

УДК 551.466.6

© А. Ю. Белоконь*, Д. И. Лазоренко, В. В. Фомин, 2023

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

*aleksa.44.33@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ В СИСТЕМЕ СЕВАСТОПОЛЬСКИХ БУХТ

Статья поступила в редакцию 10.03.2023, после доработки 05.06.2023, принята в печать 03.08.2023

Аннотация

В рамках численного моделирования выполнено исследование проникновения волн цунами в систему Севастопольских бухт. Для моделирования распространения цунами использовалась нелинейная гидродинамическая модель *SWASH*. Для определения краевых условий на жидкой границе расчетной области с помощью модели цунами Черного моря рассчитаны колебания уровня вблизи Севастополя в районе глубин 90 м при прохождении волн цунами из трех потенциально возможных очагов цунами, вызванных подводными землетрясениями магнитудой 7. Анализ результатов численных экспериментов показал, что при проникновении цунами в бухты Севастополя из ближнего очага подъем уровня моря в вершинах бухт может достигать 1–2 м. При этом максимальные амплитуды колебаний уровня получены для бухт Песочная и Карантинная, где они составили 2 м. В Севастопольской бухте подъемы уровня могут достигать около 0,5–1 м. Рассчитанные мареограммы демонстрируют, что наиболее интенсивные колебания происходят в первые 3–3,5 ч действия цунами. Показано, что от волн, приходящих из удаленных очагов, прибрежная зона Севастополя защищена мысом Херсонес. Численные эксперименты показали, что защитные молы на входе в Севастопольскую бухту не оказывают существенного влияния на вызванные цунами колебания уровня моря внутри бухты.

Ключевые слова: численное моделирование, цунами, *SWASH*, Севастопольская бухта, расчетные сетки, высокопроизводительные расчеты

© А. Ю. Белоконь*, Д. И. Лазоренко, В. В. Фомин, 2023

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, 299011, Russia

*aleksa.44.33@gmail.com

NUMERICAL SIMULATION OF TSUNAMI IN THE SYSTEM OF SEVASTOPOL BAYS

Received 10.03.2023, Revised 05.06.2023, Accepted 03.08.2023

Abstract

Within the framework of numerical simulation, a study was made of the penetration of tsunami waves into the system of Sevastopol bays. The non-linear *SWASH* hydrodynamic model was used to simulate the tsunami propagation. To determine the boundary conditions on the liquid boundary of the computational domain, using the Black Sea tsunami model, the level fluctuations near Sevastopol in the region of depths of 90 m were calculated during the passage of tsunami waves from three potential tsunami foci caused by underwater earthquakes of magnitude 7. It was found that in because of tsunami penetration into the bays of Sevastopol from the nearest focus, the rise in sea level in the tops of the bays could reach 1–2 m. The maximum amplitudes of level fluctuations were received in Pesochnaya and Karantinnaya bays, where they reached 2 m. In the Sevastopol Bay, the level rises were about 0.5–1 m. The most intense fluctuations were observed in the first 3–3.5 hours of the tsunami action. It is shown that the coastal zone of Sevastopol is protected from waves coming from distant foci by Cape Chersones. Numerical experiments have shown that the protective piers at the entrance to the Sevastopol Bay do not have a significant effect on the sea level fluctuations caused by the tsunami inside the bay.

Keywords: numerical simulation, tsunami, *SWASH*, Sevastopol Bay, computational grids, high-performance calculations

Ссылка для цитирования: Белоконь А.Ю., Лазоренко Д.И., Фомин В.В. Численное моделирование цунами в системе севастопольских бухт // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 3. С. 52–61.

doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-4

For citation: Belokon A. Yu., Lazorenko D. I., Fomin V. V. Numerical Simulation of Tsunami in the System of Sevastopol Bays. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 3, 52–61. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-4

1. Введение

Известно, что цунами представляют наибольшую опасность при приближении к берегу, где их скорость распространения и длина уменьшаются, а высота значительно возрастает. Особенно это касается проникновения волн цунами в узкие бухты, проливы, каналы, устья рек, где наличие боковых границ может приводить к фокусировке волновой энергии и усилению высот волн.

Явление цунами свойственно не только акваториям океанов, но и акваториям внутренних морей, хоть и не с такими катастрофическими последствиями. В Черном море известно 50 случаев цунами, которые произошли за последние 3000 лет [1]. Большинство из них имели сейсмическую природу, некоторые — оползневую или метеорологическую. Исследованию цунами в акватории Черного моря с помощью численного моделирования посвящен ряд работ [2–9]. В основном, эти работы направлены на изучение динамики волн цунами во всей акватории Черного моря, однако, для более детального изучения характера распространения волн цунами и определения наиболее опасных районов возникает необходимость рассмотрения отдельных участков прибрежной зоны. Участки со сложной геометрией, в особенности бухты, заливы и проливы, требуют более детального исследования, так как при проникновении в них волн могут происходить значительные усиления колебаний уровня моря.

Согласно [10], во время сильного землетрясения магнитудой $M \geq 7$, произошедшего в 103 г. в районе Севастопольской бухты, вода отступила в сторону моря на расстояние до 3–4-х км, при этом высота пришедших волн составила не менее 2 м. В [1, 11] упоминается о землетрясении 29 апреля 1650 г. в северо-западной части Черного моря, которое вызвало волны высотой около 3-х м вблизи Севастополя. Разрушительное подводное землетрясение магнитудой $M \geq 6,5$ произошло в 11 сентября 1927 в 30-ти км к юго-востоку от г. Ялта. Подъемы уровня при штиле наблюдались в разных местах и после сильных толчков. Последующие более слабые толчки с очагами у Севастополя и Балаклавы сопровождалась отходом воды от берега и накатывание одиночных волн на берег [12]. 26 декабря 1939 г. сильное землетрясение $M = 8$ произошло в г. Фатса (побережье Турции). По свидетельствам очевидцев, море отступило на 50 м, а затем затопило побережье на 20 м. Волны цунами пересекли Черное море и были зарегистрированы мареографами в Севастополе, где высота волн составила 50 см [10]. Опасность проникновения цунами в бухты заключается также и в том, что цунами могут возбуждать в них сейшевые колебания. Задача генерации сейшевых колебаний в Балаклавской бухте рассмотрена в работе [13].

Район Севастополя отнесен к особо сейсмоопасной области вследствие того, что здесь проходит граница зон разной балльности землетрясений. Согласно своду правил проектирования в цунамиопасных районах [14] и строительства в сейсмических районах [15] для Севастопольского региона нормативная сейсмическая интенсивность шкалы MSK-64 для степеней сейсмической опасности 10, 5 и 1 % в течение 50-ти лет составляет 8, 9 и 9 баллов соответственно, что характеризуется как разрушительное (8 баллов) и опустошительное (9 баллов).

Прибрежная зона Севастополя имеет довольно сложную геометрию. Береговая линия изрезана множеством бухт и мысов, которые образуют систему, состоящую из главной бухты — Севастопольской, и ответвленных от нее бухт меньших размеров. Севастопольская бухта представляет собой акваторию эстуарного типа с ограниченным водообменом с открытым морем из-за наличия двух защитных молов [16]. Длина Севастопольской бухты составляет 7 км, ширина — около 1 км, глубина изменяется от 20-ти м на входе до 4-х м в вершине, средняя глубина около 12-ти м. В работе [17] показано, что во время ветрового волнения защитные молы, установленные на входе в Севастопольскую бухту, оказывают максимальный защитный эффект при западном ветре.

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования проникновения волн цунами в систему севастопольских бухт. В качестве форсинга использованы три варианта гидродинамических очагов цунами в Черном море, вызванных подводными землетрясениями. Получены количественные оценки возможных повышений уровня моря при распространении цунами в бухтах Севастополя.

2. Математическая модель и входные данные

Для исследования цунами в системе севастопольских бухт использовалась нелинейная гидродинамическая модель *Simulating WAves till SHore (SWASH)* [13, 18]. Расчетная область (рис. 1) представляла собой бассейн с тремя жидкими границами, имеющий конфигурацию и рельеф дна прибрежной зоны Севастополя. Батиметрические данные взяты из оцифрованных крупномасштабных навигационных черноморских карт. На рис. 1 цифрами 1–21 показаны точки (виртуальные мареографы), в которых анализировались колебания уровня моря, вызванные цунами.

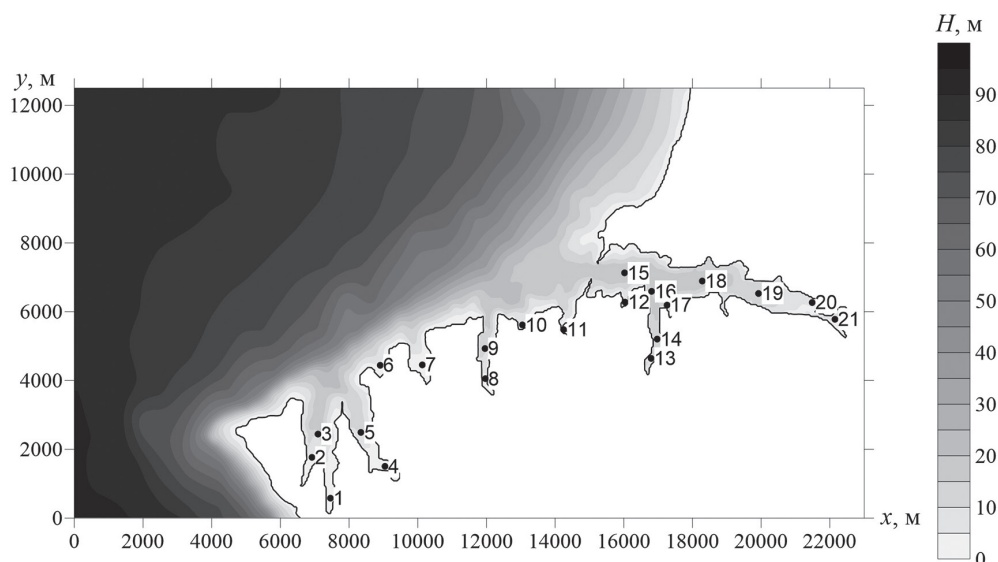


Рис. 1. Батиметрия дна в прибрежной зоне Севастополя и положение виртуальных мареографов 1–21 в системе севастопольских бухт. Точки 1–21 относятся к следующим бухтам: 1, 2, 3 — Казачья; 4, 5 — Камышовая; 6 — Абрамова; 7 — Круглая; 8, 9 — Стрелецкая; 10 — Песочная; 11 — Карантинная; 12 — Артиллерийская; 13, 14 — Южная; 15–21 — Севастопольская

Fig. 1. Bottom bathymetry in the coastal zone of Sevastopol and the position of virtual mariographs 1–21 in the system of Sevastopol bays. Points 1–21 refer to the following bays: 1, 2, 3 — Kazachya; 4, 5 — Kamyshevaya; 6 — Abramova; 7 — Kruglaya; 8, 9 — Streletskaia; 10 — Pesochnaia; 11 — Karantinnaya; 12 — Artillery; 13, 14 — South; 15–21 — Sevastopolskaya

На западной границе расчетной области ($x = 0$) задавались колебания уровня моря, полученные с помощью модели цунами для всего Черного моря [19], имеющей пространственное разрешение 500 м и шаг по времени 1 с. При моделировании использовались интерполированные батиметрические данные Азово-Черноморского бассейна с 30-секундным разрешением *General Bathymetric Chart of the Oceans Digital Atlas* (<https://www.gebco.net/>). Моделировалось три случая возникновения цунами в Черном море в результате подводного землетрясения с магнитудой 7. Параметры очагов генерации цунами определялись по эмпирическим формулам из [20]. Начальные смещения свободной поверхности моря, вызванные землетрясениями магнитудой 7, имеют высоту 1 м, большая и малая оси эллиптической области равны соответственно 50 и 29 км. Продольные оси эллипсов ориентированы вдоль изобаты 1500 м, поскольку все известные черноморские землетрясения, приведшие к цунами, происходили на материковом склоне на глубинах, не превышающих 1500 м. Положение рассматриваемых модельных очагов цунами представлено на рис. 2. Все они расположены в сейсмически активных зонах. Очаг 1 — наиболее близкий к Севастополю, очаг 2 подобен тому, который вызвал Ялтинское землетрясение 12 сентября 1927 г. Очаг 3 — удаленный очаг, который расположен сейсмически активной зоне вблизи турецкого побережья. Как показали расчеты, в процессе опускания начального возвышения уровня моря образуется кольцевая волна, которая распространяется с течением времени по всей акватории Черного моря, при выходе на шельф фронт цунами становится практически плоским. Таким образом, задание на западной границе расчетной области (рис. 1) крайних условий в виде полученных мареограмм вполне оправдано.

На южной и северной жидких границах расчетной области использовалось условие излучения. На твердых участках границы задавалось условие непротекания. Шероховатость дна учитывалась с помощью параметра Маннинга $n = 0,019 \text{ с/м}^{1/3}$. Вращение Земли не учитывалось. Все расчеты выполнялись на период времени 5 ч с шагом 50 м по пространству и шагом по времени 0,2 с. Колебания уровня моря в бухтах фиксировались виртуальными мареографами 1–21 (рис. 1).

3. Обсуждение результатов численных экспериментов

Колебания уровня моря в прибрежной зоне Севастополя для трех очагов генерации цунами показаны на рис. 3 (западная граница расчетной области, глубина 90 м). Сопоставление графиков показывает, что для ближнего очага цунами (1 на рис. 2) максимальное повышение уровня моря на подходе к бухтам

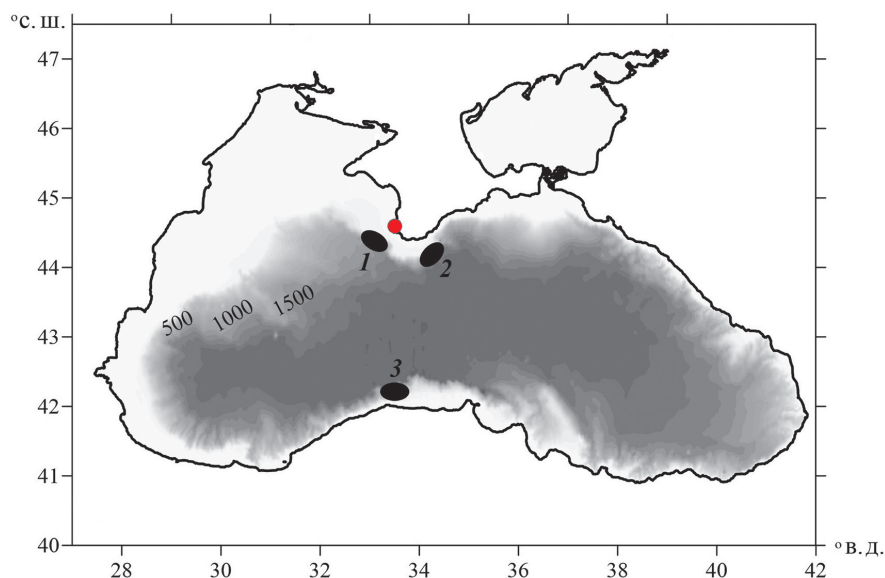


Рис. 2. Положение трех гипотетических очагов цунами в Черном море: 1 — ближайший очаг по отношению к севастопольским бухтам; 2 — очаг, подобный очагу, вызвавшему Ялтинское землетрясение 12 сентября 1927 г.; 3 — удаленный очаг. Красным кружком отмечена область исследования

Fig. 2. The position of three hypothetical tsunami foci in the Black Sea: 1 — the nearest focus in relation to the Sevastopol bays; 2 — focus similar to that caused the Yalta earthquake on September 12, 1927; 3 — remote focus. The red circle marks the study area

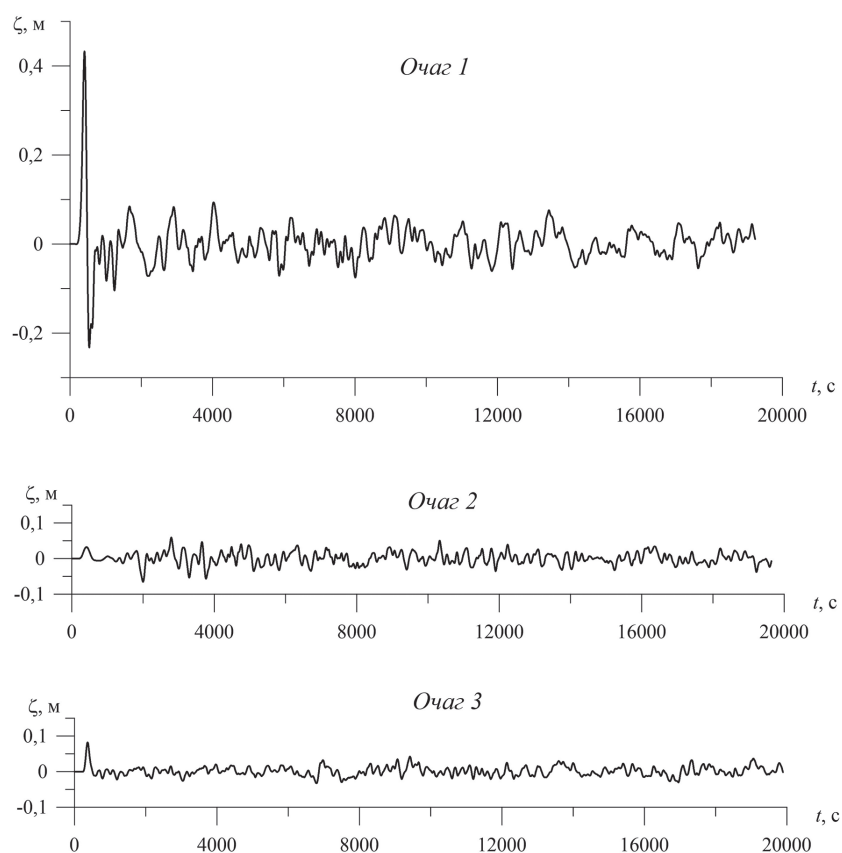


Рис. 3. Колебания уровня моря в прибрежной зоне Севастополя, вызванные очагами цунами 1–3

Fig. 3. Sea level fluctuations in the coastal zone of Sevastopol, caused by tsunami foci 1–3

составляет 0,44 м, максимальное понижение — 0,24 м; для очага, расположенного в Ялтинской сейсмически активной зоне, и удаленного очага цунами (2 и 3 на рис. 2) отклонения уровня моря составили около $\pm 0,07$ — $\pm 0,09$ м. Такие малые амплитуды колебаний уровня для очагов 2 и 3 объясняются тем, что взморье Севастополя защищено мысом Херсонес от волн, приходящих с юга и юго-востока. Таким образом, максимум энергии цунами от этих очагов приходится на южное побережье Крыма. Взморья Севастопольской бухты достигают только лишь волны, огибающие мыс Херсонес. В случае с ближним очагом 1 максимум энергии приходится на головную волну, за ней следуют колебания меньшей амплитуды.

Результаты расчета времени добегания волн до бухт Севастополя из трех очагов цунами показаны на рис. 4. Видно, что за исключением самой большой бухты — Севастопольской, это время составило 17–22 мин, 29–34 мин, 44–48 мин для очагов цунами 1–3 соответственно. Проникновение волн в Севастопольскую бухту происходит спустя 23–34 мин, 35–46 мин, 50–61 мин из очагов цунами 1–3 соответственно.

На основе данных виртуальных мареографов (рис. 1) рассчитаны максимальные повышения уровня моря в бухтах, вызванные проникновением цунами в бухты для трех гипотетических очагов (рис. 5). Установлено, что внутри бухт амплитуды волн возрастают более, чем в 2–4 раза по сравнению с амплитудами на

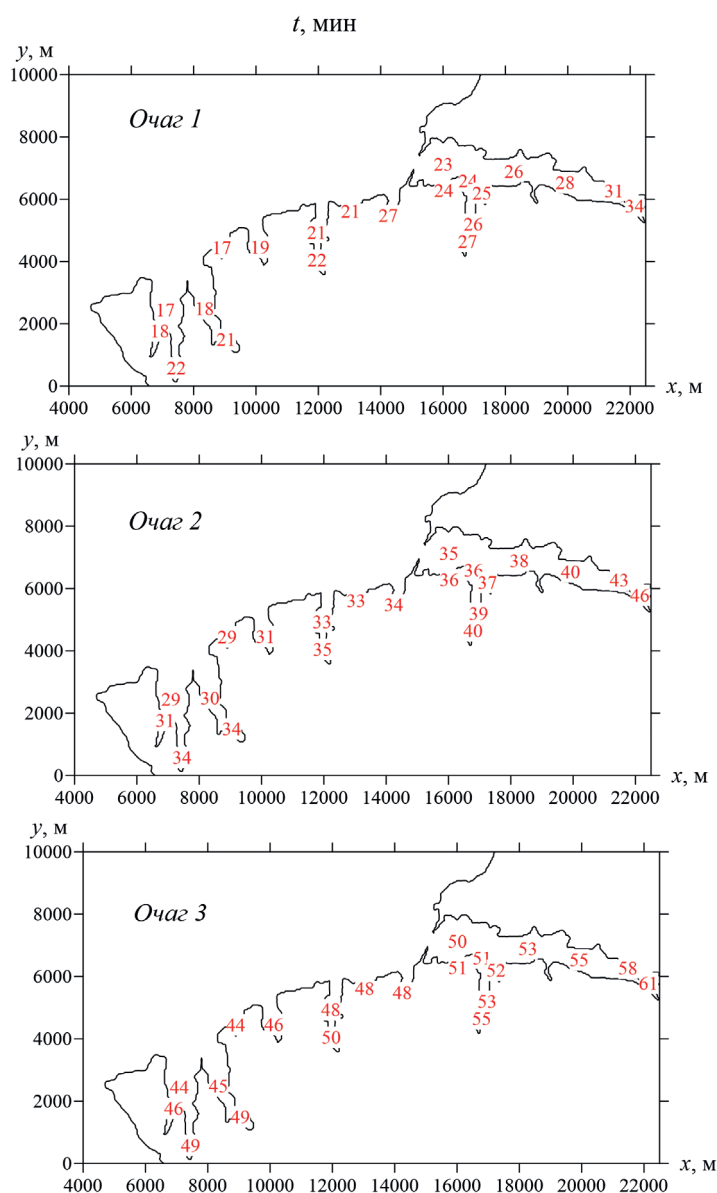


Рис. 4. Время добегания волн цунами (мин) до побережья севастопольских бухт из очагов цунами 1–3

Fig. 4. Time of tsunami waves propagation (min) to the coast of Sevastopol Bays from tsunami foci 1–3

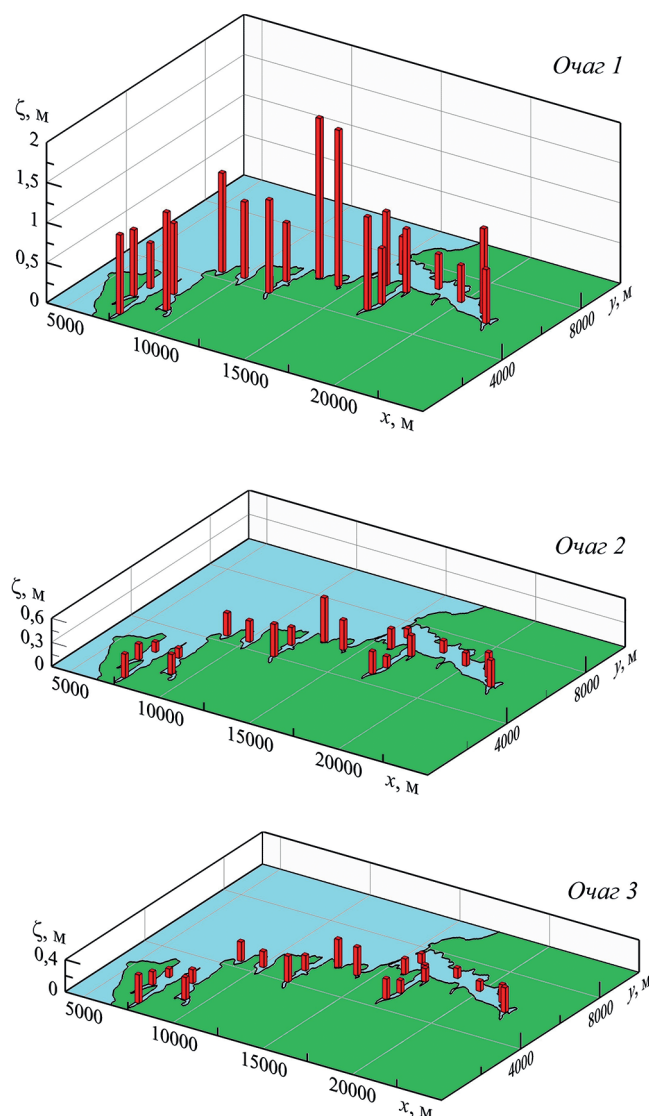


Рис. 5. Максимальные повышения уровня моря при распространении волн из очагов цунами 1–3 в точках, где расположены виртуальные мареографы

Fig. 5. Maximum sea level rise during the propagation of waves from tsunami foci 1–3 at the points where virtual mariographs are located

входе в расчетную область. Максимальные повышения уровня моря получены для бухт Песочная (точка 10 на рис. 1) и Карантинная (точка 11 на рис. 1), где они могут достигать 2 м в случае прихода волн из ближнего очага 1. В вершинах бухт Камышовая (точка 4 на рис. 1), Абрамова (точка 4 на рис. 1), Стрелецкая (точка 8 на рис. 1) и Южная (точка 13 на рис. 1), которая примыкает к Севастопольской бухте, повышения уровня могут достигать 1,2 м. В Казачьей (точка 1 на рис. 1) и Артиллерийской (точка 12 на рис. 1) бухтах амплитуда колебаний уровня составила около 1 м. В Севастопольской бухте подъемы уровня составили 0,5–1 м. В случае проникновения волн в бухты Севастополя из очага 2 амплитуды колебаний уровня внутри бухт не превысили 0,6 м, из очага 3 они составили не более 0,4 м.

На рис. 6 представлены рассчитанные мареограммы для некоторых бухт Севастополя при распространении цунами из ближнего очага 1. Видно, что после проникновения волн цунами в бухты максимальные колебания происходят в течение первых 3–3,5 часов действия цунами, затем их амплитуда начинает затухать.

Численные расчеты показали, что при отсутствии защитных молов на входе в Севастопольскую бухту амплитуды колебаний уровня могут увеличиваться не более, чем на 10 %. Таким образом, наличие молов не

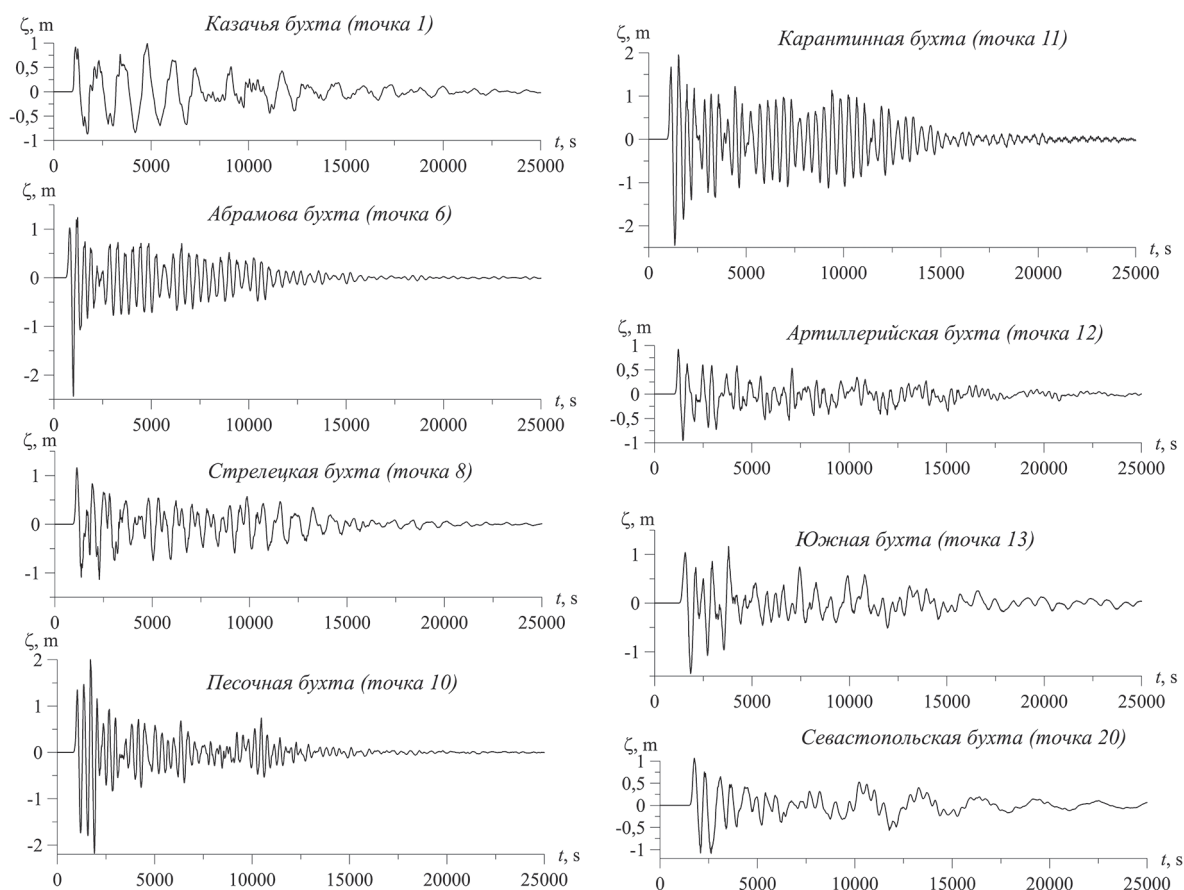


Рис. 6. Мареограммы в некоторых бухтах Севастополя при распространении цунами из очага 1

Fig. 6. Mareograms in some bays of Sevastopol during tsunami propagation from focus 1

приводит к существенным изменениям волнового поля и высот уровня моря при проникновении цунами внутрь бухты. Это связано с тем, что открытая и наиболее глубоководная часть входа в бухту является достаточно широкой, поэтому в бухту проникает значительная часть энергии цунами.

4. Заключение

Представлены результаты численного моделирования проникновения волн цунами в бухты Севастополя. На первом этапе с помощью модели цунами Черного моря исследовалась эволюция волн цунами из трех потенциально возможных очагов, вызванных подводными землетрясениями магнитудой 7. Рассчитаны зависимости от времени колебаний уровня моря вблизи Севастополя. На втором этапе полученные мареограммы использовались в качестве краевых условий на жидкой границе расчетной области, для которой с помощью модели *SWASH* выполнялось численное моделирование распространения волн цунами в прибрежной зоне Севастополя с проникновением волн в бухты.

Установлено, что время добегания волн цунами от ближнего очага до бухт Севастополя составляет около 17 мин, для удаленных очагов — от 30 мин и более. Согласно результатам численного моделирования максимальные повышения уровня моря при проникновении волн из ближнего очага в бухты Севастополя, за исключением крупнейшей бухты — Севастопольской, могут достигать 1,5–2 м, а непосредственно в самой Севастопольской бухте они не превышают 1 м. Наиболее интенсивные колебания уровня происходят в первые 3–3,5 ч действия цунами. В случае проникновения волн в бухты Севастополя из удаленных очагов амплитуды колебаний уровня внутри бухт не превысили 0,6 м, поскольку прибрежная зона Севастополя защищена мысом Херсонес с юга и юго-востока. Анализ проведенных расчетов показал, что наличие или отсутствие защитных молв на входе в Севастопольскую бухту не приводит к существенным изменениям волнового поля и подъемов уровня моря при распространении цунами внутри бухты.

Финансирование

Работа выполнялась в рамках научной темы МГИ № FNNN-2021–0005. Математическое моделирование выполнялись на вычислительном кластере МГИ (www.hpc-mhi.org).

Funding

The investigation was carried out within the framework of the state assignment on theme No FNNN-2021-0005. Mathematical modeling was performed on the MHI computing cluster (www.hpc-mhi.org).

Литература

1. 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
2. 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. Oceans. 2004. Vol. 109, Iss. C12. C12023. doi:10.1029/2003JC002113
3. Пелиновский Е.Н., Зайцев А.И. Оценка и картирование опасности цунами на Черноморском побережье Украины // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 3 (90). С. 44–50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-i-kartirovanie-opasnosti-tsunami-na-chernomorskom-poberezhie-ukrainy> (дата обращения: 09.03.2023)
4. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Ялченир А. Прогноз высот волн цунами на Черноморском побережье России // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognoz-vysot-voln-tsunami-na-chernomorskom-poberezhie-rossii> (дата обращения: 09.03.2023)
5. 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. Т. 2, Вып. 26. С. 287–300.
6. Доценко С.Ф., Ингеров А.В. Характеристика волн цунами сейсмического происхождения в бассейне Черного моря по результатам численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2013. № 3. С. 25–34.
7. Мазова Р.Х., Кисельман Б.А., Осипенко Н.Н., Колчина Е.А. Анализ спектральных характеристик черноморских цунами // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 2 (99). С. 52–66. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-spektralnyh-harakteristik-chernomorskih-tsunami> (дата обращения: 09.03.2023).
8. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Баранова Е.А. и др. Численное моделирование рас-пространения 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. Никонов А.А. Повторяемость цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика Земли. 1997. Т. 33. С. 72–87.
11. Никонов А.А. Неизвестное землетрясение в Крыму // Природа. 1995. № 8. С. 88–93.
12. Безушко Д.И., Мироненко И.Н., Мурашко А.В. Цунами Черноморского побережья Украины // Вісник Одеського національного морського університету. 2015. № 1 (43). С. 82–90. URL: <https://meb.com.ua/onmu/201543.pdf>
13. Фомин В.В., Белоконов А.Ю., Харитонов Л.В., Алексеев Д.В. Численное моделирование проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 4. С. 405–421. doi:10.22449/0233–7584–2022–4–405–421
14. СП 292.1325800.2017 Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования. Москва, 2017. 147 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456088760>
15. СП 14.13330.2018 Свод правил. Строительство в сейсмических районах, 2018. 238 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550565571>
16. Стокозов Н.А. Морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. Вып. 23. С. 198–208.

17. Алексеев Д.В., Иванов В.А., Иванча Е.В., Фомин В.В., Черкесов Л.В. Оценка защитных молов на характеристики ветрового волнения в Севастопольской бухте // Метеорология и гидрология. 2013. № 4. С. 47–57.
18. SWASH User Manual. SWASH version 7.01 / The SWASH team. Delft: Delft University of Technology, 2012. 144 p.
19. Базыкина А.Ю., Михайличенко С.Ю., Фомин В.В. Численное моделирование цунами в Черном море, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г. // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 4. С. 318–328. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-318-328
20. Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В., Медведева Н.С., Саваренская О.Е., Степанова М.В. Опыт картирования очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Москва: Институт физики Земли РАН, 1993. Вып. 1. С. 99–108.

References

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, 59(2), 193–205. doi:10.1016/j.rgg.2018.01.016
2. Yalciner A., Pelinovsky E., Talipova T. et al. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental and numerical data. *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2004, 109(C12), C12023. doi: 10.1029/2003JC002113
3. Pelinovsky E.N., Zaitsev A.I. Assessment and mapping of tsunami hazard on the Black Sea coast of Ukraine. *Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. R.E. Alekseeva*. 2011, 3(90), 44–50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-i-kartirovanie-opasnosti-tsunami-na-chernomorskom-poberezhie-ukrainy> (Accessed 08.09.2023) (in Russian).
4. Zaitsev A.I., Pelinovsky E.N., Yalciner A. Forecast of tsunami wave heights on the Black Sea coast of Russia. *Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. R.E. Alekseeva*. 2011, 1, 35–43. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognoz-vysot-voln-tsunami-na-chernomorskom-poberezhie-rossii> (Accessed 08.09.2023) (in Russian).
5. Dotsenko S.F. Numerical modeling of tsunamis in the Black, Azov and Caspian seas as a necessary element of regional tsunami early warning systems. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa*. 2012, 2(26), 287–300.
6. Dotsenko S.F., Ingerov A.V. Characteristics of Tsunami Waves of Seismic Origin in the Black Sea Basin Based on the Results of Numerical Modeling. *Morskoy Gidrofizicheskii Zhurnal*. 2013, 3, 25–34 (in Russian).
7. Mazova R. Kh., Kiselman B.A., Osipenko N.N., Kolchina E.A. Analysis of spectral characteristics of Black Sea tsunami. *Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. R.E. Alekseeva*. 2013, 2(99), 52–66 (in Russian). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-spektralnykh-harakteristik-chernomorskiykh-tsunami> (Accessed 08.09.2023).
8. 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*. 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. Nikonov A.A. Tsunami frequency on the shores of the Black and Azov Seas. *Fizika Zemli*. 1997, 33, 72–87 (in Russian).
11. Nikonov A.A. Unknown earthquake in Crimea. *Priroda*, 1995, 8, 88–93 (in Russian).
12. Bezushko D.I., Mironenko I.N., Murashko A.V. Tsunami of the Black Sea coast of Ukraine. *Vestnik Odesskogo Natsionalnogo Morskogo Universiteta*. 2015, 1(43), 82–90 (in Russian). URL: <https://meb.com.ua/onmu/201543.pdf> (Accessed 08.09.2023).
13. Fomin V.V., Belokon A. Yu., Kharitonova L.V., Alekseev D.V. Numerical Simulation of Tsunami Wave Propagation to the Balaklava Bay. *Physical Oceanography*. 2022, 29(4), 379–394. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-379-394
14. SP 292.1325800.2017. Buildings and Structures on Tsunami Hazardous Areas. Regulations of Design. Moscow, 147 p. (in Russian). URL: <https://docs.cntd.ru/document/456088760> (Accessed 08.09.2023).
15. SP 14.13330.2018. Seismic Building Design Code. Moscow, 238 p. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550565571> (Accessed 08.09.2023) (in Russian).
16. Stokozov N.A. Morphometric characteristics of the Sevastopol and Balaklava bays. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa*. 2010, 23, 198–208 (in Russian).
17. Alekseev D.V., Ivanov V.A., Ivancha E.V. et al. Estimation of the effect of protective piers on wind wave parameters in the Sevastopol Bay. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2013, 38(4), 248–255. doi:10.3103/S1068373913040067
18. SWASH User Manual. SWASH version 7.01 / The SWASH team. Delft: Delft University of Technology. 2012, 144 p.
19. Bazykina A. Yu., Mikhailichenko S. Yu., Fomin V.V. Numerical simulation of tsunami in the Black Sea caused by the earthquake on September 12, 1927. *Physical Oceanography*. 2018, 25(4), 295–304. doi:10.22449/1573-160X-2018-4-295-304

20. *Ulomov V.I., Polyakova T.P., Shumilina L.S.* et al. Experience in mapping earthquake foci. Seismichnost i seismicheskoe rayonirovanie Severnoy Evrazii. *Moskva, Institut fiziki Zemli RAN.* 1993, 1, 99–108 (in Russian).

Об авторах

БЕЛОКОНЬ Александра Юрьевна, РИНЦ Author ID: 852404, ORCID ID: 0000-0002-1299-0983,
WoS Researcher ID: M-6839–2018, aleksa.44.33@gmail.com
ЛАЗОРЕНКО Дмитрий Иванович, РИНЦ Author ID: 851086, ORCID ID: 0000-0001-7524-565X,
WoS Researcher ID: J-1925–2015, d.lazorenko.dntmm@gmail.com
ФОМИН Владимир Владимирович, РИНЦ Author ID: 846690, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460,
WoS Researcher ID: H-8185–2015, v.fomin@ukr.net