МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.466.6

DOI: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-11-16

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ В АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОМ БАССЕЙНЕ

А.Ю. Базыкина, В.В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь
aleksa.44.33@gmail.com, v.fomin@ukr.net

Аннотация. В рамках нелинейной модели длинных волн выполнено численное моделирование эволюции волн цунами в Азово-Черноморском бассейне. Показано распространение волн из эллиптического очага генерации цунами, вызванных подводными землетрясениями с магнитудой 7. Расчеты проводились для 10 сейсмически активных зон. Большинство из них находится вдоль Крымско-Кавказского побережья Черного моря. Очаги генерации цунами располагались на материковом склоне вдоль 1000-метровой изобаты в Черном море и 10-метровой – в Азовском. Использована батиметрическая сетка с 30-секундным разрешением. Рассчитаны максимальные повышения уровня моря в прибрежной зоне Черного и Азовского морей. В результате численных экспериментов выявлено, что наиболее подвержены влиянию волн ближайšie к источнику генерации цунами участки побережья. Повышения уровня моря вдоль побережья составили от десятков сантиметров до 1 м. В целом, волны цунами могут воздействовать на все побережье Азово-Черноморского региона. Наименее уязвимой оказывается северо-западная часть Черного моря. Проведение подобных расчетов может стать полезным для минимизации негативных последствий в данном регионе.

Ключевые слова: цунами в Черном и Азовском морях, численное моделирование, амплитудные характеристики волн цунами.

Введение. Цунами в Черном и Азовском морях – явление редкое, но им не стоит пренебрегать в данном регионе. Известно, что за последние 3000 лет в Азово-Черноморском бассейне произошло 50 событий, вызвавших цунами [1]. Большая часть из них – подводные землетрясения, породившие волны цунами различной интенсивности. Первое из известных событий произошло близ пролива Босфор, при этом наблюдалось несколько крупных волн [2]. Три явления цунами XX в., которые имеют подводное сейсмическое происхождение, были зафиксированы с помощью мареографов. Два из них произошло в 1927 г. и еще одно – в 1966 г. Записанные мареограммы исследовались в работах [3, 4]. Последнее явление цунами в Азовско-Черноморском бассейне, которое было вызвано подводным землетрясением, по мнению [5], произошло 19 июля 2017 года в Азовском море.

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 достаточно мало. Возникает необходимость проведения численного моделирования для определения возможных высот волн при распространении цунами в прибрежной зоне Черного и Азовского морей. Численное

исследование черноморских цунами проводилось в [6–9].

Настоящая работа посвящена выявлению наиболее активных сейсмических зон и исследованию распространения волн из наиболее вероятных очагов генерации цунами. В результате численных экспериментов получены максимальные повышения уровня моря вдоль побережья Черного и Азовского морей при распространении волн цунами из участков локальных землетрясений с магнитудой 7.

Математическая постановка задачи. В расчетах использовалась батиметрия Азово-Черноморского бассейна, заданная на прямоугольной сетке 1920×960 узлов с 30-секундным пространственным разрешением. (GEBCO1 Digital Atlas) (рис. 1).

Генерация цунами моделировалась заданием начального эллиптического смещения уровня моря с центром в точке (x_0, y_0) с большой и малой осями L и W при нулевом поле скорости.

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

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

Оси эллиптической зоны генерации L и W находились, в зависимости от магнитуды землетрясения M , по эмпирическим формулам для евразийского региона [10]:

$$\lg L = 0,6 - 2,5, \lg W = 0,15M + 0,42 \quad (M \geq 6,5). \quad (2)$$

Расчеты проводились для землетрясений с $M = 7$, при этом рассчитанная высота начального смещения $a_0 = 1$ м, большая и малая оси эллипса равны $L = 50$ км, $W = 29,5$ км.

Для моделирования распространения волн цунами из эллиптического очага применялась нелинейная двумерная модель поверхностных длинных волн с учетом квадратичного донного трения:

$$\begin{cases} U_t + (U^2/D)_x + (UV/D)_y = -gD\zeta_x - gk^2/D^{7/3}U\sqrt{U^2+V^2} \\ V_t + (UV/D)_x + (V^2/D)_y = -gD\zeta_y - gk^2/D^{7/3}V\sqrt{U^2+V^2} \\ \zeta_y + U_x + V_y = 0, \end{cases} \quad (3)$$

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 невозмущенной поверхности моря от положения равновесия; $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t)$ – динамическая глубина жидкости; $H(x, y)$ – глубина бассейна при невозмущенном состоянии моря; g – ускорение свободного падения; $k = 0,013$ – параметр шероховатости Маннинга.

Цунами моделировалось на сетке с пространственным шагом 500 м и шагом по времени 1 с, расчеты выполнялись до изобаты 4 м. На твердых береговых границах расчетной области нормальные компоненты полного потока жидкости приравнивались нулю.

Результаты численных экспериментов. На рис. 1 отмечены очаги цунамигенных подводных землетря-

сений, произошедшие за последние 3000 лет, взятые из нового каталога цунами в Черном и Азовском морях [1]. Они вызвали волны цунами различной интенсивности.

Было выделено 10 сейсмически активных зон генерации цунами. Большинство этих зон находится в Черном море, одна зона – в Азовском море. На рис. 2 показано расположение модельных эллиптических очагов подводных землетрясений. Начальные возвышения моделировались таким образом, чтобы большая ось эллипса была вытянута вдоль изобаты. Черноморские очаги генерации цунами располагались над изолинией глубины 1000 м, азовский очаг (1) – над 10-метровой изобатой.

В результате опускания начального возвышения образуется кольцевая волна, которая распространяется неравномерно вследствие неоднородностей рельефа дна. Спустя более, чем 3 ч., волны охватывают всю акваторию Черного моря. На рис. 3 показано распространение волн цунами из очага 3 в различные моменты времени.

Максимальные повышения уровня моря вдоль берега в результате распространения волн из различных очагов генерации цунами показаны на рис. 4. Высота волн у побережья может достигать от десятков сантиметров до 1 м. Видно, что наиболее подвержены ближайшие к очагу участки побережья. Волны, которые распространяются из очага, расположенного в Азовском море (рис. 4, а), через Керченский пролив попадают в акваторию Черного моря. Они затухают в более глубоком бассейне, не достигнув черноморского побережья. Если землетрясение происходит в западной части Черного моря, то высоты волн в этой части более значительные, чем в восточной, и наоборот.

Рис. 1. Очаги цунамигенных подводных землетрясений в Азово-Черноморском бассейне

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

Рис. 3. Распространение волн из очага генерации цунами (3) в моменты времени:
a – 15 мин., *b* – 1 ч. 10 мин

Рис. 4. Максимальные возвышения уровня моря при распространении волн из эллиптических очагов цунами:
a – 1, *b* – 2, *c* – 3, *d* – 4, *e* – 5, *f* – 6, *g* – 7, *h* – 8, *i* – 9, *j* – 10.

Выводы. В результате проведения численных экспериментов проанализировано распространение волн из 10 зон расположения возможных подводных сейсмических источников генерации цунами в Азо-

во-Черноморском бассейне. Локальное возвышение уровня эллиптической формы со временем трансформируется в кольцевую волну, которая распространяется по всей акватории. Наиболее подвержены влиянию волн ближайшие к источнику генерации цунами участки побережья. Расчеты показали, что повышения уровня моря вдоль побережья составляют десятки сантиметров и в некоторых зонах дости-

гают 1 м, что может иметь негативные последствия для экономики и населения этого региона.

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»).

Список литературы

1. Nikonov A.A., Gusiakov V.K., Fleifel L.D. Assessment of the tsunami hazard on the Russian coast based on a new catalogue of tsunamis in the Black Sea and the Sea of Azov // Russian Geology and Geophysics. 2018. Vol. 59, iss. 2. P. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.01.016>
2. Никонов А.А. Аргонавты на пути в Понт: испытание цунами // Природа, 2017а, № 2, с. 38–45.
3. Григораиш З.К. Черноморские цунами 1927 года по мареографическим записям // Труды Морского гидрофизического института АН СССР. 1959. Т. XVII. С. 59–67.
4. Григораиш З.К., Корнева Л.А. Волны цунами, сопровождавшие Анапское землетрясение 12 июля 1966 г. // Океанология. 1969. Т. IX, вып. 6. С. 988–995.
5. Рязанцев Г.Б., Монин В.Л. Мини-цунами на Азовском море // Система Планета Земля. М., Изд-во Моск. ун-та, 2017, с. 86–89.
6. Zaitsev A.I., Pelinovsky E.N. Forecasting of tsunami wave heights at the Russian coast of the Black Sea // Oceanology. 2011. Vol. 51, iss. 6. P. 907–915. <https://doi.org/10.1134/S0001437011050225>
7. Доценко С.Ф., Ингертов А.В. Характеристика волн цунами сейсмического происхождения в бассейне Черного моря по результатам численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2013. № 3. С. 25–34.
8. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalçiner [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2004. Vol. 109, C12023. <https://doi.org/10.1029/2003JC002113>
9. Доценко С.Ф., Ингертов А.В. Численные оценки цунамиопасности Крымско-Кавказского побережья Черного моря // Доповіді НАН України. 2009. № 6. С. 119–125.
10. Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. и др. Опыткартирования очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. С. 99–108.

ANALYSIS OF THE PROPAGATION OF TSUNAMI WAVES IN THE AZOV-BLACK SEA BASIN

A.Yu. Bazykina, V.V. Fomin

Marine Hydrophysical Institute of RAS
aleksa.44.33@gmail.com, v.fomin@ukr.net

Abstract. In the framework of the nonlinear model of long waves, numerical simulation of the evolution of tsunami waves in the Azov-Black Sea basin is performed. The propagation of waves from an elliptical source of tsunami generation caused by underwater earthquakes with a magnitude of 7 is shown. Calculations were carried out for 10 seismically active zones. Most of them are located along the Crimean-Caucasian coast of the Black Sea. The centers of tsunami generation were located on the continental slope along the 1000-meter isobath in the Black Sea and 10-meters in the Azov Sea. A bathymetric grid with a 30-second resolution was used. The maximum sea level rise in the coastal zone of the Black and Azov Seas is calculated. As a result of numerical experiments, it was revealed that the coastal areas nearest to the source of tsunami generation are most susceptible to the influence of waves. The rise in sea level along the coast was from tens of centimeters to 1 m. In general, tsunami waves can affect the entire coast of the Azov-Black Sea region. The north-western part of the Black Sea is the least vulnerable. Carrying out such calculations can be useful for minimizing the negative consequences in this region.

Keywords: tsunami in the Black and Azov Seas, numerical modeling, amplitude characteristics of tsunami waves.

References:

1. Nikonov, A.A., Gusiakov, V.K., Fleifel, L.D., 2018. Assessment of the tsunami hazard on the Russian coast based on a new catalogue of tsunamis in the Black Sea and the Sea of Azov. *Russian Geology and Geophysics*, 59(2), pp. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.01.016>
2. Nikonov A.A. Argonavty na puti v Pont: ispytanie tsunami [Argonauts on their way to Pontus: tsunami experience] // *Priroda*, 2017a, No 2, pp. 38–45.
3. Grigorash, Z.K., 1959. Chernomorskie tsunami 1927 goda po mareograficheskim zapisyam [Black Sea tsunami of 1927 by the mareographic records]. *Trudy Morskogo gidrofizicheskogo instituta AN SSSR*, XVII, pp. 59–67.
4. Grigorash, Z.K., Korneva, L.A., 1969. Volny tsunami, soprovozhdavshie Anapskoe zemletryasenie 12 iyulia 1966 g. [Tsunami waves that accompanied the Anapa earthquake on July 12, 1966]. *Okeanologia*, IX (6), pp. 988–995.
5. Ryazantsev G.B., Monin V.L. Mini-tsunami na Azovskom more [Mini-tsunami at the Azov Sea] // *Systema Planeta Zemlya*. M., Izd-vo Mosk. un-ta., 2017, pp. 86–89.
6. Zaitsev A.I., Pelinovsky E.N. Forecasting of tsunami wave heights at the Russian coast of the Black Sea // *Oceanology*. 2011. Vol. 51, iss. 6. P. 907–915. <https://doi.org/10.1134/S0001437011050225>
7. Dotsenko S.F., Ingerov A.V. Kharakteristika voln tsunami seysmicheskogo proishogdeniya v bassejne Chernogo morya po rezul'tatam chislennogo modelirovaniya [Characteristics of tsunami waves of seismic origin in the Black Sea basin by numerical simulation results] // *Morskoy gidrofizicheskiy jurnal*. 2013. No 3. pp.25–34.
8. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalçiner [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2004. Vol. 109, C12023. <https://doi.org/10.1029/2003JC002113>
9. Dotsenko, S.F., Ingerov, A.V., 2009. Chislennyye otsenki tsunamiopasnosti Krymsko-Kavkazskogo poberejia Chernogo morya [Numerical assessments of tsunami hazard of the Crimean-Caucasian coast of the Black Sea]. *Dopovidi NAN Ukrainy*, 6, pp. 119–125. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/8658> [Accessed 21 February 2018].
10. Ulomov V.I., Polyakova T.P. Shumilina L.S. et al. Opyt kartirovaniya ochagov zemletryaseniy [The experience of mapping the earthquakes] // *Seysmichnost i seysmicheskoe rayonirovanie Severnoy Evrazii*. M.: IFZ RAN, 1993. iss. 1. pp. 99–108.