

Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт

Ю. В. Манилюк*, Д. И. Лазоренко, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: uvmsev@yandex.ru*

Поступила в редакцию 04.09.2019 г., после доработки – 24.01.2020 г.

Цель. Изучение структуры сейшевых колебаний в системе смежных бухт реальной конфигурации.

Методы и результаты. На основе численной конечноэлементной модели ADCIRC исследован отклик Севастопольской и Карантинной бухт Черного моря на возмущения уровня на удаленной открытой границе, содержащие набор случайных гармоник в интервале собственных периодов этих бухт. Численные эксперименты проведены для трех интервалов периодов возмущений, полученных на основе аналитических оценок: 30–52 мин, 8–30 мин, 1–15 мин. Для обеих бухт выделены энергонесущие периоды сейшевых колебаний, и исследовано взаимное влияние бухт друг на друга.

Выводы. Воздействие указанных возмущений приводит к генерации в бухтах мод сейшевых колебаний. Для Севастопольской бухты их периоды составляют 48; 22; 16; 10; 6 мин, для Карантинной бухты – 11,4; 4,8 мин. Количество генерируемых мод определяется интервалом периодов возмущений. Бухты оказывают взаимное влияние друг на друга за счет обмена энергией колебаний через свои входы. Это влияние выражается в проникновении колебаний каждой из бухт в соседнюю бухту. При этом интенсивность собственных мод Севастопольской бухты, проникающих в Карантинную бухту, может превосходить интенсивность собственных мод Карантинной бухты. Сейши с наибольшими амплитудами в обеих бухтах вызываются возмущениями, периоды которых лежат в интервале 30–52 мин.

Ключевые слова: Севастопольская бухта, Карантинная бухта, сейши, резонансные колебания, численное моделирование, модель ADCIRC.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Морского гидрофизического института РАН по теме № 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» при частичной поддержке гранта РФФИ №18-05-80035.

Для цитирования: Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 261–276. doi:10.22449/0233-7584-2020-3-261-276

Investigation of Seiche Oscillations in the Adjacent Bays by the Example of the Sevastopol and the Quarantine Bays

Yu. V. Manilyuk*, D. I. Lazorenko, V. V. Fomin

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

*e-mail: uvmsev@yandex.ru

Purpose. The paper is aimed at studying the seiche structure in the adjacent bays' system of real configuration.

Methods and Results. The ADCIRC numerical model was used for simulating and studying response of the Sevastopol and the Quarantine bays (the Black Sea) to the sea level fluctuations formed by a number of random oscillation harmonics within the range of the eigen periods in the bays. The numerical experiments were performed for three ranges obtained from the analytical estimates: 30–52, 8–30 and 1–15 min. The energy-bearing periods of seiche oscillations were revealed for both bays and their mutual influence was studied.

Conclusions. The above mentioned wave disturbances lead to generation of the seiches oscillations in the bays. For the Sevastopol Bay, their periods are 48, 22, 16, 10 and 6 min, for the Quarantine Bay – 11.4 and 4.8 min. The number of the generated modes is determined by the interval of the wave disturbance periods. The bays have a mutual influence on each other due to the wave energy exchange through their entrances. At that intensity of the eigenmodes of the Sevastopol Bay penetrating the Quarantine Bay can exceed intensity of those of the Quarantine Bay. In both bays, the seiches with the largest amplitudes are induced by the disturbances, the periods of which are in the interval 30–52 min.

Keywords: Sevastopol Bay, Quarantine Bay, seiches, resonant oscillations, numerical modeling, ADCIRC numerical model.

Acknowledgments: the investigation was carried out within the framework of the state task of Marine Hydrophysical Institute, RAS on theme No. 0827-2018-0004 “Complex interdisciplinary investigations of the oceanologic processes conditioning functioning and evolution of the Black and Azov seas' coastal zones” at partial RFBR support (project No. 18-05-80035).

For citation: Manilyuk, Yu.V, Lazorenko, D.I. and Fomin V.V., 2020. Investigation of Seiche Oscillations in the Adjacent Bays by the Example of the Sevastopol and the Quarantine Bays. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(3), pp. 242-256. doi:10.22449/1573-160X-2020-3-242-256

Введение

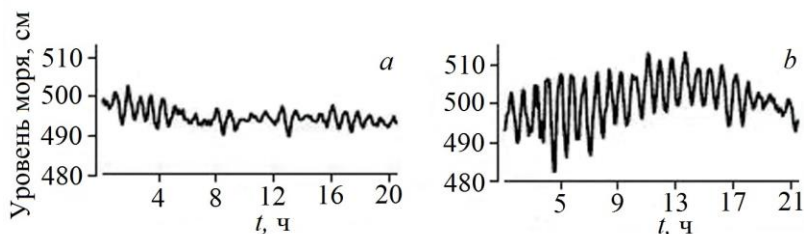
В береговой зоне Севастополя расположена система бухт разнообразной конфигурации, размеров и батиметрии. Севастопольская бухта (длина 7 км, средняя ширина 1 км, средняя глубина 11,7 м) является самой большой. Западнее находится смежная с ней Карантинная бухта (длина 1,6 км, средняя ширина 0,2 км, средняя глубина 8,2 м) (рис. 1).



Рис. 1. Система севастопольских бухт и схема расположения точек, в которых анализировались колебания уровня моря

Fig. 1. System of the Sevastopol bays and location of the points, at which the sea level fluctuations were analyzed

Несмотря на значительный потенциал использования бухт для Севастополя, они изучены еще недостаточно. Океанологические исследования проводились главным образом в Севастопольской бухте [1]. Колебания уровня моря фиксировались с помощью мареографа на морской гидрометеорологической станции «Севастополь». Примеры типичных мареограмм показаны на рис. 2 [2]. Характеристики течений в Севастопольской бухте измерялись с помощью ADCP-зонда во время проведения экспедиций Морским гидрофизическим институтом [3], при этом было установлено, что у входа в бухту флуктуации течений происходят с периодом около 60 мин. В работе [4] выполнен численный расчет собственных мод Севастопольской бухты. На основе математического моделирования течения в этой бухте исследованы в [5], динамика распространения загрязняющей примеси – в [6]. Данные наблюдений гидрофизических параметров по Карантинной бухте отсутствуют.



Р и с. 2. Наблюдаемые мареограммы для Севастопольской бухты [2, с. 249]: *a* – «фоновые» сейши, *b* – интенсивные сейши

F i g. 2. Observed mareograms for the Sevastopol Bay [2, p. 249]: *a*) – “background” seiches, *b*) – intensive seiches

Сейши в бухтах генерируются либо прямым воздействием атмосферных возмущений на поверхность бухты, либо возмущениями, приходящими в бухту через открытые границы. Возмущения, приходящие из открытого моря, имеют разные временные масштабы. В бухтах и заливах Черного моря наблюдаются сейши с периодами от нескольких минут до 1–2 ч с размахами колебаний до 40–50 см [7]. Сейши малых периодов (2–3 мин) чаще регистрируются при штормовом состоянии моря [7] и вызываются трансформацией штормовых волн в прибрежной зоне. Так, в [8] указывается, что в результате нелинейного взаимодействия штормовых волн с периодами 8–10 с возникают инфрагравитационные волны с периодами до трех минут. Сейши более длинных периодов 15–20 мин вызываются резкими колебаниями атмосферного давления [7]. Наиболее часто сейши этого типа генерируются при прохождении циклонов, особенно их периферий, обуславливающих усиление ветра [7]. При совпадении периодов возмущающих колебаний с собственными периодами бухты возможен резонанс, усиливающий колебания в бухте. В бухтах одним из опасных явлений, связанных с сейшевыми колебаниями, является тягун [8]. Отметим работы [9, 10], в которых изучаются условия возникновения тягуна в ряде севастопольских бухт.

Важное практическое значение имеет исследование взаимного влияния друг на друга смежных бухт. Так, в работе [11] рассмотрено взаимодействие двух модельных бухт, имеющих характерные размеры Севастопольской

и Карантинной. В [12] изучается взаимодействие смежных большой и меньшей по размерам бухт на примере бухт Цитаделя (*Ciudadella*) и Платья Гран (*Platja Gran*) на о. Менорка (Балеарские о-ва). Несомненный интерес представляют результаты исследований взаимного влияния двух бухт, полученные в работе [13] на основе лабораторных экспериментов с помощью гидравлической модели. Отметим перспективные экспериментальные исследования сейшевых колебаний в бухтах и заливах Дальнего Востока, которые проводились Тихоокеанским океанографическим институтом и Институтом морской гидрофизики и геологии ДВО РАН с помощью лазерных интерферометров и лазерных гидрофонов [14–16]. В указанных работах установлены собственные периоды большого количества дальневосточных бухт.

Целью настоящей работы является изучение резонансного отклика Севастопольской и Карантинной бухт на возмущения, приходящие из открытого моря, и взаимного влияния этих бухт друг на друга.

Численная модель и алгоритм оценки периодов сейшевых колебаний

Для исследования сейшевых колебаний в Севастопольской и Карантинной бухтах в настоящей работе применялась численная гидродинамическая модель *Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries (ADCIRC)*, ее подробное описание дано в работах [17–20]. Ниже используется вариант модели, основанный на осредненных по глубине линеаризованных уравнениях движения без учета силы Кориолиса:

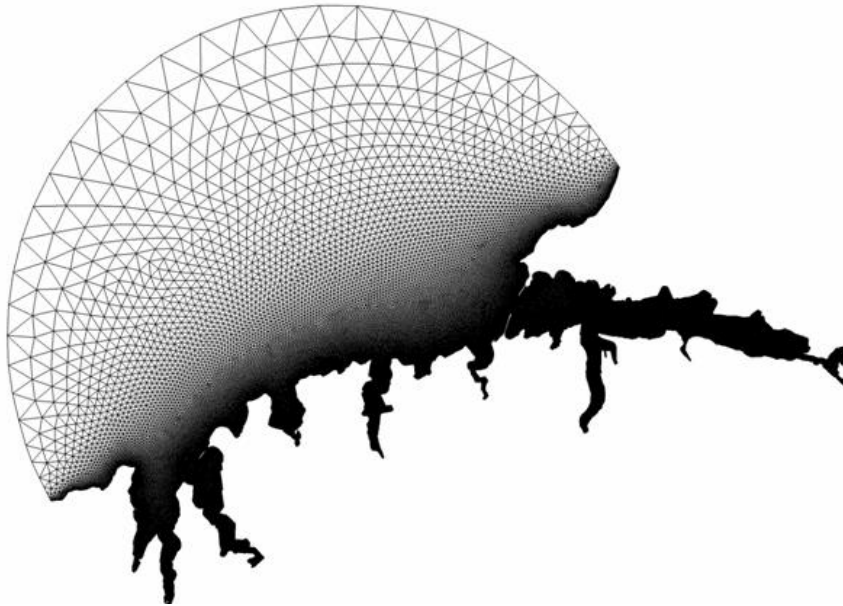
$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = A_h \frac{\Delta q_x}{H}, \quad \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = A_h \frac{\Delta q_y}{H}, \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

Здесь U , V – средние по глубине компоненты вектора скорости движения по осям x и y соответственно; t – время; η – уровень воды в бассейне; $H = h + \eta$ – динамическая глубина; Δ – оператор Лапласа по пространственным переменным; A_h – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости; $q_x = UH$, $q_y = VH$ – компоненты вектора полных потоков.

На твердых боковых стенках расчетной области использовалось граничное условие непротекания. Для того чтобы исключить влияние нелинейности трения на дне, задавалось граничное условие скольжения.

Численный алгоритм модели *ADCIRC* основан на методе конечных элементов, использующем треугольные элементы с линейными базисными функциями. Для снижения уровня вычислительного шума при численном интегрировании системы (1) уравнение неразрывности представляется в виде уравнения *Generalized Wave Continuity Equation (GWCE)* [17]. Уровень вычислительного шума в *GWCE* регулируется некоторым параметром τ_0 .

Моделирование сейшевых колебаний в системе севастопольских бухт проводилось на неструктурированной расчетной сетке из 56 354 узлов (107 202 конечных элемента), показанной на рис. 3. Для устойчивости численного алгоритма шаг интегрирования по времени $\Delta t = 0,025$ с, коэффициент турбулентной вязкости $A_h = 3$ м²/с; $\tau_0 = 0,005$. Значения всех вышеуказанных коэффициентов выбирались на основе рекомендаций, изложенных в [17, 18].



Р и с. 3. Неструктурированная расчетная сетка для моделирования сейшевых колебаний в системе севастопольских бухт

Fig. 3. Unstructured computational grid for modeling seiche oscillations in the system of the Sevastopol bays

В качестве начального приближения для оценки периодов собственных колебаний исследуемых бухт T_{km} использовалась формула из [21]:

$$T_{km} = \frac{4}{\sqrt{gh}} \frac{ab}{\sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}}, \quad (2)$$

где a , b , h – средняя длина, ширина и глубина бухты; $k = 0, 1, 2, \dots$; $m = 0, 1, 2, \dots$. Расчеты по формуле (2) дают для Севастопольской бухты следующие оценки значений собственных периодов: 43,8; 14,6; 8,8; 6,3; 2,8 мин, для Карантинной бухты – 11,7; 3,9; 2,3; 1,7; 0,7 мин. В работе [4] проведен численный расчет собственных периодов Севастопольской бухты с учетом реального профиля береговой черты и батиметрии, который дал следующие значения: 50; 22; 14,7; 12; 9,5; 7,9; 6,4 мин.

Численное моделирование проводилось для трех интервалов периодов возмущений, перекрывающих диапазон собственных периодов Севастопольской и Карантинной бухт и рассчитанных с использованием формулы (2):

$$\Delta T_1 = 30-52, \quad \Delta T_2 = 8-30, \quad \Delta T_3 = 1-15. \quad (3)$$

Выбор интервалов (в минутах) проводился из следующих соображений: диапазоны $\Delta T_1, \Delta T_2$ содержат высокочастотные моды сейш Черного моря и возмущения, вызванные перемещением циклонов над акваторией моря, волнами цунами; диапазон ΔT_3 – инфрагравитационные волны и возмущения, вызванные колебаниями атмосферного давления.

Расчеты выполнялись в два этапа. На первом этапе использовались нулевые начальные условия. При $t > 0$ на открытой границе расчетной области задавались возмущения вида

$$\eta = \frac{a_0}{N} \sum_{n=1}^N \sin(\omega_n t + \varphi_n), \quad (4)$$

где $a_0 = 10$ см – амплитуда колебаний; N – количество гармоник в ряде; n – номер гармоники; $\omega_n = 2\pi/T_n$ – частота колебаний, T_n – период колебаний; φ_n – начальная фаза колебаний. Период колебаний каждой гармоники ряда (4) определяется выражением $T_n = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min})\delta_n$, где T_{\min} , T_{\max} – минимальный и максимальный период колебаний. Величина δ_n представляла инкремент вида $\delta_n = (n-1)/(N-1)$. Количество гармоник N определяется шагом дискретности по времени между соседними периодами (в расчетах использовался шаг $t_d = 10$ с), а также значениями минимального и максимального периодов возмущений $N = (T_{\max} - T_{\min})/t_d + 1$. Начальная фаза колебаний φ_n определялась по формуле $\varphi_n = \pi(\delta_n - 1/2)$. Как показали предварительные численные эксперименты, начальная фаза не оказывает заметного влияния на результаты расчетов. Расчеты продолжались на протяжении 3 ч модельного времени. На втором этапе граничное условие (4) заменялось условием свободного прохождения. В качестве начальных данных задавались поля U , V , η при $t = 3$ ч. Длительность второго этапа расчетов составляла 4 ч модельного времени.

Результаты численного моделирования

Севастопольская бухта. На рис. 4–6 представлены мареограммы для точек 2, 7, 9, расположенных в акватории Севастопольской бухты (рис. 1). На рис. 7 приведены энергетические спектры колебаний уровня для этих же точек. Как видно из рис. 4–7, колебания уровня, генерируемые в бухте на интервале ΔT_1 , имеют наибольшую энергию и медленнее затухают. В этих колебаниях четко прослеживается период 48 мин, соответствующий моде Гельмгольца Севастопольской бухты. Высокочастотные моды не генерируются.

На интервале ΔT_2 (рис. 5; 7, $d-f$) энергия генерируемых в Севастопольской бухте колебаний на порядок меньше, чем на интервале ΔT_1 . В бухте доминирует мода Гельмгольца (период 48 мин), на которую накладываются быстро затухающие (в течение 1,5 ч (рис. 5)) высокочастотные моды. Среди них наиболее интенсивны собственные моды с периодами 16; 22–24; 6; 10 мин (указаны в порядке убывания энергетического вклада). Кроме указанных мод по всей акватории Севастопольской бухты регистрируется колебание с периодом 11,4 мин, соответствующее моде Гельмгольца Карантинной бухты.

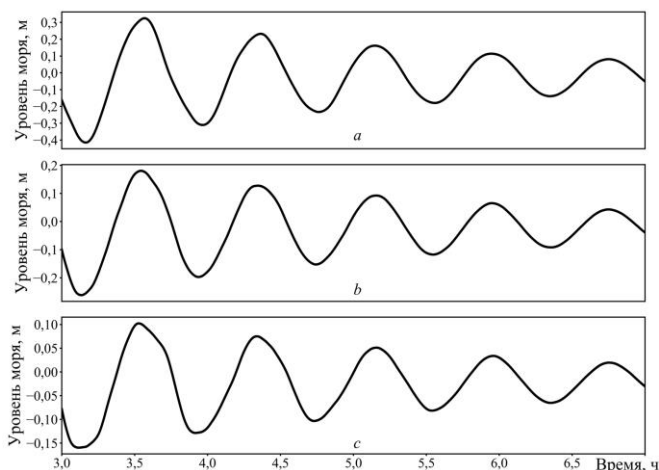


Рис. 4. Мареограммы для ΔT_1 : *a* – в точке 2; *b* – в точке 7; *c* – в точке 9
Fig. 4. Mareograms for ΔT_1 : *a* – at point 2; *b* – at point 7; *c* – at point 9

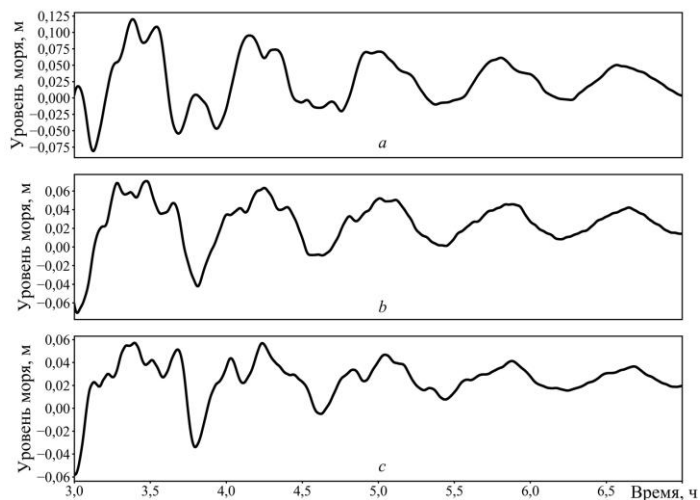
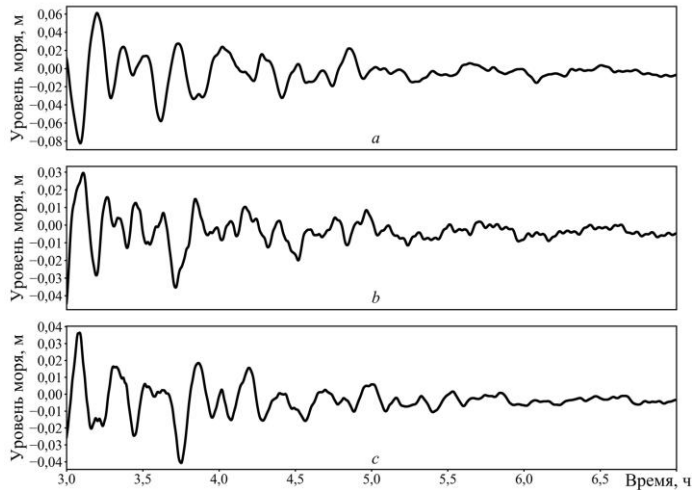
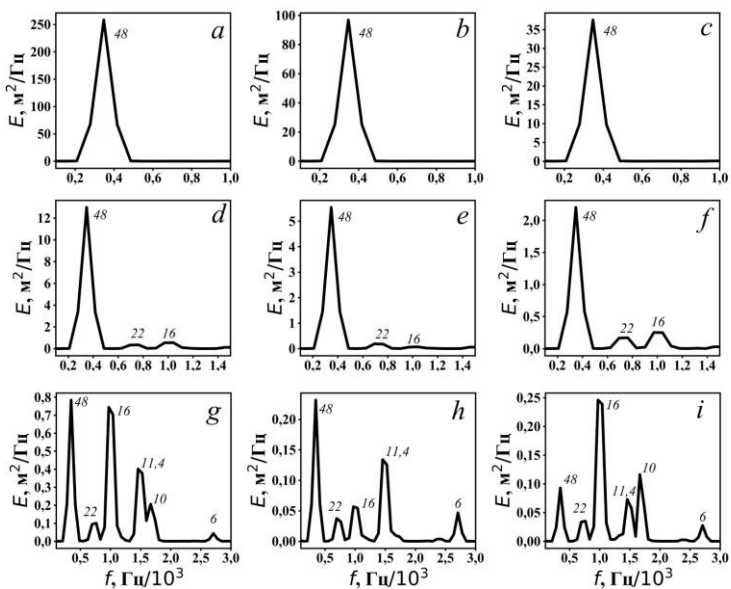


Рис. 5. Мареограммы для ΔT_2 : *a* – в точке 2; *b* – в точке 7; *c* – в точке 9
Fig. 5. Mareograms for ΔT_2 : *a* – at point 2; *b* – at point 7; *c* – at point 9

На интервале ΔT_3 (рис. 6; 7, *g – i*) максимальная энергия генерируемых в Севастопольской бухте колебаний в 5–10 раз меньше, чем на интервале ΔT_2 . Колебания достаточно быстро затухают и имеют характер биений (рис. 6), когда взаимодействуют несколько сопоставимых по уровню энергии мод. Мода с периодом 16 мин преобладает практически на всей акватории бухты. Также выделяются другие моды с периодами 48; 22; 10 и 6 мин (рис. 7, *g – i*), являющиеся собственными модами Севастопольской бухты. Наибольшую энергию из них имеют колебания с периодами 48 и 6 мин. Кроме собственных мод Севастопольской бухты в ней также хорошо прослеживается мода Гельмгольца Карантинной бухты с периодом 11,4 мин. В вершине Севастопольской бухты (точка 2) энергия этой моды составляет 64% от максимума.



Р и с. 6. Мареограммы для ΔT_3 : *a* – в точке 2; *b* – в точке 7; *c* – в точке 9
F i g. 6. Mareograms for ΔT_3 : *a* – at point 2; *b* – at point 7; *c* – at point 9



Р и с. 7. Энергетические спектры колебаний уровня в Севастопольской бухте (показаны периоды (в минутах) для основных пиков). Для интервала ΔT_1 : *a* – в точке 1; *b* – в точке 7; *c* – в точке 9. Для интервала ΔT_2 : *d* – в точке 1; *e* – в точке 7; *f* – в точке 9. Для интервала ΔT_3 : *g* – в точке 1; *h* – в точке 7; *i* – в точке 9
F i g. 7. Energy spectra of level fluctuations in the Sevastopol Bay (the periods (in minutes) are shown for the major peaks). For the interval ΔT_1 : *a* – at point 1; *b* – at point 7; *c* – at point 9. For the interval ΔT_2 : *d* – at point 1; *e* – at point 7; *f* – at point 9. For the interval ΔT_3 : *g* – at point 1; *h* – at point 7; *i* – at point 9

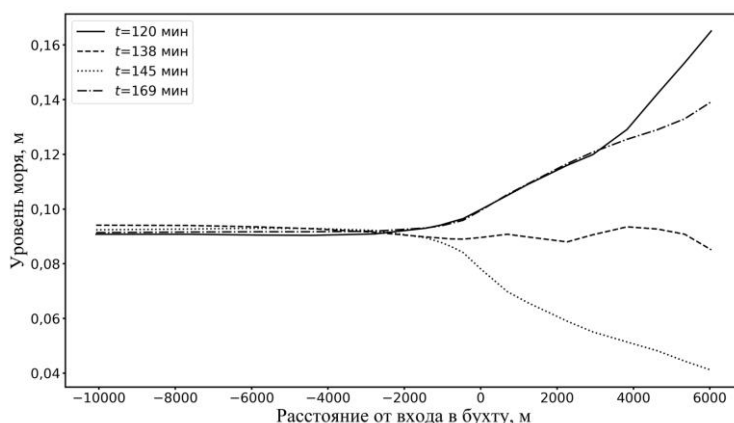
Для объяснения причины, приводящей к генерации моды Гельмгольца в Севастопольской бухте возмущениями, периоды которых лежат в интервале 1–30 мин, были проведены дополнительные численные эксперименты. В ка-

честве возмущений рассматривались колебания жидкой границы на одном из собственных периодов Севастопольской бухты – 48; 22; 16 мин, а также на двух нерезонансных периодах 30 и 60 мин. Каждый численный эксперимент состоял из двух этапов. На первом этапе решалась вынужденная задача с нулевыми начальными условиями. Длительность расчета составляла 3 ч модельного времени. На втором этапе, длительностью 4 ч модельного времени, решалась задача о свободных волнах с начальными условиями, полученными в результате расчетов на первом этапе. На жидкой границе ставилось условие свободного прохождения волн. В результате было установлено, что во всех экспериментах с вынужденными волнами (первый этап) получается аналогичная для всех рассмотренных случаев картина: выделяется доминирующее колебание на частоте вынуждающей силы, а также незначительные локальные максимумы на собственных периодах Севастопольской бухты, значения которых меньше периода возмущения.

Анализ результатов расчетов для вторых этапов численных экспериментов показал, что после прекращения действия возмущения в Севастопольской бухте возникали сейшевые колебания с периодами, близкими к периодам мод собственных колебаний Севастопольской бухты. При этом всегда имела место интенсивная мода Гельмгольца Севастопольской бухты. Это можно объяснить тем, что свободные колебания на нерезонансных периодах быстро затухают, а также общим свойством колебательных систем: они стремятся на все типы возмущений ответить колебаниями на собственных периодах системы, особенно на периоде нулевой моды. Также для вытянутого водоема с открытым зауженным входом характерно, что в нем преобладает мода Гельмгольца. Это, в частности, подтверждают наблюдения за уровнем в Севастопольской бухте.

Сравнительный анализ результатов моделирования показывает, что наибольшие амплитуды колебаний уровня соответствуют интервалу ΔT_1 , а наименьшие – интервалу ΔT_3 . При этом максимальные размахи колебаний уровня отличаются более чем в два раза. Главной особенностью Севастопольской бухты является то, что для всех рассмотренных периодов возмущений в ней генерируется мода Гельмгольца. Она преобладает над остальными модами в интервалах ΔT_1 и ΔT_2 . Это можно объяснить тем, что Севастопольская бухта достаточно узкая и длинная и имеет зауженный вход. Как известно [8], в таких бухтах мода Гельмгольца доминирует над всеми остальными модами и определяет общий характер движений во внутренней акватории. Согласно данным натурных наблюдений [2], в Севастопольской бухте сейши с периодом, соответствующим моде Гельмгольца, наблюдаются практически постоянно.

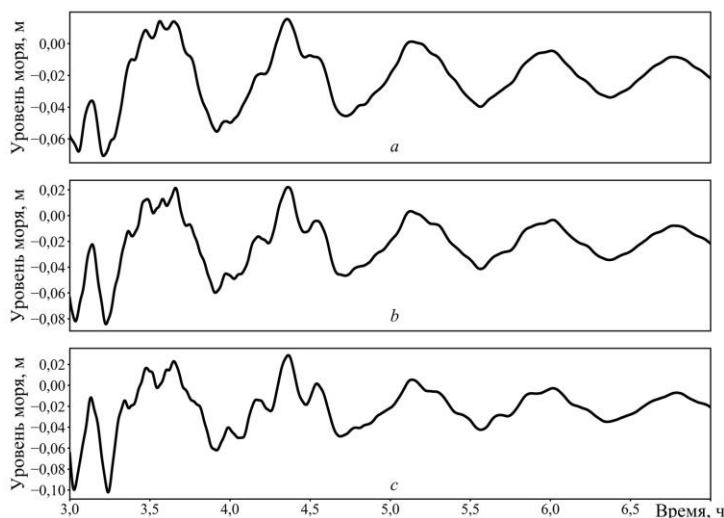
В качестве примера на рис. 8 для интервала ΔT_2 показаны положения уровня моря на разрезе, проходящем через точки 1–10 и 14–21 (рис. 1). Видно, что колебания уровня имеют форму моды Гельмгольца: наиболее интенсивны в вершине бухты, не имеют узловых линий внутри бухты, у входа в бухту изменения уровня незначительные, что указывает на наличие здесь узловой линии данной моды.



Р и с. 8. Колебания уровня для интервала ΔT_2 на разрезе, проходящем вдоль оси Севастопольской бухты, для характерных моментов времени на временном отрезке, равном периоду моды Гельмгольца. Абсцисса со значением 0 м соответствует входу в бухту (точка 10 на рис. 1)

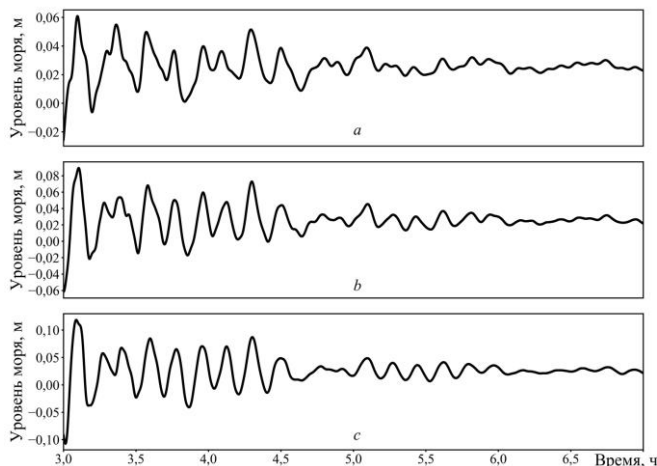
Fig. 8. Level fluctuations for the ΔT_2 interval at the section passing along the Sevastopol Bay axis for the characteristic time points within the time interval equal to the Helmholtz mode period. Abscissa of the 0 m value corresponds to the bay entrance (point 10 in Fig. 1)

Карантинная бухта. Проанализируем отклик Карантинной бухты на возмущения вида (4). На рис. 9–11 приведены мареограммы для точек 11–13 (рис. 1) для интервалов $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$. Анализ этих кривых показывает, что на интервале ΔT_1 колебания носят периодический характер, а на интервалах $\Delta T_2, \Delta T_3$ – характер биений. Наибольшие размахи изменений уровня близки друг к другу на всех рассмотренных интервалах периодов возмущений и составляют в вершине бухты 10–12 см. Сейши долго не затухают: колебания происходят более 6 ч.

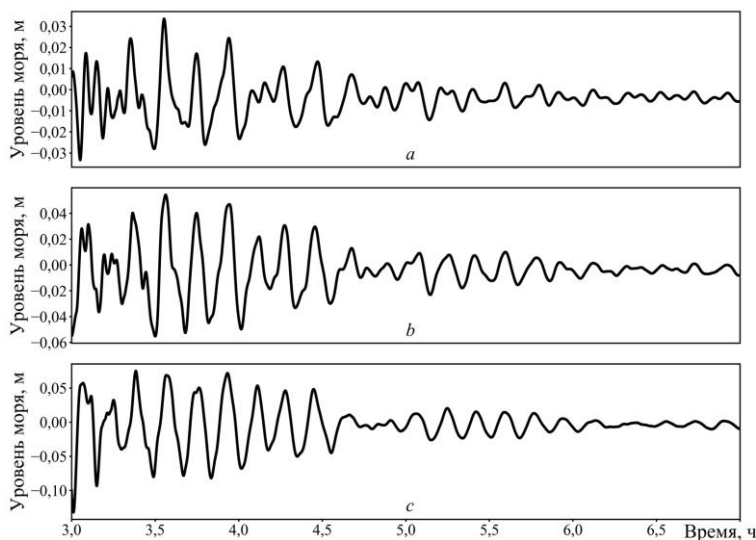


Р и с. 9. Мареограммы для интервала ΔT_1 : *a* – в точке 11; *b* – в точке 12; *c* – в точке 13

Fig. 9. Mareograms for the ΔT_1 interval: *a* – at point 11; *b* – at point 12; *c* – at point 13



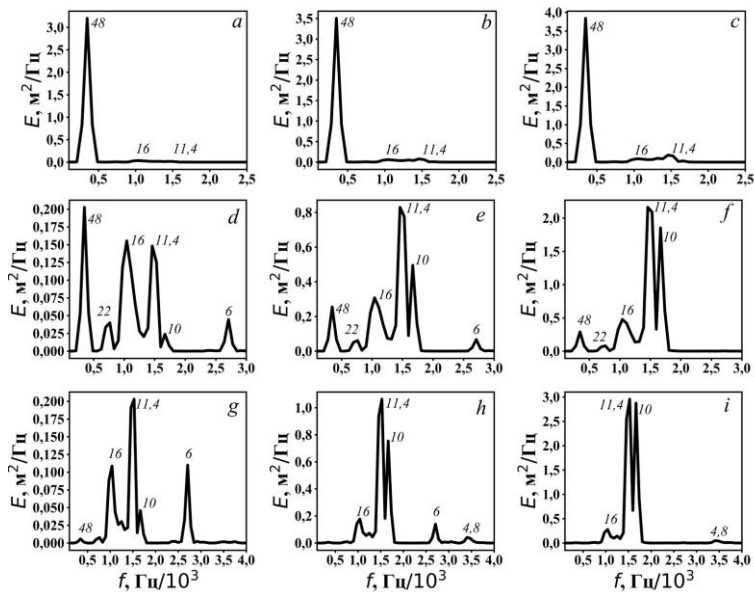
Р и с. 10. Мареограммы для интервала ΔT_2 : *a* – в точке 11; *b* – в точке 12; *c* – в точке 13
F i g. 10. Mareograms for the ΔT_2 interval: *a* – at point 11; *b* – at point 12; *c* – at point 13



Р и с. 11. Мареограммы для интервала ΔT_3 : *a* – в точке 11; *b* – в точке 12; *c* – в точке 13
F i g. 11. Mareograms for the ΔT_3 interval: *a* – at point 11; *b* – at point 12; *c* – at point 13

На рис. 12 показаны энергетические спектры, построенные для точек 11–13 для интервалов $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$. Как видно, на интервале ΔT_1 доминирует колебание, соответствующее моде Гельмгольца Севастопольской бухты. Также выделяются два локальных максимума на периодах 11,4 мин (мода Гельмгольца Карантинной бухты) и 16 мин (собственная мода Севастопольской бухты). Если период возмущений лежит в интервале ΔT_2 , то на всей акватории бухты наиболее выражена мода с периодом 11,4 мин. Данная мода преобладает над всеми остальными модами на всей акватории бухты, за исключением области, примыкающей к входу в бухту, где доминирует мода

Гельмгольца Севастопольской бухты. Кроме указанных мод в Карантинной бухте также выделяются моды с периодами 22; 16; 10; 6 мин (рис. 12, *d – f*), соответствующие собственным модам Севастопольской бухты.



Р и с. 12. Энергетические спектры колебаний уровня в Карантинной бухте (показаны периоды (в минутах) для основных пиков). Для интервала ΔT_1 : *a* – в точке 11; *b* – в точке 12; *c* – в точке 13. Для интервала ΔT_2 : *d* – в точке 11; *e* – в точке 12; *f* – в точке 13. Для интервала ΔT_3 : *g* – в точке 11; *h* – в точке 12; *i* – в точке 13

Ф и г. 12. Energy spectra of level fluctuations in the Quarantine Bay (the periods (in minutes) are shown for the major peaks). The ΔT_1 interval: *a* – at point 11; *b* – at point 12; *c* – at point 13. The ΔT_2 interval: *d* – at point 11; *e* – at point 12; *f* – at point 13. The ΔT_3 interval: *g* – at point 11; *h* – at point 12; *i* – at point 13

Особенностью интервала ΔT_3 является то, что на нем в бухте доминирует мода Гельмгольца Карантинной бухты с периодом 11,4 мин. Также в области, примыкающей к вершине бухты, выделяется пик на периоде 4,8 мин, соответствующем первой собственной моде Карантинной бухты. Кроме указанных мод в Карантинной бухте имеют место колебания с периодами 48; 16; 10; 6 мин, которые являются собственными модами Севастопольской бухты. На интервале ΔT_1 собственные моды Карантинной бухты практически не генерируются и в ней доминирует мода Гельмгольца Севастопольской бухты. На интервалах $\Delta T_2, \Delta T_3$ в Карантинной бухте над всеми модами сейшевых колебаний доминирует мода Гельмгольца этой бухты с периодом 11,4 мин. В Карантинной бухте также выделяется ряд собственных мод Севастопольской бухты с периодами 16; 6 мин, которые наиболее интенсивны у входа в бухту, а также мода с периодом 10 мин, имеющая наибольшую интенсивность в вершине бухты (рис. 12, *i*).

Следует отметить, что эффект проявления в бухтах собственных мод колебаний соседних бухт известен. Например, в бухте Цитаделья наблюдается

достаточно интенсивная мода Гельмгольца соседней бухты Платья Гран с периодом 5,5 мин, а в бухте Платья Гран выделяется мода Гельмгольца бухты Цитаделья с периодом 10,5 мин [12, 22]. Аналогичная картина имеет место в заливе Пасьета в Японском море. В этом заливе находятся две смежные бухты – Витязь (длина с учетом о-вов Таранцева и м. Шульца составляет около 3,2 км, средняя глубина 15 м) и Троицы (длина 6,15 км, средняя глубина 12 м). Форма этих бухт близка к прямоугольной. Расчет собственных периодов по формуле (2) дает следующие значения. Бухта Витязь: 17,7 мин (мода Гельмгольца); 5,9; 3,5; 2,5 мин. Бухта Троицы: 37,8 мин (мода Гельмгольца); 12,6; 7,6; 5,4 мин. Бухта Витязь исследована более детально [14, 15]. В результате обработки данных наблюдений в работах [14, с. 99; 15, с. 59] выделен мощный пик на периоде 17,28 мин, соответствующий аналитической оценке величины периода моды Гельмгольца бухты Витязь. В [15, с. 59] указывается на наличие в бухте Витязь пиков на периодах 17,2–17,5; 7,5–6,25; 3,5; 2,5 мин. Значения периодов 17,5; 3,5; 2,5 мин хорошо согласуются с аналитическими оценками, полученными выше. Период 7,5 мин, скорее всего, принадлежит собственной моде бухты Троицы, смежной с бухтой Витязь. В [14, с. 98] для бухты Витязь приведен участок записи лазерного демографа, содержащий отклик на землетрясение 11 марта 2011 г. восточнее Японии. На этом рисунке третий по величине пик на периоде около 38 мин соответствует моде Гельмгольца бухты Троицы.

Эффект проявления в бухте собственных мод смежной бухты подтверждают и результаты численного моделирования. Так, например, в [12] установлено, что в бухте Цитаделья проявляется достаточно интенсивно мода Гельмгольца соседней бухты Платья Гран с периодом 5,5 мин. В работе [11] показано, что в модельном бассейне, аппроксимирующем Карантинную бухту, проявляются собственные моды Севастопольской бухты.

В работе [13] на основе лабораторных экспериментов установлено, что в системе двух близко расположенных одинаковых бухт прямоугольной формы возможны следующие виды колебаний: синфазные, противофазные, комбинация синфазных и противофазных (в этом случае в бухтах наблюдаются биения). Если колебания носят синфазный характер, то обмен энергией между бухтами не осуществляется и она излучается в открытое море через входы в бухты. Когда колебания имеют противофазный характер, то происходит периодический обмен энергией между бухтами. В результате такие колебания долго не затухают. Периоды синфазных колебаний больше соответствующих собственных периодов бухты, а противофазных – меньше. С увеличением расстояния между бухтами периоды синфазных колебаний уменьшались, а периоды противофазных колебаний увеличивались и приближались к собственному периоду бухты. В [13] также показано, как проявляется взаимодействие между бухтами. Для этого изначально сейши генерировались в одной из бухт (вход во вторую был закрыт). Затем вход в заблокированную бухту открывался, и в ней сразу возникали колебания уровня воды, имеющие вид биений. С течением времени биения переходили в противофазные колебания по отношению к колебаниям в первой бухте.

Также в [13] приводятся результаты лабораторного эксперимента по моделированию отклика смежных бухт на волну цунами. В результате воздей-

ствия данной волны в обеих бухтах генерировались синфазные колебания, которые вскоре приобретали форму биений и затем переходили в противофазные колебания, не изменяющие свой вид до полного затухания.

Приведенные выше результаты лабораторных экспериментов хорошо согласуются с теорией линейных связанных осцилляторов. Так, в [23] показано, что связанные осцилляторы могут совершать как синфазные, так и противофазные колебания. При синфазных колебаниях обмен энергией между осцилляторами не происходит. Если колебания противофазные, то связь приводит к тому, что происходит периодический обмен энергией между осцилляторами, причем период перекачки зависит от величины связи [23].

С учетом результатов [13, 23] был проведен анализ мареограмм в точках, расположенных в вершинах Севастопольской и Карантинной бухт. Получено, что в результате воздействия на бухты возмущений на интервале ΔT_2 в них генерируются колебания, имеющие противофазный характер (рис. 5, а; 10, с). При воздействии на интервале ΔT_3 в бухтах возникают сначала синфазные колебания, которые затем переходят в противофазные (рис. 6, а; 11, с). В случае же воздействия на интервале ΔT_1 в бухтах генерируются синфазные колебания, которые не изменяют свой характер в течение всего расчетного интервала времени (рис 4, а; 9, с).

На основе вышеизложенного можно предложить следующий механизм генерации сейш в системе двух смежных бухт. В результате воздействия возмущения в обеих бухтах формируются сейшевые колебания с периодами, близкими к собственным периодам каждой из бухт. За счет близкого расположения бухт эти колебания передаются в соседние бухты через их входы. Как показывают результаты настоящей работы, такие «чужие» колебания могут быть достаточно интенсивными. Так, существенная интенсификация «чужих» колебаний имеет место для мод Гельмгольца Севастопольской и Карантинной бухт, а также собственной моды Севастопольской бухты с периодом 10 мин.

Выводы

На основе численного моделирования исследован отклик Севастопольской и Карантинной бухт на возмущения уровня моря на удаленной открытой границе. Численные эксперименты проведены для трех интервалов периодов возмущающих сил: 30–52 мин; 8–30 мин, 1–15 мин.

Воздействие указанных возмущений приводит к генерации собственных мод бухт: в Севастопольской бухте – с периодами 48; 22; 16; 10; 6 мин, в Карантинной бухте – с периодами 11,4; 4,8 мин. Количество генерируемых мод определяется интервалом периодов возмущений.

Севастопольская и Карантинная бухты оказывают взаимное влияние друг на друга за счет обмена энергией колебаний через свои входы. Это влияние выражается в проникновении колебаний с периодами собственных мод каждой из бухт в соседнюю с ней бухту. При этом интенсивность собственных мод Севастопольской бухты (в частности, с периодами 48; 10 мин), проникающих в Карантинную бухту, может превосходить интенсивность собственных мод Карантинной бухты. Сейши с наибольшими амплитудами в обеих бухтах вызываются возмущениями, периоды которых лежат в интервале 30–52 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрологический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.] / Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 90 с.
2. Сейши в Севастопольской бухте / Ю. Н. Горячкин [и др.] // Труды Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. 2002. Вып. 250. С. 342–353.
3. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений (июнь 2008 года) / А. Н. Морозов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 3. С. 31–43.
4. Чехов В. Н., Лушников В. Ф. К оценкам сейш в бухтах Крыма методом конечных элементов // Динамические системы. 2015. Т. 5 (33), № 1–3. С. 93–102.
5. Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б. Моделирование циркуляции и пространственной структуры термохалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 2. С. 60–76.
6. Белокопытов В. Н., Кубряков А. И., Пряхина С. Ф. Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 1. С. 5–15. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-5-15
7. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические исследования. СПб. : Гидрометеиздат, 1991. 429 с.
8. Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 325 с.
9. Балинец Н. А., Хмара Т. В. Явление тягуна в Севастопольских бухтах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. Вып. 14. С. 179–187.
10. Манилюк Ю. В. Сейши и тягун в Севастопольской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 3. С. 4–12. doi:10.22449/2413-5577-2018-3-4-12
11. Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Резонансные колебания в системе смежных бухт // Морской гидрофизический журнал. 2019. № 5. С. 423–436. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-423-436
12. Coupling between two inlets: Observation and modeling / P. L.-F. Liu [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003. V. 108, iss. C3. 3069. doi:10.1029/2002JC001478.
13. Nakano M., Fajimoto N. Seiches in Bays Forming a Coupled System // Journal of the Oceanographical Society of Japan. 1987, V. 43, iss 2. P. 124–134. URL: 43020124.pdf (date of access: 28.05.2020).
14. Инфразвуковые колебания Японского моря / Г. И. Долгих [и др.] // Океанология. 2011. Т. 441, № 1. С. 98–102.
15. Собственные колебания уровня воды в бухтах залива Посьета Японского моря / Г. И. Долгих [и др.] // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 57–63.
16. Долгих Г. И., Ковалев Д. П., Ковалев П. Д. Возбуждение сейш подо льдом акватории порта Охотского моря // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486, № 4. С. 482–486.
17. Luettich R. A., Westerink J. J., Scheffner N. W. ADCIRC: An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts and Estuaries; Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL (TR-DRP-92-6). U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1992, 137 p.
18. Luettich R. A., Westerink J. J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC. Finite Element Model Version 44.XX. 2004. 74 p. URL: https://adcirc.org/files/2018/11/adcirc_theory_2004_12_08.pdf (date of access: 01.09.2019).
19. Фомин В. В., Лазоренко Д. И., Иванча Е. В. Численное моделирование сейш в Балаклавской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 3. С. 32–39.

20. *Fomin V. V., Lazorenko D. I., Fomina I. N.* Numerical Modeling of Water Exchange through the Kerch Strait for Various Types of the Atmospheric Impact // *Physical Oceanography*. 2017. iss. 4. P. 79–89. doi: 10.22449/1573-160X-2017-4-79-89
21. *Манилюк Ю. В., Фомин В. В.* Сейшевые колебания в частично замкнутом бассейне // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2017. № 3. С. 73–83.
22. *Rabinovich A. B.* Seiches and Harbor Oscillations. Chapter 9. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering* / Ed. Y. C. Kim. Singapoure : World Scientific Publishing, 2009, P. 193–236. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009
23. *Рабинович М. И., Трубецков Д. И.* Введение в теорию колебаний и волн. М. : Наука, 1984. 432 с. URL: <https://studfile.net/preview/407893/> (дата обращения: 01.09.2019).

Об авторах:

Манилюк Юрий Владимирович, младший научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: P-6662-2017, ORCID ID: 0000-0002-5752-7562**, uvmsev@yandex.ru

Лазоренко Дмитрий Иванович, научный сотрудник, отдел вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ResearcherID: J-1925-2015, ORCID ID: 0000-0001-7524-565X**, d.lazorenko@mhiras.ru

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, **ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, v.fomin@mhi-ras.ru