

Численное моделирование проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту

В. В. Фомин, А. Ю. Белоконь , Л. В. Харитоновна, Д. В. Алексеев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 *aleksa.44.33@gmail.com*

Поступила в редакцию 31.03.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022;
принята к публикации 04.05.2022.

Цель. На основе результатов численного моделирования исследовать процесс проникновения волн цунами из гипотетических очагов землетрясений в Балаклавскую бухту и провести цунамирайонирование береговой полосы бухты – цель данной работы.

Методы и результаты. Представлены результаты численного моделирования проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту с последующим затоплением побережья. С помощью нелинейной модели длинных волн решалась задача об эволюции волн цунами в Черном море из трех гипотетических очагов землетрясений. Получены зависимости от времени колебаний уровня моря на входе в Балаклавскую бухту, они использовались в качестве краевых условий на жидкой границе расчетной области, для которой с помощью модели *SWASH* выполнялось численное моделирование распространения волн цунами в бухте с последующим накатом на берег.

Выводы. При распространении волн цунами в Балаклавской бухте формируются сейшевые колебания уровня моря с периодом ~ 8 мин, соответствующие моде Гельмгольца. Внутри бухты высоты цунами увеличиваются в 5–6 раз по сравнению с входом в расчетную область. Колебания уровня моря максимальны в вершине бухты, где его подъем достигает 1,4–1,5 м. Наибольшему затоплению подвержены восточные берега Балаклавской бухты и берега, примыкающие к ее вершине. Значения на суше уровня воды, отсчитываемого от уровня грунта, достигают 1,0–1,5 м, в вершине бухты 1,8 м. Максимальная протяженность горизонтального заплеска для восточного берега составляет 60 м, в вершине бухты 90 м.

Ключевые слова: численное моделирование, цунами, цунамирайонирование, *SWASH*, Балаклавская бухта

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

Для цитирования: Численное моделирование проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту / В. В. Фомин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 4. С. 405–421. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-405-421

Numerical Simulation of Tsunami Wave Propagation to the Balaklava Bay

V. V. Fomin, A. Yu. Belokon [✉], L. V. Kharitonova, D. V. Alekseev

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
[✉] aleksa.44.33@gmail.com

Abstract

Purpose. To investigate the process of tsunami wave propagation from the hypothetical earthquake foci to the Balaklava Bay, and to zone the tsunami impact upon the bay coastline based on the results of numerical modeling, are the purposes of the paper.

Methods and Results. The results of numerical simulation of the tsunami wave propagation to the Balaklava Bay with subsequent flooding of the coast are presented. The problem of the tsunami wave propagation from three hypothetical earthquake foci and their evolution in the Black Sea was solved using the nonlinear model of long waves. Time dependences of the sea level fluctuations at the entrance to the Balaklava Bay were obtained. They were applied as boundary conditions at the liquid boundary of the computational domain, where the *SWASH* model had been used to simulate numerically the tsunami wave propagation in the bay with their subsequent run-up to the coast.

Conclusions. Propagation of tsunami waves in the Balaklava Bay is accompanied by formation of the sea level seiche oscillations with a period ~ 8 min which correspond to the Helmholtz mode. Inside the bay, the tsunami heights increase by 5–6 times as compared to those at the entrance to the computational domain. The sea level fluctuations are maximal at the bay top, where its rise achieves 1.4–1.5 m. The eastern coast of the Balaklava Bay and the one adjacent to its top are subject to the strongest flooding. The values of water level on land measured from the ground level, reach 1.0–1.5 m, and at the bay top – 1.8 m. At the eastern coast of the bay, the flooding maximum length constitutes 60 m, at its top – 90 m.

Keywords: numerical simulation, tsunami, tsunami zoning, *SWASH*, Balaklava Bay

Acknowledgment: the investigation was carried out within the framework of the state assignment on theme No. 0555-2021-0005.

For citation: Fomin, V.V., Belokon, A.Yu, Kharitonova, L.V. and Alekseev, D.V., 2022. Numerical Simulation of Tsunami Wave Propagation to the Balaklava Bay. *Physical Oceanography*, 29(4), pp. 379-394. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-379-394

Введение. Цунами в Черном море – редкое, но не безопасное для побережья данного региона явление. За последние 3000 лет здесь произошло 50 событий, которые вызвали цунами [1]. Подавляющее большинство этих событий имели сейсмическую природу, а некоторые, вероятно, оползневую или метеорологическую. Не исключено, что они могут произойти и в будущем. Сведений о цунами в Черном море на сегодняшний день мало. Это обуславливает необходимость проведения численных расчетов для определения возможных высот волн и наиболее подверженных воздействию цунами участков Черноморского побережья.

Основные исследования черноморских цунами с помощью численного моделирования проведены в [2–8]. Эти работы посвящены изучению динамики волн цунами в акватории Черного моря в целом. В них оценивались возможные высоты уровня моря вдоль побережья при распространении волн из модельных очагов цунами. При этом важно отметить, что отдельные прибрежные участки, в особенности бухты и заливы, требуют более детального

исследования, так как при проникновении в них волн могут происходить значительные усиления колебаний уровня моря.

Во время Ялтинского землетрясения 12 сентября 1927 г. в нескольких пунктах Крымско-Кавказского побережья – от Евпатории до Батуми – прибрежными мареографами были зафиксированы волны цунами. Очевидцы также сообщали о внезапных изменениях уровня моря вдоль различных участков побережья [9, 10]. По их свидетельствам, 12 сентября после главного толчка уровень моря в Балаклавской бухте понизился на 0,7 м, осушив часть бухты, на мели остались небольшие суда и лодки, стоявшие у берега. Затем спустя 40 мин уровень моря начал стремительно нарастать, поднявшись выше среднего более чем на 0,5 м и затопив пространство длиной 15 м. Таким образом, амплитуда колебаний составила ~ 1,2 м [11, 12]. Как утверждали очевидцы, колебания уровня моря в мелководной вершине бухты были особенно заметными. Отмечено, что эти изменения уровня наблюдались при полном штиле. Согласно [11], причиной могли быть сейшевые колебания, вызванные проникновением в бухту волн со стороны открытого моря.

Исходя из свода правил проектирования в цунамиопасных районах ¹ и строительства в сейсмических районах ², для Балаклавской бухты нормативная сейсмическая интенсивность по шкале *MSK-64* для трех степеней сейсмической опасности (10, 5, 1 %) в течение 50 лет составляет 8, 8 и 9 баллов соответственно, что характеризует разрушительное (8 баллов) и опустошительное (9 баллов) землетрясение. К тому же этот район отнесен к особо сейсмоопасной области вследствие того, что здесь проходит граница зон разной балльности землетрясений.

Балаклавская бухта является узкой полузамкнутой бухтой с затрудненным водообменом с акваторией Черного моря. Распространение длинных волн в таких бухтах может сопровождаться значительными подъемами уровня моря и затоплением суши [13]. Поэтому возникает необходимость уточнения характеристик цунамиопасности в Балаклавской бухте на основе численного моделирования.

В работе [14] выполнено моделирование распространения длинной волны в Балаклавской бухте без учета наката на берег. Показано, что при вхождении в бухту амплитуда волны увеличивается в 4–5 раз, вследствие узости и изогнутости бухты наблюдаются довольно продолжительные колебания уровня моря вдоль ее акватории с частичным выходом волн в ее более мелководную зону. Таким образом, допустимо предположить, что цунами могут приводить к образованию в бухте сейш. Согласно [15], в бухтах с открытой внешней границей сейши являются индуцированными, т. е. их возбуждение происходит через открытую границу.

Сейшевые колебания, затрагивающие всю акваторию Черного моря, исследовались в работах [16–18]. Однако конфигурация береговой черты

¹ Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования : СП 292.1325800.2017 : утв. М-вом строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации 23.06.2017 : введ. в действие с 24.12.2017. Москва, 2017. 147 с.

² Строительство в сейсмических районах : СП 14.13330.2018 2018 : утв. М-вом строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации 24.05.2018 : введ. в действие с 25.11.2018. Москва, 2018. 238 с.

и рельеф дна могут оказывать влияние на формирование спектра собственных колебаний каждого залива или бухты [19]. Параметры сейш для конкретной прибрежной области различны вследствие того, что прибрежные акватории значительно различаются своими резонансными характеристиками [20].

Исследование сейшевых колебаний в Балаклавской бухте проводилось в [21], где на основе анализа энергетических зависимостей получены периоды первых четырех мод собственных колебаний.

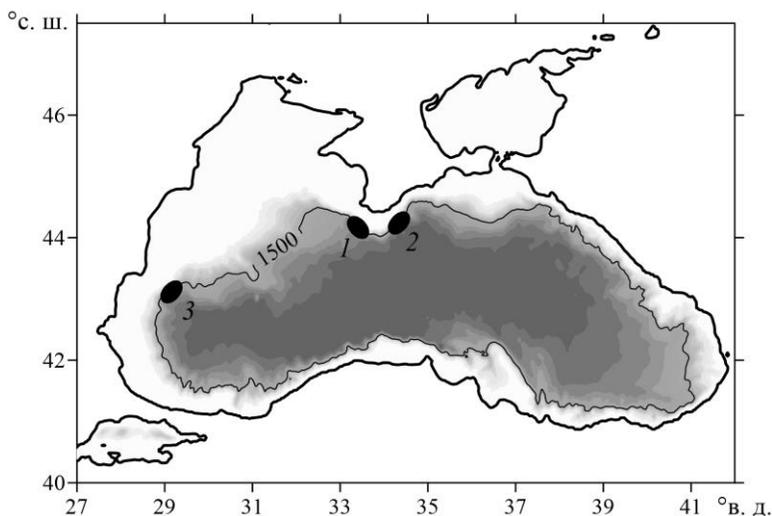
В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту с учетом механизма затопления – осушения побережья. Рассматриваются два вида граничных условий на входе в бухту. В первом случае с помощью нелинейной модели длинных волн решалась задача об эволюции волн цунами в Черном море из трех сейсмических очагов. Получены зависимости от времени колебаний уровня моря на входе в Балаклавскую бухту. При втором виде граничных условий на входе в бухту задавалось начальное возвышение в виде солитона. Эти зависимости использовались в качестве краевых условий на жидкой границе расчетной области для Балаклавской бухты, с помощью модели *Simulating WAves till SHore*³ (*SWASH*) выполнялось численное моделирование распространения волн цунами в бухте с последующим накатом на берег. Часть представленных здесь результатов обсуждалась в диссертационной работе одного из авторов⁴.

Материалы и методы. Для расчетов волн цунами в Азово-Черноморском бассейне использовалась батиметрия, заданная на прямоугольной сетке с 30-секундным пространственным разрешением. Расчеты эволюции цунами в Черном море из сейсмического очага проводились с помощью модели нелинейных длинных волн, описанной в [22]. Моделировалось три случая возникновения цунами с магнитудой 7, так как вблизи Крымского побережья более сильные землетрясения не замечены [1]. Параметры очагов генерации цунами определялись по эмпирическим формулам [23]. Очаги имели эллиптическую форму и были ориентированы вдоль изобаты 1500 м, поскольку все известные черноморские цунамигенные землетрясения происходили на материковом склоне вдоль изобат, не превышающих этой величины. Положение модельных очагов землетрясений для трех случаев цунами приведено на рис. 1.

На первом этапе с помощью модели распространения цунами для всего Черного моря [22] были получены зависимости от времени колебаний уровня моря на подходе к Балаклавской бухте. Затем для каждого очага расчеты цунами в Балаклавской бухте выполнялись по модели *SWASH* на период времени 3 ч с шагом 5 м по пространству и шагом интегрирования по времени 0,01 с.

³ SWASH User Manual. SWASH version 7.01 / The SWASH team. Delft : Delft University of Technology, 2012. 144 p. URL: https://swash.sourceforge.io/online_doc/swashuse/swashuse.html (date of access: 28.06.2022).

⁴ Белоконов А. Ю. Математическое моделирование распространения и трансформации волн цунами в прибрежной зоне : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Севастополь, 2022. 163 с.



Р и с. 1. Положение трех гипотетических очагов цунами в Черном море: 1 – ближний очаг по отношению к Балаклавской бухте; 2 – очаг, подобный вызвавшему Ялтинское землетрясение 12 сентября 1927 г.; 3 – удаленный очаг

F i g. 1. Position of three hypothetical tsunami foci in the Black Sea: 1 – the focus nearest to the Balaklava Bay; 2 – the focus similar to that which caused the Yalta earthquake on September 12, 1927; 3 – the remote focus

Динамика волн в гидродинамической негидростатической модели *SWASH* описывается нелинейными уравнениями мелкой воды, включающими слагаемое с негидростатическим давлением:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right), \quad (2)$$

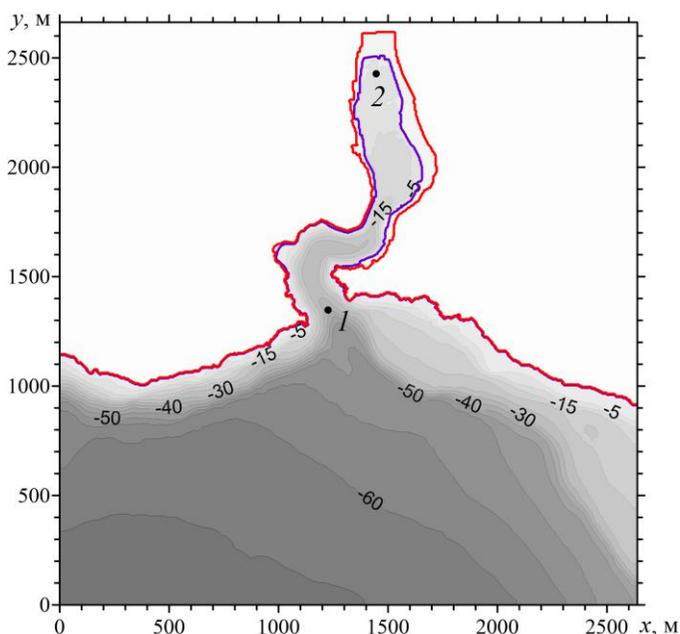
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Здесь t – время; x, y – декартовы координаты; ось z направлена вверх; $\zeta(x, y, t)$ – отклонение свободной поверхности от невозмущенного уровня; $h = d + \zeta$ – полная глубина, равная сумме отклонения свободной поверхности и глубины d при невозмущенном состоянии жидкости; u и v – осредненные по глубине x и y компоненты скорости; $q(x, y, z, t)$ – негидростатическое давление; g – ускорение свободного падения; $c_f = gn^2/h^{1/3}$ – коэффициент донного трения, $n = 0,022$ – параметр шероховатости Маннинга; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx},$

τ_{yy} – компоненты тензора горизонтальных турбулентных напряжений; ν_t – коэффициент турбулентной вязкости.

Расчетная область, включающая рельеф дна и суши Балаклавской бухты, показана на рис. 2.



Р и с. 2. Рельеф дна (м) расчетной области: вход в Балаклавскую бухту – точка 1; вершина бухты – точка 2; линия постоянной глубины – синяя кривая; линия постоянной высоты на суше – красная кривая

F i g. 2. Bottom relief (m) of the calculation domain: entrance to the Balaklava Bay – point 1; the bay top – point 2; line of constant depth – blue curve; line of constant height at land – red curve

В качестве краевых условий на южной границе расчетной области (рис. 2, $y = 0$) использовались мареограммы, полученные с помощью модели распространения цунами для Черного моря [22]. Для выяснения возможности возникновения в Балаклавской бухте сейшевых колебаний при кратковременном внешнем воздействии был выполнен численный эксперимент, в котором волна цунами задавалась в виде одиночной волны – солитона [24]:

$$\zeta(y, t) = \zeta_0 \cosh^{-2} \left(\frac{y - ct}{\lambda} \right), \quad (4)$$

где $\zeta_0 = 0,35$ м – высота солитона; t – время; $\lambda = 2H \sqrt{H/3\zeta_0}$ – горизонтальный масштаб солитона; $c = c_0(1 + \zeta_0/2H)$ – фазовая скорость солитона; $c_0 = \sqrt{gH}$; $H = 70$ м – глубина моря.

Для оценки периодов сейшевых колебаний в бухте мареограммы подвергались спектральному анализу (использовались скрипты, разработанные в [25]).

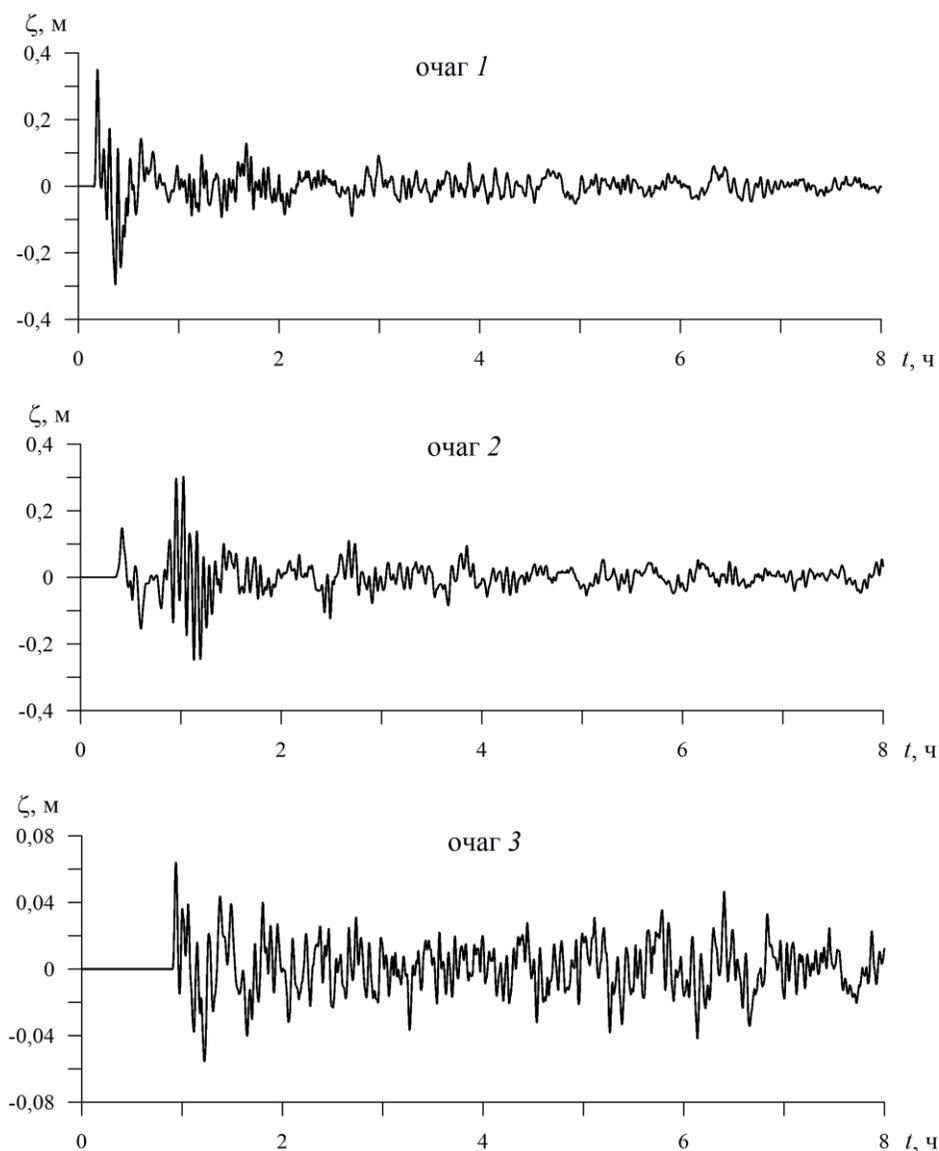
Для анализа воздействия цунами на конкретную прибрежную территорию, согласно своду правил ¹, применяются следующие характеристики: вертикальный заплеск – превышение уровня максимального проникновения цунами (линия заплеска) над невозмущенным уровнем моря во время цунами; глубина потока (динамическая глубина) – уровень воды при цунами, отсчитываемый по вертикали от уровня грунта в данном месте в данный момент времени; горизонтальный заплеск – величина горизонтальной проекции зоны затопления; зона затопления – часть побережья, подвергшегося затоплению, ограниченная сверху линией заплеска.

В каждой точке исследуемой области (x, y) рассчитывалась величина $H_f(x, y) = \max_{0 < t < \tau} [D(x, y, t)] - D(x, y, 0)$, где $D(x, y, t)$ – глубина потока в заданный момент времени; $D(x, y, 0)$ – глубина потока в начальный момент времени; $\tau = 3$ ч – время воздействия цунами. Смысл величины H_f следующий. Если точка (x, y) находится на суше, то H_f соответствует максимально возможной глубине затопления прибрежной полосы. Если точка (x, y) располагается в море, то H_f соответствует максимально возможному подъему уровня моря. Максимально возможная граница зоны затопления (граница максимального вертикального заплеска) определялась по значению $H_f = 0,05$ м.

Результаты исследования и их обсуждение. Для трех очагов генерации цунами рассчитаны мареограммы на взморье Балаклавской бухты (рис. 3) в точке с глубиной 65 м, расположенной на границе расчетной области. Их сопоставление показывает, что для ближних очагов цунами (1 и 2 на рис. 1) максимальные отклонения уровня моря на подходе к бухте составляют $\pm 0,3$ м, для дальнего очага цунами (3 на рис. 1) $\pm 0,05$ м.

Далее для трех случаев проведены расчеты цунами в Балаклавской бухте на сетке высокого разрешения (рис. 2). На рис. 4 показаны колебания уровня моря на входе в Балаклавскую бухту и в ее вершине. Как видно, на входе в бухту амплитуды волн возрастают в 1,5–2 раза по сравнению с амплитудами на южной границе области. При достижении цунами вершины бухты амплитуды колебаний увеличиваются еще примерно в два раза (до 1,4–1,5 м для очагов 1 и 2 и до 0,33 м для очага 3) по сравнению с амплитудами на входе в бухту. Таким образом, внутри бухты высоты цунами увеличиваются в 5–6 раз по сравнению с высотами на южной границе области. Для очагов 1 и 2 максимальные колебания уровня в бухте происходят в начальные 60 мин распространения цунами.

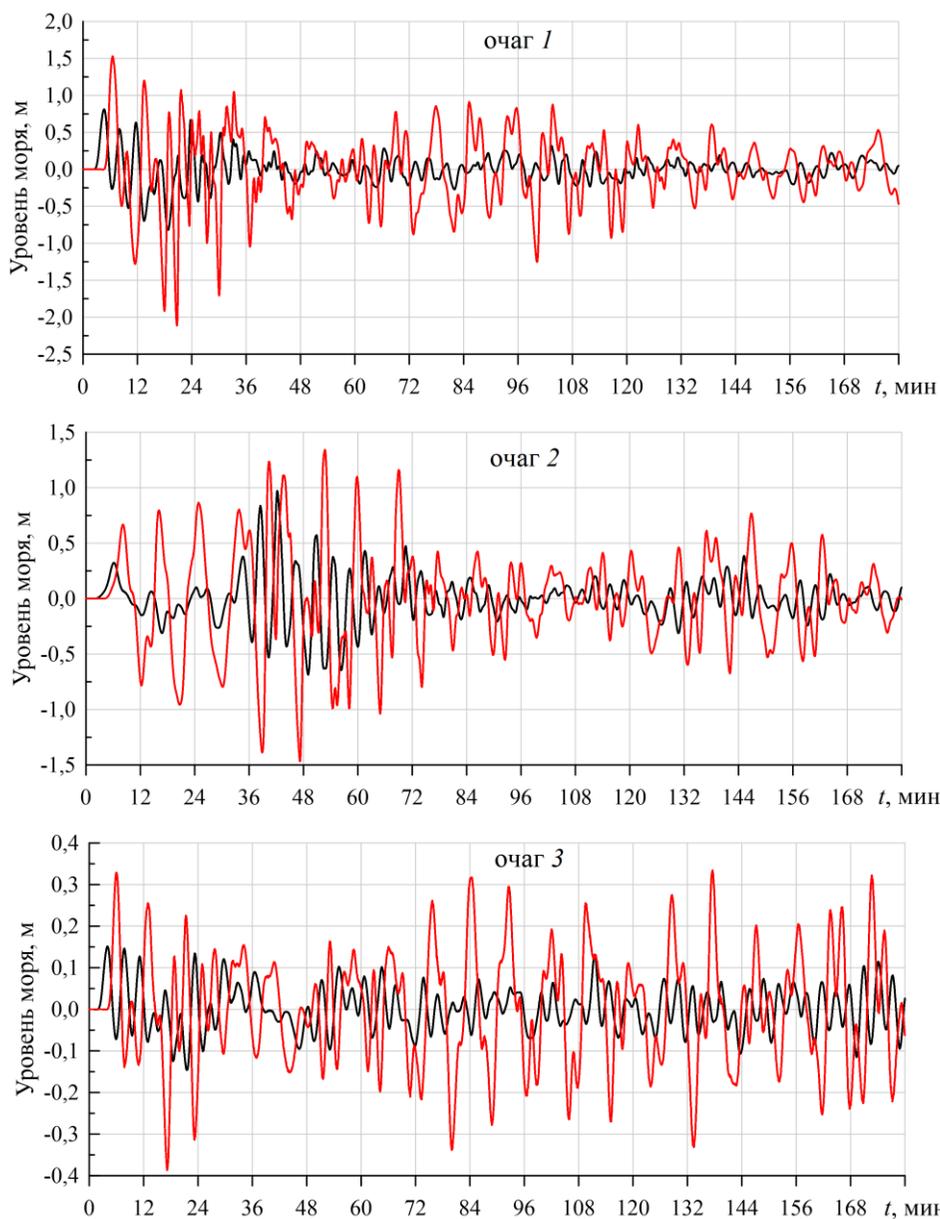
Мареограммы на рис. 4 имеют хорошо выраженный колебательный характер. Это дает основание предположить, что цунами возбуждают в Балаклавской бухте сейшевые колебания. Проведенный анализ графиков позволил построить энергетические спектры колебаний уровня моря для вершины Балаклавской бухты (рис. 5). Видно, что все спектры имеют хорошо выраженный пик в интервале периодов 8–9 мин.



Р и с. 3. Колебания уровня моря на взморье Балаклавской бухты, вызванные очагами цунами 1–3 ($y = 0$)

Fig. 3. Sea level fluctuations at the coast of the Balaklava Bay caused by tsunami foci 1–3 ($y = 0$)

В работе [21] на основе анализа энергетических зависимостей были получены следующие периоды первых четырех мод сейшевых колебаний: $T_0 = 8,2$ мин, $T_1 = 2,5$ мин, $T_2 = 1,9$ мин, $T_3 = 1,3$ мин. Таким образом, во всех трех случаях при проникновении волн цунами в Балаклавскую бухту в ней генерируется низшая мода сейшевых колебаний T_0 (так называемая мода Гельмгольца). Также стоит отметить, что на интервале периодов 2–4 мин имеются незначительные флуктуации энергии, вызванные возбуждением более высоких мод собственных колебаний.

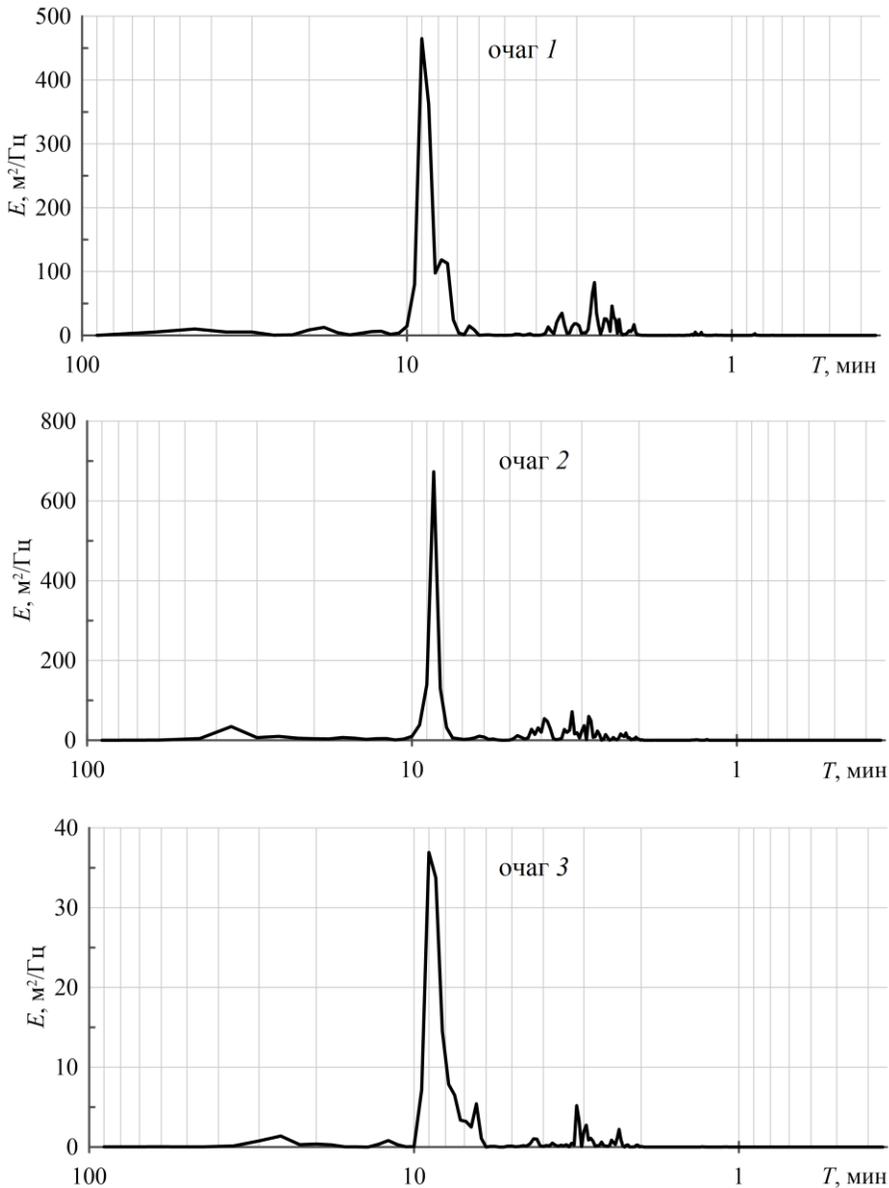


Р и с. 4. Колебания уровня моря в Балаклавской бухте, вызванные очагами цунами 1–3, на входе в бухту (черная кривая) и в ее вершине (красная кривая)

Fig. 4. Sea level fluctuations in the Balaklava Bay caused by tsunami foci 1–3, at the entrance to the bay (black curve) and at its top (red curve)

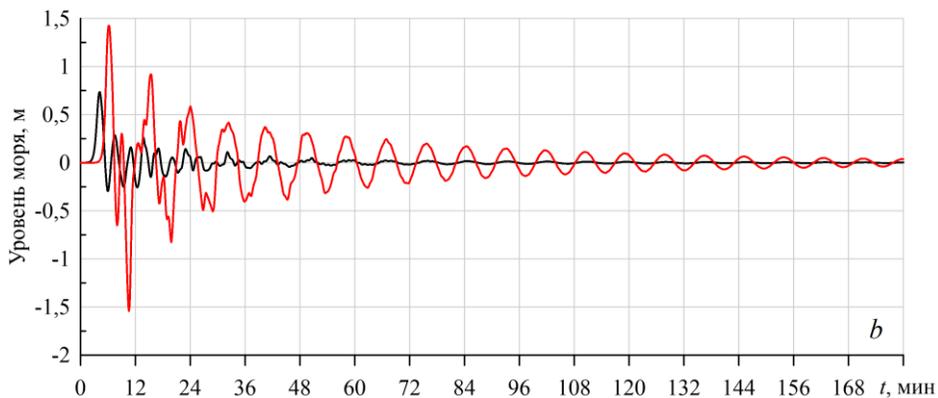
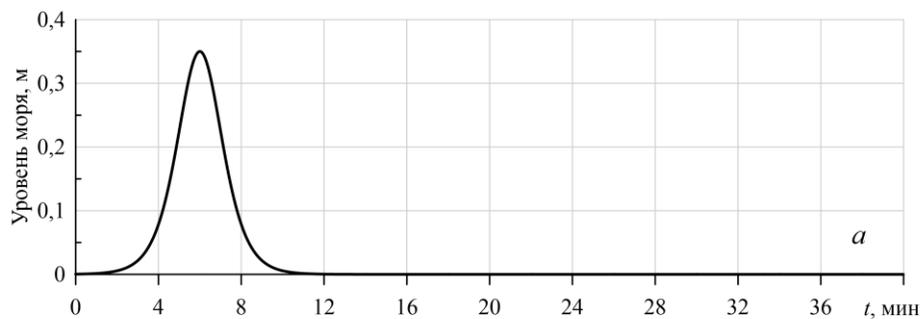
Еще одним этапом работы стало математическое моделирование колебаний уровня в Балаклавской бухте при кратковременном внешнем воздействии. На рис. 6, *a* представлены колебания уровня моря на южной границе расчетной области ($y = 0$) при прохождении солитона в сторону Балаклавской бухты. Вызванные солитоном колебания уровня на входе в бухту (в точке 1)

и в ее вершине (в точке 2) приведены на рис. 6, *b*. Как видно, имеет место периодический режим колебаний с затуханием. На рис. 7 показан соответствующий рис. 6, *a* энергетический спектр колебаний уровня моря в вершине бухты. В спектре прослеживается один пик на периоде 8,5 мин, что очень точно совпадает с периодом низшей сейшевой моды Гельмгольца T_0 .



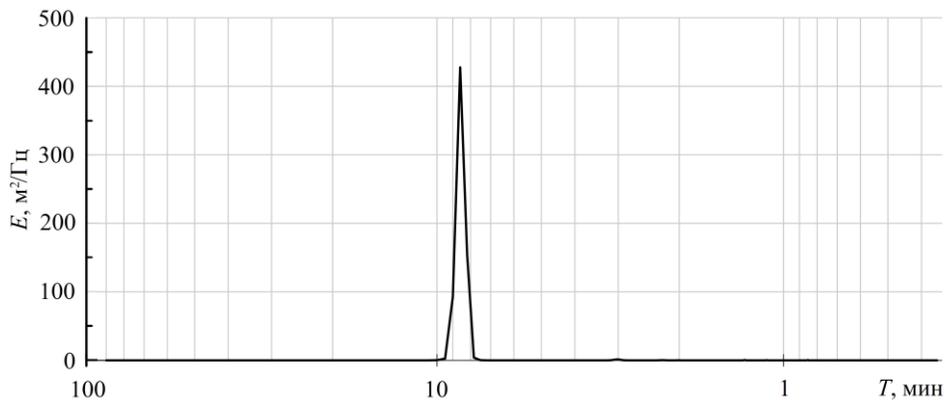
Р и с. 5. Энергетические спектры колебаний уровня моря в вершине Балаклавской бухты для очагов цунами 1–3 (T – период колебаний в логарифмической шкале)

Fig. 5. Energy spectra of sea level fluctuations at the top of the Balaklava Bay for the tsunami foci 1–3 (T is the oscillation period at a logarithmic scale)



Р и с. 6. Колебания уровня на взморье Балаклавской бухты ($y = 0$) (a) и в Балаклавской бухте (b, вход в бухту – черная кривая, ее вершина – красная кривая) при волне цунами, вызванной прохождением солитона (формула (4))

F i g. 6. Sea level fluctuations near the Balaklava Bay ($y = 0$) (a) and in the Balaklava Bay (b, the entrance to the bay – black curve, its top – red curve) for a tsunami wave caused by the propagation of a soliton (formula (4))



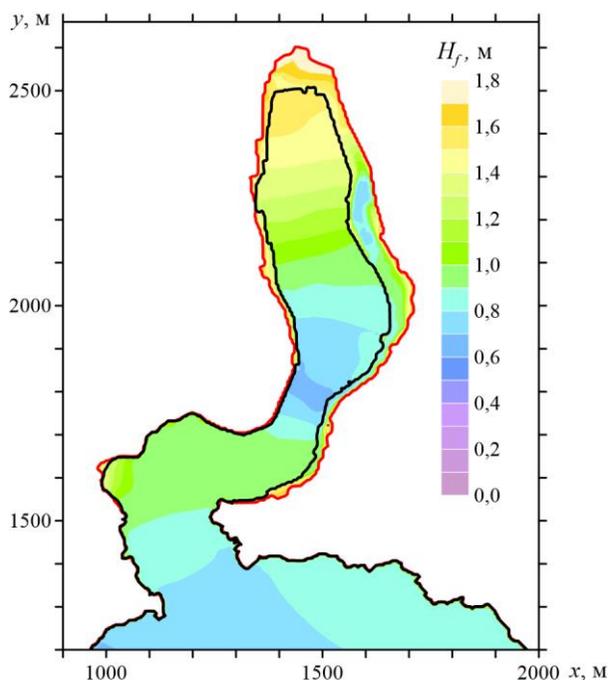
Р и с. 7. Энергетический спектр колебаний уровня моря в вершине Балаклавской бухты для солитона (формула (4))

F i g. 7. Energy spectrum of the sea level fluctuations at the Balaklava Bay top for a soliton (formula (4))

Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что при проникновении волн цунами в Балаклавскую бухту в ней будут возбуждаться колебания уровня моря с периодом ~ 8 мин. Эти колебания максимальны в вершине бухты, где подъемы уровня могут достигать 1,4–1,5 м.

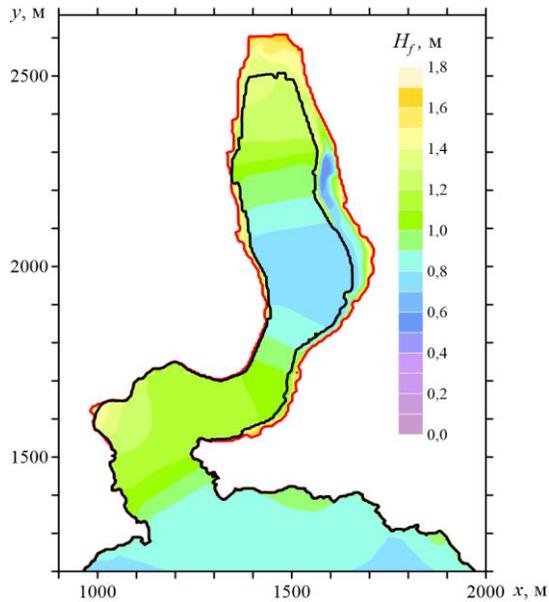
Анализ результатов моделирования цунами в исследуемом районе позволил провести цунамирайонирование береговой полосы Балаклавской бухты и прилегающего морского побережья. Проведенные расчеты показывают, что при проникновении в бухту длинная волна частично отражается от твердых границ ее южной части и частично проходит через коленообразную узость в центральную и северную части бухты. Здесь происходит концентрация волновой энергии и формируются сейшеобразные колебания уровня воды, приводящие к затоплению пологих участков береговой полосы бухты.

На рис. 8–10 для каждого из трех очагов цунами даны картосхемы возможных границ зоны затопления и глубины потока на прилегающем морском побережье и в береговой полосе Балаклавской бухты. Максимально возможные для всех очагов цунами граница зоны затопления и глубина потока показаны на рис. 11. Максимально возможная граница зоны затопления (граница максимального вертикального заплеска) определялась по значению $H_f = 0,05$ м.



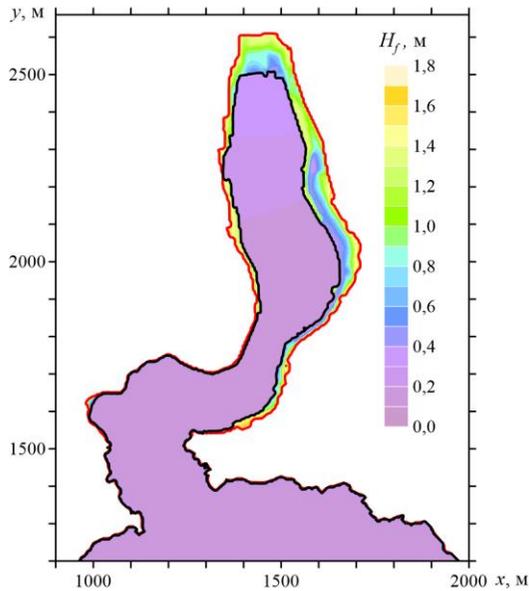
Р и с. 8. Максимально возможные для очага цунами *I* подъем уровня моря и глубина потока (м) на береговой полосе Балаклавской бухты (изобата 0 м – черная кривая, максимальная протяженность горизонтального заплеска – красная кривая)

Fig. 8. Maximum possible sea level rise and flow depth (m) for the tsunami focus *I* at the Balaklava Bay coastline (0 m isobath – black curve, maximum spread of a horizontal flooding – red curve)



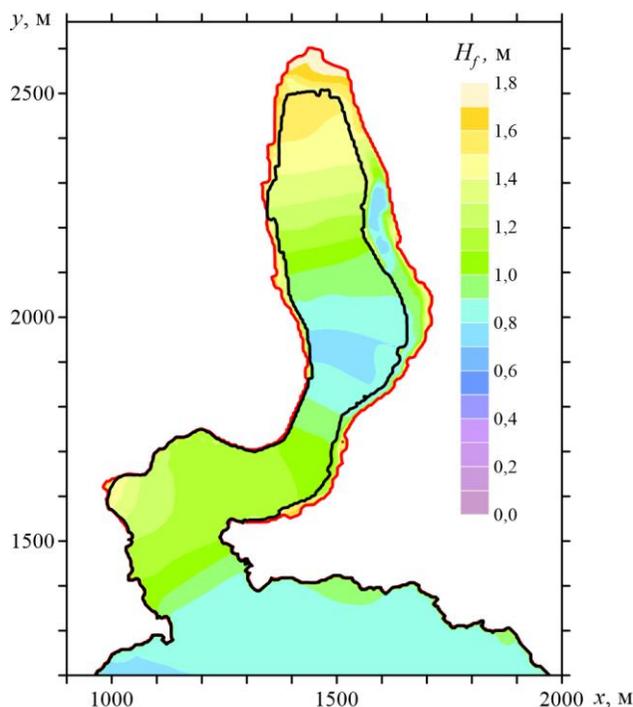
Р и с. 9. Максимально возможные для очага цунами 2 подъем уровня моря и глубина потока (м) на береговой полосе Балаклавской бухты (изобата 0 м – черная кривая, максимальная протяженность горизонтального заплеска – красная кривая)

Fig. 9. Maximum possible sea level rise and flow depth (m) for the tsunami focus 2 at the Balaklava Bay coastline (0 m isobath – black curve, maximum spread of a horizontal flooding – red curve)



Р и с. 10. Максимально возможные для очага цунами 3 подъем уровня моря и глубина потока (м) на береговой полосе Балаклавской бухты (изобата 0 м – черная кривая, максимальная протяженность горизонтального заплеска – красная кривая)

Fig. 10. Maximum possible sea level rise and flow depth (m) for the tsunami focus 3 at the Balaklava Bay coastline (0 m isobath – black curve, maximum spread of a horizontal flooding – red curve)



Р и с. 11. Максимально возможные для всех трех очагов цунами подъем уровня моря и глубина потока (м) на береговой полосе Балаклавской бухты (изобата 0 м – черная кривая, максимальная протяженность горизонтального заплеска – красная кривая)

Fig. 11. Maximum possible sea level rises and flow depths (m) for all three tsunami foci at the Balaklava Bay coastline (0 m isobath – black curve, maximum spread of a horizontal flooding – red curve)

Анализ карт показывает, что наибольшему затоплению подвержены зоны, примыкающие к вершине бухты и к восточному берегу. Это обусловлено тем, что указанные участки береговой полосы являются относительно пологими и низменными по сравнению с другими участками, имеющими более высокие берега и крутые откосы. Согласно результатам моделирования, глубина потока на суше составляет 1,0–1,5 м, глубина потока в вершине бухты 1,8 м. Максимальная протяженность горизонтального заплеска для восточного берега достигает 60 м, для участков суши у вершины 90 м.

Заключение. Представлены результаты численного моделирования проникновения волн цунами в Балаклавскую бухту. На первом этапе с помощью нелинейной модели длинных волн для всего Черного моря исследовалась эволюция волн цунами из трех сейсмических очагов. Получены мареограммы на входе в Балаклавскую бухту. На втором этапе эти зависимости от времени колебания уровня моря использовались в качестве краевых условий на жидкой границе расчетной области, для которой с помощью модели *SWASH* выполнялось численное моделирование распространения волн цунами в бухте.

Выявлено, что в результате распространения волн в бухте формируются сейшевые колебания уровня моря с периодом ~ 8 мин, соответствующие моде Гельмгольца. Математическое моделирование колебаний уровня в Балаклавской бухте при кратковременном внешнем воздействии показало, что в энергетическом спектре колебаний в вершине бухты прослеживается один пик на периоде 8,5 мин, что очень точно совпадает с периодом низшей сейшевой моды Гельмгольца.

Внутри бухты высоты цунами увеличиваются в 5–6 раз по сравнению с высотами на южной границе области. Колебания уровня моря максимальны в вершине бухты, где подъем достигает 1,4–1,5 м. Наибольшему затоплению Балаклавской бухты подвержены зоны, примыкающие к ее вершине и к восточному берегу. Глубина потока на суше достигает 1,0–1,5 м, в вершине бухты 1,8 м. Максимальная протяженность горизонтального заплеска для восточного берега составляет 60 м, в вершине бухты 90 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. 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. Вып. 26, том 2. С. 287–300.
3. Доценко С. Ф., Иванов В. А. Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. Севастополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 174 с.
4. 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. URL: <http://мгфж.рф/index.php/repository?id=186> (дата обращения: 29.06.2022).
5. 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://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2011/03/044-050.pdf> (дата обращения: 29.06.2022).
6. Анализ спектральных характеристик черноморских цунами / Р. Х. Мазова [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2013. № 2(99). С. 52–66. URL: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2013/02/052-066.pdf> (дата обращения: 29.06.2022).
7. Zaitsev A. I., Pelinovsky E. N. Forecasting of tsunami wave heights at the Russian coast of the Black Sea // Oceanology. 2011. Vol. 51. P. 907–915. <https://doi.org/10.1134/S0001437011050225>
8. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalciner [et al.] // Journal of Geophysical Research. Oceans. 2004. Vol. 109, iss. C12. C12023. doi:10.1029/2003JC002113
9. Григораш З. К. Черноморские цунами 1927 года по мареографическим записям // Труды Морского гидрофизического института АН СССР. 1959. Т. XVII. С. 59–67.
10. Никонов А. А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика Земли. 1997. № 1. С. 86–96. URL: http://neotec.ginras.ru/comrus/_nikonov-a-a-1997-cunami-na-beregah-chernogo-i-azovskogo-morey.pdf (дата обращения: 30.06.2022).

11. *Вознесенский А. В.* Землетрясения 1927 г. в Крыму // Природа. 1927. № 12. С. 957–974. URL: <https://priroda.ras.ru/djvu/1927-12.djvu> (дата обращения: 30.06.2022).
12. *Двойченко П. А.* Черноморские землетрясения 1927 года в Крыму // Природа. 1928. № 6. С. 524–542. URL: http://neotec.ginras.ru/comrus/_dvoychenko-p-ya-1928-chernomorskie-zemletryaseniya-1927-goda-v-nrymu.pdf (дата обращения: 30.06.2022).
13. *Didenkulova I.* Tsunami runup in narrow bays: the case of Samoa 2009 tsunami // Natural Hazards. 2013. Vol. 65. P. 1629–1636. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0435-7>
14. *Доценко С. Ф., Базыкина А. Ю., Ингеров А. В.* Особенности распространения волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. Вып. 2. С. 11–19. URL: <http://ecological-safety.ru/repository/issues/2017/02/02/20170202.pdf> (дата обращения: 30.06.2022).
15. *Ковалев П. Д., Ковалев Д. П.* Особенности сейшевых колебаний в заливах и бухтах Дальнего Востока: Приморья, Сахалина, южных Курильских островов // Вестник Тамбовского университета. Серия : Естественные и технические науки. 2013. Т. 18, № 4. С. 1377–1382. URL: <http://journals.tsutmb.ru/go/1810-0198/2013/4/1377-1382/> (дата обращения: 30.06.2022).
16. *Курчатов И. В.* Сейши в Черном и Азовском морях // Собрание научных трудов в 6 т. Москва : Наука, 2005. Т. 1. С 30–39. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/kurchatov_sobranie-trudov_t1_2005/go,30/ (дата обращения: 01.07.2022).
17. Результаты численного моделирования поверхностных и внутренних сейшевых колебаний в Черном море / В. Ф. Баклановская [и др.] // Метеорология и гидрология. 1986. № 6. С. 74–81.
18. *Архипкин В. С., Иванов В. А., Николаенко Е. Г.* Моделирование баротропных сейш в южных морях // Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях. Москва : Наука, 1989. С. 104–117.
19. Сейши в Севастопольской бухте / Ю. Н. Горячкин [и др.] // Труды Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. 2002. Вып. 250. С. 342–353. URL: https://uhmi.org.ua/pub/np/250/29_Repetin.pdf (дата обращения: 01.07.2022).
20. *Ковалев Д. П., Ковалев П. Д., Хузеева М. О.* Сейши, вызываемые атмосферными возмущениями в диапазоне периодов метеоцунами, у побережья южной половины острова Сахалин // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 437–450. doi:10.22449/0233-7584-2020-4-437-450
21. *Фомин В. В., Лазоренко Д. И., Иванча Е. В.* Численное моделирование сейш в Балаклавской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. Вып. 3. С. 32–39. URL: <http://ecological-safety.ru/repository/issues/2017/03/04/20170304.pdf> (дата обращения: 01.07.2022).
22. *Базыкина А. Ю., Михайличенко С. Ю., Фомин В. В.* Численное моделирование цунами в Черном море, вызванное землетрясением 12 сентября 1927 г. // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 4. С. 318–328. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-318-328
23. Опыт картирования очагов землетрясений / В. И. Уломов [и др.] // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Москва : Институт физики Земли РАН. 1993. Вып. 1. С. 99–108.
24. *Куркин А. А.* Нелинейная и нестационарная динамика длинных волн в прибрежной зоне. Н. Новгород : НГТУ, 2005. 329 с.
25. *Winde H. P.* Wave height from pressure measurements. Delft University of Technology, 2012. 49 p. URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ae3b07efd-1ce9-4fd1-b051-c794c72959ca> (date of access: 01.07.2022).

Об авторах:

Фомин Владимир Владимирович, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 6992-2688, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460, ResearcherID: H-8185-2015**, v.fomin@mhi-ras.ru

Белоконь Александра Юрьевна, младший научный сотрудник, отдел вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 5633-9877, ORCID ID: 0000-0002-1299-0983, ResearcherID: M-6839-2018**, aleksa.44.33@gmail.com

Харитоновна Людмила Викторовна, старший научный сотрудник, отдел вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 7274-6248, ORCID ID: 0000-0003-0705-0812, ResearcherID: Y-1780-2018**, l.kharitonova@mhi-ras.ru

Алексеев Дмитрий Владимирович, ученый секретарь, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 767-834, ORCID ID: 0000-0003-4006-0967, ResearcherID: I-3548-2017, Scopus Author ID: 8284177400**, dalexeev@rambler.ru