. Vol. 6, iss. 2. P. 219–236. doi:10.1016/0021-9991(70)90022-7
20. *Вольцингер Н. Е., Клеванный К. А., Пелиновский Е. Н.* Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 271 с.
21. *Mazova R. Kh., Kiselman B. A., Kolchina E. A.* Numerical simulation of tsunami wave height distribution for Turkish Black Sea coast in nonlinear dynamic keyboard model of underwater seismic source // *J. Comput. Applied Mathem.* 2014. Vol. 259. P. 887–896. doi:10.1016/j.cam.2013.08.034
22. *Лобковский Л. И., Мазова Р. Х., Колчина Е. А.* Оценки максимальных высот волн цунами для побережья г. Сочи при возможных сильных подводных землетрясениях // *Докл. Академии наук*. 2014. Т. 456, № 5. С. 604–609. – doi:10.7868/S086956521417023X

Об авторах:

Лобковский Леопольд Исаевич, заместитель директора Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), заведующий лабораторией геодинамики, георесурсов, геоэкологии, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, **ResearcherID:A-6846-2016**, llobkovsky@ocean.ru

Мазова Раиса Хаимовна, профессор кафедры прикладной математики, Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ), ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (НГТУ) (603600, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор физико-математических наук, профессор, **Scopus AuthorID: 6506297372**, raissamazova@yandex.ru

Баранова Елена Александровна, магистр кафедры прикладной математики, Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ), ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (НГТУ) (603600, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), elenabaranova5995@gmail.com

Тугарев Артем Михайлович, магистр кафедры прикладной математики, Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ), ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (НГТУ) (603600, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), artyom.tugaryov@gmail.com