Научная статья

УДК 532.59;556.556.4
EDN: TFRZIX

Исследование сейшевых колебаний в системе севастопольских бухт на основе данных натурных наблюдений и математического моделирования

Ю. В. Манилюк ✉, Ю. Ю. Юровский, А. В. Багаев, А. Ю. Белоконь, Д. И. Лазоренко, Л. В. Вержевская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ *uvmsev@yandex.ru*

Поступила в редакцию 15.05.2025; одобрена после рецензирования 01.07.2025;
принята к публикации 10.09.2025.

Аннотация

Цель. Установление параметров сейшевых колебаний и их реального модового состава в системе связанных бухт, расположенных в прибрежной зоне г. Севастополя, в диапазоне периодов менее 1 ч на основе данных натурных наблюдений уровня моря и результатов математического моделирования – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Для выполнения натурных наблюдений использованы три ультразвуковых измерителя уровня моря (разработанных и изготовленных в Морском гидрофизическом институте РАН), установленных в бухтах Голландия, Карантинная и Круглая с дискретностью измерений 10 с. Наблюдения проводились с июля по декабрь 2024 г. В результате спектрального анализа полученных временных рядов выделены пики в спектрах на периодах 54; 48; 42; 29,7; 23; 17; 13,2; 12,5; 11; 9,6; 6,8; 4,0; 2,4 мин, соответствующих собственным колебаниям севастопольских бухт. Выполнена серия численных экспериментов на основе бесприливной линейной модификации численной гидродинамической модели *Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries* (*ADCIRC*). Расчетная область включала в себя все бухты системы и часть прибрежной акватории г. Севастополя. В качестве возмущения использовался «красный шум». Получено удовлетворительное согласие с данными натурных наблюдений. На основе анализа результатов расчетов изучено взаимодействие бухт и проведена интерпретация результатов натурных наблюдений.

Выводы. Собственные моды вытянутых узких бухт легко проникают в соседние с ними бухты системы связанных бухт. Мода Гельмгольца Севастопольской бухты с периодом ~ 50 мин выделяется во всех бухтах системы и имеет высокую интенсивность. Собственные моды б. Круглая, имеющей близкую к кругу акваторию, практически не проникают в соседние бухты. В малых бухтах системы (Песочная, Абрамова) широко представлены собственные моды крупных соседних бухт, при этом они имеют достаточно высокую интенсивность.

Ключевые слова: длинноволновые колебания уровня моря, сейши в бухтах, связанная система колебаний, севастопольские бухты, модель *ADCIRC*

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20076, https://rscf.ru/project/24-27-20076/, и Соглашения с Департаментом образования и науки г. Севастополя № 86 от 19.06.2024 г.

Для цитирования: Исследование сейшевых колебаний в системе севастопольских бухт на основе данных натурных наблюдений и математического моделирования / Ю. В. Манилюк [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 6. С. 732–748. EDN TFRZIX.

Original article

Study of Seiche Oscillations in the Sevastopol Bay System Based on Field Observations and Mathematical Modeling

Yu. V. Manilyuk ✉, Yu. Yu. Yurovsky, A. V. Bagaev, A. Yu. Belokon, D. I. Lazorenko, L.V. Verzhevskaia

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ *uvmsev@yandex.ru*

Abstract
Purpose. The purpose of the study is to determine the parameters of seiche oscillations with the periods less than 1 hour and their real mode composition in the system of interconnected bays located in the coastal zone of Sevastopol based on *in-situ* sea level observations and the results of mathematical modeling.
Methods and Results. Three ultrasonic sea level gauges (developed and produced in Marine Hydrophysical Institute, RAS) were used for *in-situ* observations (measurement resolution is 10 s) through their installation in the Gollandiya, Karantinnaya and Kruglaya bays. The observations were conducted from July to December 2024. Spectral analysis of the obtained time series made it possible to identify the peaks in spectra at periods 54; 48; 42; 29.7; 23; 17; 12.5; 11; 9.6; 6.8; 4.0; 2.4 min corresponding to natural oscillations of the Sevastopol bays. A series of numerical experiments was carried out based on a non-tidal linear modification of the numerical hydrodynamic model *Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries* (*ADCIRC*). The computational domain included all the bays of the system and a part of the coastal water areas of Sevastopol. “Red noise” was used as a disturbance. Satisfactory agreement with the *in-situ* observation data was obtained. Analysis of the calculation results made it possible to investigate the interaction between the bays and to interpret the results of field observations.
Conclusions. The eigenmodes of elongated narrow bays penetrate easily into the neighboring ones in the system of interconnected bays. The Helmholtz mode of Sevastopol Bay with a period ~ 50 min is pronounced in all the system bays and is of high intensity. The eigenmodes of Kruglaya Bay which is almost of a circular shape virtually do not penetrate into the neighboring bays. The eigenmodes of larger bays are widely represented in the neighboring small ones (Pesochnaya, Abramova) involved in the system, and their intensity is quite high.

Keywords: long-wave sea level oscillations, seiches in bays, coupled system of oscillations, Sevastopol bays, *ADCIRC* model

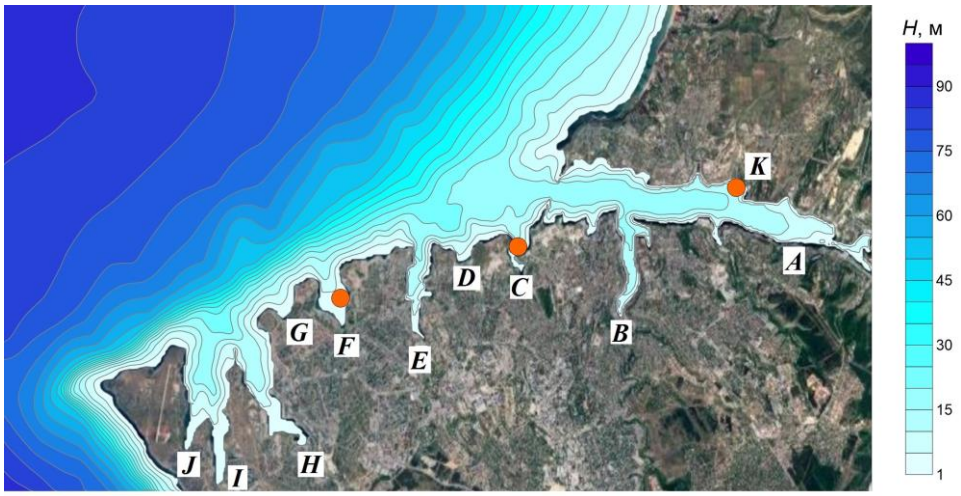
Acknowledgements: The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 24-27-20076, https://rscf.ru/project/24-27-20076/, and Agreement with the Department of Education and Science of Sevastopol No. 86 dated June 19, 2024.

For citation: Manilyuk, Yu.V., Yurovsky, Yu.Yu., Bagaev, A.V., Belokon, A.Yu., Lazorenko, D.I. and Verzhevskaia, L.V., 2025. Study of Seiche Oscillations in the Sevastopol Bay System Based on Field Observations and Mathematical Modeling. *Physical Oceanography*, 32(6), pp. 755-770.

Введение

В состав значительной территории, занимаемой г. Севастополем, входит уникальная система связанных бухт (рис. 1), активно используемых в жизни города. В Севастопольской и Камышовой бухтах размещаются порты, предназначенные для обработки разнообразных грузов, и судоремонтные предприятия. Многие из бухт системы защищены от влияния ветровых волн гидротехническими сооружениями. Но данные сооружения малоэффективны для защиты бухт от проникающих в них из открытого моря длинноволновых возмущений, приводящих к генерации сейшевых колебаний. Некоторые внут-

ренние севастопольские бухты также оборудованы защитными сооружениями. Например, как это показано в работе [1], защитный мол имеет б. Маячная, но это не спасает ее от воздействия определенных мод сейш Севастопольской бухты, где они могут достигать высокой интенсивности и представлять опасность для судов.



Р и с. 1. Батиметрия района исследований. Латинскими буквами обозначены бухты: *A* – Севастопольская, *B* – Южная, *C* – Карантинная, *D* – Песочная, *E* – Стрелецкая, *F* – Круглая, *G* – Абрамова, *H* – Камышовая, *I* – Казачья, *J* – Соленая, *K* – Голландия. Оранжевыми маркерами отмечено положение измерителей уровня моря

F i g. 1. Bathymetry of the study area. The bays are marked with Latin letters: *A* – Sevastopol, *B* – Yuzhnaya, *C* – Karantinnaya, *D* – Pesochnaya, *E* – Streletskaya, *F* – Kruglaya, *G* – Abramov, *H* – Kamyshovaya, *I* – Kazachia, *J* – Solenaya, *K* – Gollandiya. Orange markers indicate the positions of sea level gauges

Севастопольские бухты образуют систему связанных водоемов, взаимодействие которых происходит в различных временных и пространственных масштабах. Главным образом данное явление изучалось на примере смежных бухт [2–5]. Но взаимодействие имеет место и для более крупных водоемов, как это показано, например, в работе [6]. Наличие связи между бухтами приводит к расширению модового состава сейш за счет проникновения в отдельные бухты собственных мод смежных бухт.

В частично замкнутых акваториях существует особый вид колебаний – мода Гельмгольца (нулевая, фундаментальная мода), аналогичная основному тону акустического резонатора, отсутствующая в замкнутых водоемах. Данная мода не имеет узловых линий в акватории бухты. Как показывают данные натурных наблюдений, в бухтах и гаванях с узким входом мода Гельмгольца обычно доминирует над всеми остальными видами собственных колебаний и определяет общий характер движений во внутренней акватории [7, с. 104].

Наличие в системе связанных бухт крупной бухты, превышающей по размерам остальные, приводит к тому, что ее нулевая мода проявляется во всех бухтах системы. В работе [8] показано, что мода Гельмгольца Севастопольской бухты с высокой интенсивностью проявляется в б. Карантинная,

а согласно работе [9], она наблюдается также в б. Круглая. Аналогичная картина имеет место на о. Менорка (Балеарские острова), где мода Гельмгольца бухты Платха Гран (*Platja Gran*) проникает в соседнюю с ней бухту Сьютаделья (*Ciutadella*) и имеет там высокую интенсивность, что периодически приводит к катастрофическим последствиям и мешает работе порта [2].

Особый интерес представляют задачи о сейшевых колебаниях для сложных акваторий, содержащих внешнюю гавань, связанную с морем и с внутренней гаванью [10]. В севастопольских бухтах к таким акваториям можно отнести б. Двойная, включающую в себя внутренние бухты Казачья и Соленая (рис. 1)

Несмотря на важность севастопольских бухт для жизни города, они оставались длительное время мало исследованными. Имелось лишь небольшое количество океанологических работ [11–14], посвященных Севастопольской бухте. Но за последние годы усилиями сотрудников Морского гидрофизического института (МГИ) удалось заметно продвинуться в части исследования севастопольских бухт, особенно в области изучения резонансных колебаний с использованием математического моделирования. При этом применялись как современные численные гидродинамические модели *Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries* (*ADCIRC*) [1, 8, 15]) и *Simulating WAves till SHore* (*SWASH*) [9], так и аналитические решения [16], которые позволили получить достаточно точные оценки собственных периодов реальных бухт [15, 17]. Модель *ADCIRC* описана в работах [1, 2], *SWASH* – в работе [18].

Натурные наблюдения ранее проводились крайне редко. Основная их часть выполнена на гидрометеорологическом посту, расположенном на м. Павловский в Севастопольской бухте. Результаты этих наблюдений обобщены в работе [11]. Натурные данные о течениях в Севастопольской бухте приведены в работах [13, 14]. Существенного прогресса удалось добиться за счет использования недорогого и высокоэффективного ультразвукового измерителя колебаний уровня (УИКУ), разработанного в МГИ [9]. Ранее данный прибор с успехом применялся для изучения длинноволновых колебаний уровня моря в б. Круглая [9].

В настоящей работе рассмотрены результаты обработки данных натурных наблюдений, полученных с помощью УИКУ МГИ. Приборы были установлены в бухтах Голландия (входит в состав Севастопольской бухты), Карантинная и Круглая (рис. 1), при этом в них удалось провести синхронные измерения. Такие наблюдения были выполнены впервые. Для интерпретации результатов наблюдений использовалось математическое моделирование на основе модели *ADCIRC*.

Целью настоящей работы является установление для системы севастопольских бухт параметров сейшевых колебаний и их реального модового состава на основе данных натурных наблюдений и математического моделирования.

---

[1] *Luettich R., Westerink J.* Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D *ADCIRC*. Finite Element Model Version 44.XX. 2004. 74 p. Available online: http://adcirc.org/adcirc_theory_2004_12_08.pdf

[2] *Luettich Jr., 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. Dredging Research Program. Technical Report DRP-92-6, Vicksburg, MS : U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, MS, 1992, 137 p.

Материалы и методы

Объект исследования. На рис. 1 показана система севастопольских бухт и батиметрия прилегающей акватории. В районе Севастополя длина шельфа составляет ~ 47 км. Его глубину можно аппроксимировать линейной зависимостью $h(x) = \alpha x$, где $\alpha = 0{,}00426$. Резонансные периоды такого шельфа вычисляются по формуле из работы [7, с. 183]:

$$T_n = 8\sqrt{L} / \left(n\sqrt{g\alpha}\right),$$

где L – ширина шельфа; $n = 1, 3, 5 \ldots$ – номер моды; g – ускорение свободного падения.

Наблюдения уровня моря. Наблюдения колебаний уровня моря проводились в период июнь – декабрь 2024 г. (рис. 2). Для этого использовались измерители УИКУ МГИ. Мареограф представляет собой акустический дальномер, построенный на основе широко распространенного датчика *JSN-SR*04. Управление датчиком осуществляется микроконтроллером *Arduino Pro Mini*, который отвечает за инициирование зондирующего импульса, измерение времени возврата эхосигнала и запись результата измерений (целочисленного значения в микросекундах) на карту памяти. Частота следования импульсов составляет 10 Гц. В случае отсутствия отраженного сигнала регистратор фиксирует нулевое значение. Заряда шести литий-ионных аккумуляторов, используемых для питания, хватает на 21 сут работы. Для компенсации ошибок, связанных с изменениями скорости звука, вызванными в первую очередь колебаниями температуры, предусмотрен дополнительный измерительный канал (второй аналогичный приемопередатчик). По данному каналу измеряется время прохождения импульса до неподвижной мишени, расположенной на расстоянии 0,7 м от приемопередатчика, и обратно. Параллельно на каждом цикле измерений с помощью выносного датчика фиксируется температура воздуха.

Р и с. 2. Диаграмма доступности данных измерений
F i g. 2. Diagram of measurement data availability

Разрешение измерителя УИКУ по дальности определяется точностью измерения времени пролета (1 мкс), что эквивалентно ~ 0,2 мм по расстоянию (считая скорость звука в воздухе равной 340 м/с). Случайная ошибка исходных измерений, оцененная по тестовым измерениям расстояния до неподвижной гладкой поверхности, оказалась приблизительно в 100 раз больше, ~ 2 см. На этапе постобработки вычислялось среднее значение уровня моря за одну минуту, что позволило существенно снизить случайную погрешность.

Перед осреднением отбрасывались неудачные (нулевые) отсчеты, соответствующие случаям, когда отраженный сигнал не был зарегистрирован на фоне шумов. Если доля удачных измерений составляла менее 10 %, такое усредненное значение отбрасывалось и среднее значение интерполировалось по соседним точкам (таких измерений в общей статистике пренебрежимо мало, < 0,25 %). Таким образом, для расчета среднего использовалось в лучшем случае не более 600 корректных отсчетов, в худшем – не менее 60. Статистическая погрешность среднего значения нормально распределенной величины в $\sqrt{N}$ раз (где N – число корректных отсчетов) меньше ее стандартного отклонения. Это обеспечивает погрешность среднего уровня не лучше 0,8 мм (при полном наборе в 600 отсчетов) и не хуже 2,5 мм (при 60 измерениях). Последнее значение можно трактовать как окончательную погрешность анализируемых средних одноминутных рядов уровня моря. Детальное описание прибора дано в работе [9].

Наблюдения уровня моря выполнялись в бухтах Голландия, Карантинная и Круглая в течение полугода (рис. 1). Однако в связи с техническими проблемами (повреждение датчиков во время шторма, отсутствие возможности вовремя заменить батареи питания) непрерывная серия одновременных измерений во всех точках охватывает только 39 сут (с 12 сентября по 2 ноября 2024 г.). Именно этот период был использован для последующего анализа.

Методы обработки данных натурных наблюдений. Временные ряды среднего за одну минуту уровня моря исследовались стандартными методами спектрального анализа. В частности, использовался метода Уолша для оценки спектров мощности колебаний уровня моря. Временной ряд разбивался на фрагменты длительностью 234 ч (соответствует четверти длины всего ряда, спектральное разрешение 0,0042 1/ч), перекрывающие друг друга на половину длительности. Для борьбы со спектральными «утечками» (для подавления боковых лепестков, связанных с конечной длительностью фрагмента) использовалось окно Ханна, которое умножалось на каждый фрагмент записи, после чего рассчитывалось быстрое преобразование Фурье. Оценка спектра мощности получалась осреднением квадрата модуля Фурье-образов, $S_{xx} \sim < FFT\left(x(t)\right) conj\left(FFT\left(x(t)\right)\right) >$, где x – фрагмент временного ряда, FFT – оператор быстрого преобразования Фурье, угловые скобки указывают на осреднение по фрагментам.

Для более коротких модельных временных рядов длительность фрагмента соответствовала всей длительности записи (6 ч) в целях обеспечения максимально высокого частотного разрешения (0,167 1/ч).

Аналогичным образом рассчитывались взаимные (кросс-) спектры временных рядов в трех возможных комбинациях бухт: Карантинная – Голландия, Круглая – Голландия, Круглая – Карантинная, $S_{xy} \sim < FFT\left(x(t)\right) conj\left(FFT\left(y(t)\right)\right) >$, где x и y – фрагменты временных рядов в паре бухт, угол комплексной амплитуды S_{xy} соответствует разности фаз между двумя сигналами.

Численная гидродинамическая модель и схема численных экспериментов. Численные эксперименты основывались на гидродинамической конечно-элементной модели *ADCIRC* [1, 2] [19]. Использовался вариант модели, базирующийся на осредненных по глубине линеаризованных уравнениях движения в длинноволновом приближении. В силу того, что периоды сейш севастопольских бухт не превышают 1 ч, вращение Земли не учитывалось. В этом случае система уравнений принимает следующий вид:

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

Здесь U, V – средние по глубине компоненты вектора скорости течений по осям x и y соответственно; ζ – уровень моря; $H = h + \zeta$ – динамическая глубина; Δ – оператор Лапласа по пространственным переменным; A_h – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости; $q_x = UH$, $q_y = VH$ – компоненты вектора полных потоков.

Численный алгоритм модели *ADCIRC* основан на методе конечных элементов, использующем треугольные элементы и линейные базисные функции. Для снижения уровня вычислительного шума при численном интегрировании исходной системы уравнение неразрывности представляется в виде уравнения *Generalized Wave Continuity Equation* (*GWCE*) [2]. Уровень вычислительного шума в *GWCE* регулируется параметром τ_0. В расчетах, выполненных в настоящей работе, $\tau_0 = 0{,}005$.

Расчеты проводились в два этапа. На первом этапе длительностью 6 ч модельного времени осуществлялась генерация волн за счет подачи в расчетную область через ее жидкую границу возмущения типа «красного шума» [20]:

$$\zeta_b = \begin{cases} \zeta_p, & t \le t_p, \\ 0, & t > t_p, \end{cases}$$

где $\zeta_p(x, y, t)$ – случайная функция со спектром «красного» шума; t_p – длительность интервала времени действия возмущения.

На втором этапе длительностью 6 ч модельного времени решалась задача о свободных колебаниях с начальными условиями, полученными на первом этапе расчетов. На жидкой границе расчетной области ставилось условие свободного прохождения волн. На твердых границах расчетных областей задавалось условие непротекания. Рассчитанные ряды колебаний уровня моря в контрольных точках подвергались спектральному анализу. Использовались скрипты, представленные в работе [3]. С помощью преобразования Фурье получены энергетические спектры колебаний уровня, в результате чего были установлены наиболее энергонесущие периоды.

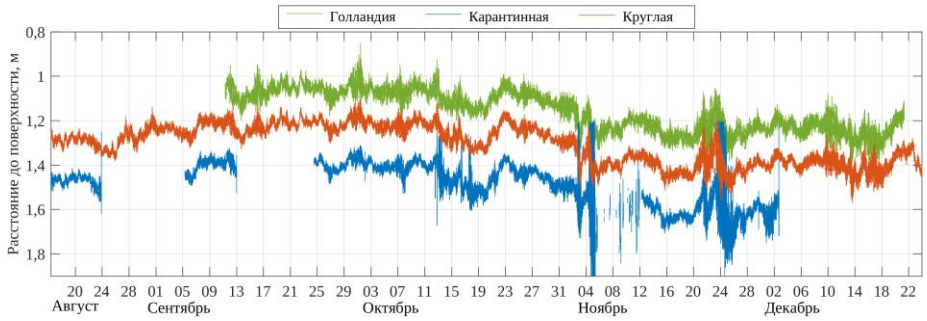
[3] *Winde H. P.* Wave height from pressure measurements. Bachelor Thesis. Delft University of Technology. 2012. 49 p. URL: https://resolver.tudelft.nl/uuid:e3b07efd-1ce9-4fd1-b051-c794c72959ca (date of access: 12.12.2024).

Проведено два численных эксперимента. В первом расчетная область представляла собой акваторию отдельных бухт (Севастопольской, Карантинной и Круглой), жидкая граница располагалась поперек входа в бухты. Такой подход позволяет получить собственные периоды бухт, определяемые профилем их береговой черты и батиметрией без учета связи между бухтами. Во втором численном эксперименте расчетная область, согласно работе [15], включала в себя все бухты и часть прибрежной зоны в виде сектора с радиусом 8 км. Сетка сгущалась в бухтах (длины сторон треугольников здесь составляли ~ 50 м), шаг интегрирования по времени Δt = 0,025 с, A_h = 3 м^2/с, коэффициент донного трения $C_d = C_0\left[1+\left(H_b/H\right)^{\alpha}\right]^{\beta/\alpha}$, где C_0 = 0,0025, α = = 10, H_b = 1 м, β = 1/3. Значения всех вышеуказанных коэффициентов выбирались на основе рекомендаций, изложенных в работах [1, 2].

При таком подходе предоставляется возможность получить картину сейшевых колебаний с учетом связей между бухтами системы.

Результаты и обсуждение

Модовый состав колебаний уровня и резонансные периоды. На рис. 3 приведены временные диаграммы измеренного расстояния от датчика до поверхности моря, имитирующие мареограммы. Видно, что во временных масштабах, превышающих несколько суток, записи колебаний уровня моря демонстрируют высокую степень согласованности.

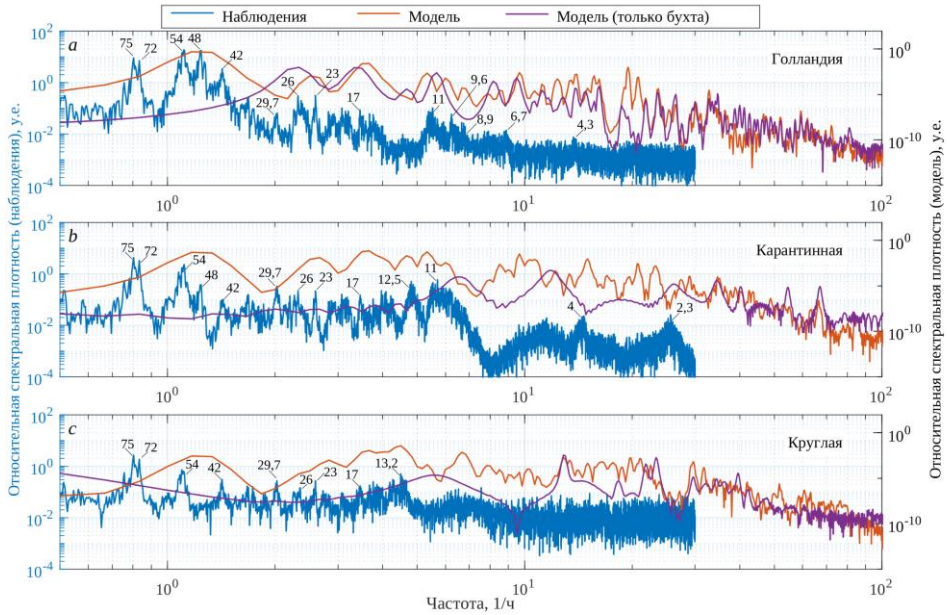


Р и с. 3. Временные диаграммы измеренного расстояния от датчика до поверхности моря для трех станций. Шкала времени градуирована в сутках, осреднение данных – 1 мин
F i g. 3. Time diagrams of the measured distance from a sensor to the sea surface for three stations. Time scale is calibrated in days, data averaging is 1 min

В настоящей работе ограничимся детальным рассмотрением колебаний уровня моря в диапазоне периодов до 1 ч, в основном соответствующих собственным модам системы севастопольских бухт. На рис. 4 представлены графики спектральной плотности, на рис. 5 – разность фаз между спектральными компонентами колебаний уровня. Как видно из рис. 4, имеет место удовлетворительное соответствие для резонансных пиков, полученных по данным наблюдений и моделирования.

В низкочастотной области по данным наблюдений (рис. 4) на всех станциях выделяются интенсивные пики на периодах 75; 54; 48 и 42 мин. О нали-

чии колебания с периодом 75 мин в Севастопольской бухте указывается в работе [11]. Данная мода не выявлена в процессе математического моделирования для системы севастопольских бухт, и ее можно отнести к высокочастотным глобальным сейшам акватории Черного моря. Колебания с периодами 54; 48 и 42 мин обусловлены наличием Севастопольской бухты в системе бухт. Как показывают результаты работы [21], в связанных бухтах возможно существование как противофазных, так и синфазных колебаний с периодами, близкими к собственному периоду одной из бухт. При этом период синфазных колебаний больше собственного периода бухты, а противофазных – меньше указанного периода.

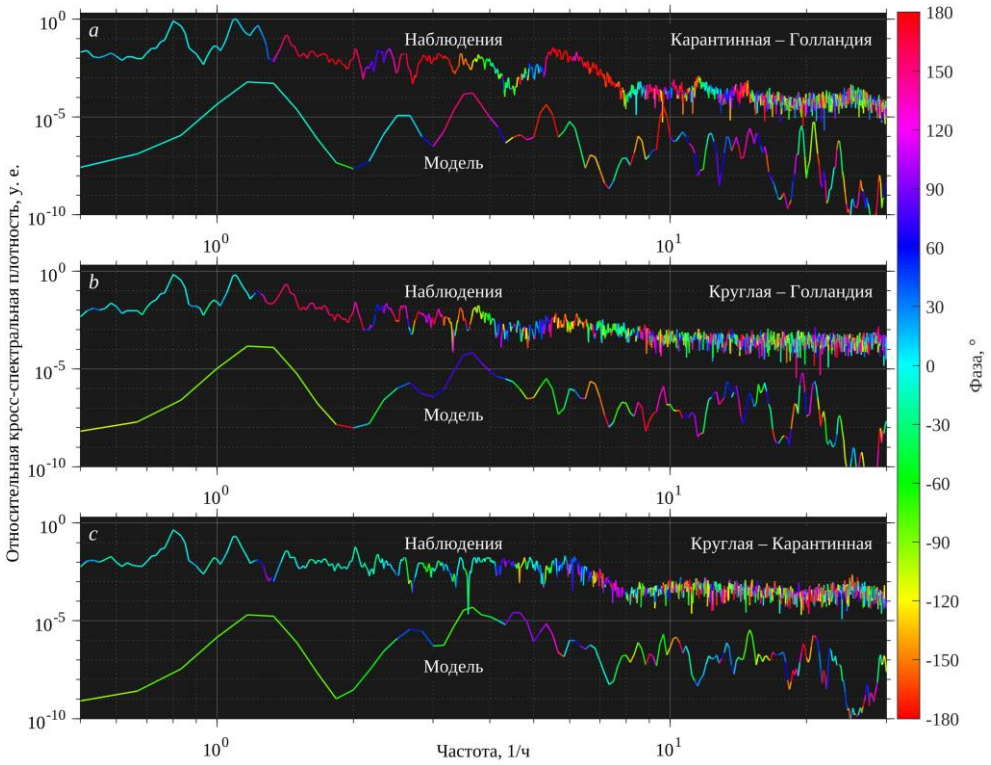


Р и с. 4. Спектральная плотность колебаний уровня моря в севастопольских бухтах, рассчитанная на основе данных натурных наблюдений и результатов моделирования для всей системы севастопольских бухт и акваторий отдельных бухт. Над пиками указаны значения периодов в минутах

F i g. 4. Spectral density of sea level fluctuations in the Sevastopol bays calculated both for the whole system of Sevastopol bays and for the individual ones based on *in situ* observations and modeling results. Periods in minutes are indicated above the peaks

Согласно теоретическим оценкам из работы [22], период нулевой моды (моды Гельмгольца) Севастопольской бухты составляет ~ 50 мин. Из рис. 5 видно, что, по данным наблюдений, колебания уровня моря с периодом 54 мин в бухтах Круглая и Карантинная синфазны с колебанием в б. Голландия, а колебания с периодом 42 мин – противофазны. Отсюда можно заключить, что за счет связи между бухтами нулевая мода Севастопольской бухты проявляется в бухтах Карантинная и Круглая в виде синфазных или противофазных колебаний. Также в бухтах Голландия и Карантинная (которая близко примыкает к Севастопольской бухте) имеют место колебания уровня с периодом 48 мин, отсутствующие в б. Круглая. Видимо, это происходит, когда

связь между бухтами системы проявляется слабо. Расчет на основе модели показывает (рис. 4) наличие интенсивного пика на периоде ~ 50 мин во всех трех рассматриваемых бухтах, что указывает на проникновение с высокой интенсивностью моды Гельмгольца Севастопольской бухты в бухты Карантинная и Круглая.



Р и с. 5. Модуль взаимного спектра в парах Карантинная – Голландия (*a*), Круглая – Голландия (*b*) и Круглая – Карантинная (*c*). Цветом показана разность фаз между спектральными компонентами

F i g. 5. Cross-spectrum modulus in the following pairs of bays: Karantinnaya – Gollandiya (*a*), Kruglaya – Gollandiya (*b*), and Kruglaya – Karantinnaya (*c*). Phase difference between the spectral components is indicated by color

По данным наблюдений (рис. 4) выделяется пик на периоде 29,7 мин. Он не выявляется с помощью моделирования, поэтому его можно предположительно связать с пятой модой шельфовых сейш, имеющей период, равный 28 мин.

В среднечастотной области сейш во всех рассмотренных бухтах по данным наблюдений и моделирования регистрируются интенсивные пики на периодах 17; 12,5; 11; 9,6 мин (рис. 4). Пик на периоде 17 мин соответствует собственной моде Севастопольской бухты. Принадлежность этой моды указанной бухте подтверждает рис. 5, из которого видно, что данное колебание отсутствует между бухтами Круглая и Карантинная и имеет противофазный характер (свойственный сейшам) между б. Голландия и бухтами Круглая и Карантинная. Интересно, что собственная мода Севастопольской бухты с периодом

12,5 мин интенсивнее в бухте Карантинная, чем в Севастопольской. Наличие пика на периоде ~ 11 мин обусловлено нулевой модой б. Карантинная. Колебания уровня между бухтами Голландия и Карантинная имеют на данном периоде противофазный характер (рис. 5). Отметим также, что данные моделирования и наблюдений фиксируют проявление моды Гельмгольца в б. Круглая с периодом ~ 13,5 мин, которая в соседних бухтах не выделяется.

Из высокочастотных мод сейш в б. Голландия имеют место собственная мода Севастопольской бухты с периодом 6,8 мин, а также собственная мода б. Карантинная с периодом ~ 4,0 мин (рис. 4). В б. Карантинная выделяются ее собственные моды с периодами 4,0 и 2,4 мин.

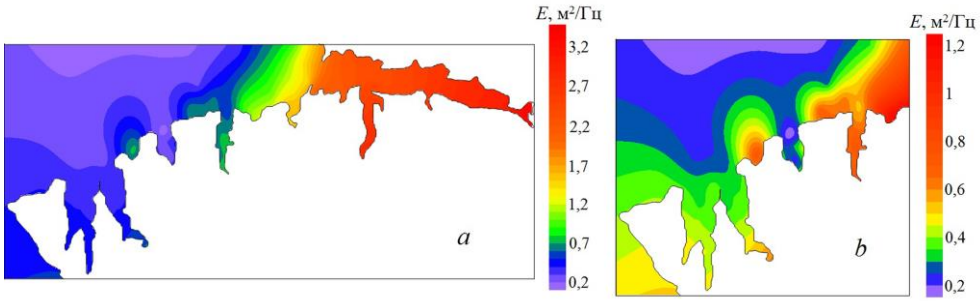
В таблице приведены периоды сейшевых колебаний в наиболее крупных севастопольских бухтах, полученные с помощью математического моделирования и данных натурных наблюдений. Здесь T_0, T_1, T_2, T_3, T_4 – периоды собственных колебаний Севастопольской бухты (значения представлены для района б. Голландия) и бухт Южная, Карантинная, Стрелецкая и Круглая. Указанные периоды исследуемых бухт известны из работы [15], где они получены с помощью аналитических решений по формулам для прямоугольных бассейнов с открытым входом постоянной глубины, а также с параболическим профилем дна. «Чужие» периоды A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 – это периоды собственных мод, которые проникают из соседних бухт и прибрежной зоны. В таблице они расположены по мере убывания энергии колебаний.

Периоды сейшевых колебаний в наиболее крупных севастопольских бухтах, полученные с помощью математического моделирования и данных натурных наблюдений
Periods of seiche oscillations in the largest Sevastopol bays resulted from mathematical modeling and *in-situ* observation data

Бухта / Bay	Собственные периоды (результаты математического моделирования / натурные данные), мин / Eigenperiods (mathematical modeling results / *in-situ* data), min					«Чужие» периоды, мин / "Alien" periods, min				
	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
Севастопольская (включая б. Голландия) / Sevastopol bay (including Gollandiya)	51,4 / 54,0	22,5 / 23,0	16,4 / 17,0	10,0 / 9,6	6,1 / 6,7	11,3	3,0	4,3	2,8	3,8
Южная / Yuzhnaya	16,4	4,3	2,8	2,2	–	51,4	11,3	22,5	6,1	12,9
Карантинная / Karantinnaya	11,3 / 11,0	4,0 / 4,0	2,6 / 2,3	–	–	16,4	51,4	6,1	12,9	22,5
Стрелецкая / Streletskaya	12,9	4,4	2,8	–	–	16,4	14,4	11,3	51,4	22,5
Круглая / Kruglaya	13,3 / 13,2	4,6	2,8	–	–	16,4	9,0	51,4	4,4	21,2
Камышовая / Kamyshovaya	21,2	6,9	4,4	2,7	–	10,3	16,4	3,6	9,2	51,4

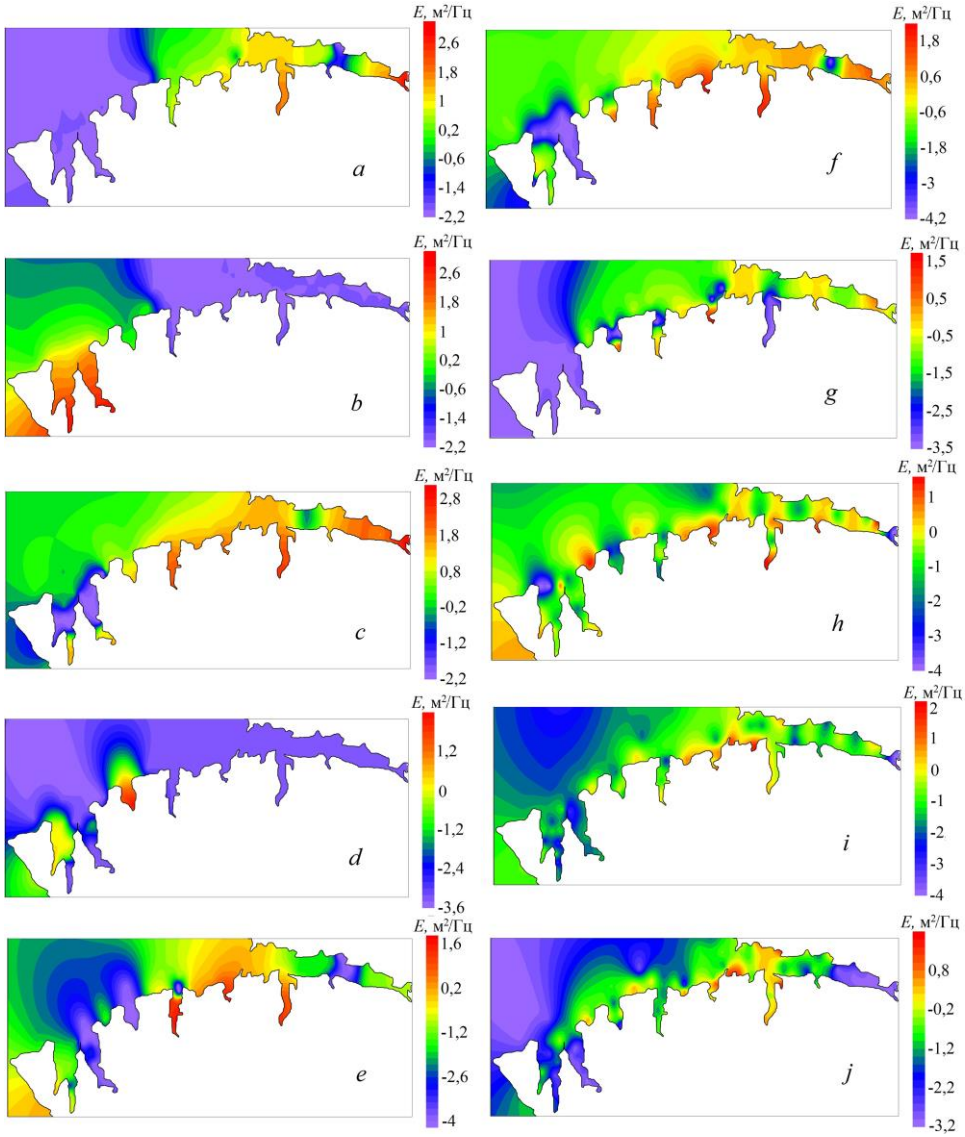
Из таблицы и рис. 4, 5 видно, что Севастопольская бухта оказывает значительное влияние на все бухты системы. Но при этом и данные бухты влияют на Севастопольскую. В частности, за счет связи между бухтами в Севастопольскую бухту с высокой интенсивностью проникают собственные моды б. Карантинная (с периодами 11,0 и 4,0 мин) и б. Стрелецкая (с периодом 4,4 мин). Что касается бухт, более удаленных от Севастопольской, длины волн их собственных мод относительно малы по сравнению с расстоянием до Севастопольской бухты, поэтому при выходе из бухт они довольно быстро затухают, не достигнув акватории главной бухты Севастополя. Отметим, что все бухты системы в той или иной мере взаимодействуют друг с другом. В б. Круглая проникают собственные моды бухт Стрелецкая (с периодом 4,4 мин) и Камышовая (с периодами 7,5; 21,2 мин), в б. Стрелецкая – собственная мода б. Карантинная (с периодом 11,0 мин). Анализ результатов расчетов показал, что в малых бухтах Абрамова и Песочная широко представлены собственные моды более крупных соседних бухт.

Пространственная структура основных мод сейш системы севастопольских бухт. На рис. 6 показано пространственное распределение спектральной плотности колебаний уровня с периодом 51,4 мин в системе севастопольских бухт, полученное с помощью численного моделирования. Указанный период соответствует моде Гельмгольца Севастопольской бухты. Видно, что энергия колебаний максимальна в Севастопольской и Карантинной бухтах. При этом данная мода имеет место во всех остальных бухтах системы, но в наиболее удаленных от Севастопольской бухты (Камышовая и Двойная) ее интенсивность заметно слабее. Отметим, что данное колебание также имеет место в малых бухтах Песочная и Абрамова.



Р и с. 6. Пространственное распределение спектральной плотности колебаний уровня с периодом 51,4 мин в севастопольских бухтах по результатам численного моделирования для всей системы (*a*) и бухт, удаленных от Севастопольской (*b*)
F i g. 6. Spatial distribution of the spectral density of sea level oscillations (period is 51.4 min) in the Sevastopol bays based on the results of numerical modeling for the whole system of Sevastopol bays (*a*) and for the ones remote from Sevastopol (*b*)

Пространственное распределение спектральной плотности колебаний уровня других наиболее энергонесущих периодов, выделенных на основе обработки результатов математического моделирования, приведено на рис. 7.



Р и с. 7. Пространственное распределение спектральной плотности основных энергонесущих колебаний уровня в системе севастопольских бухт с периодами 22,5 мин (*a*); 21,2 мин (*b*); 16,4 мин (*c*); 13,3 мин (*d*); 12,9 мин (*e*); 11,3 мин (*f*); 10,0 мин (*g*); 6,1 мин (*h*); 4,0 мин (*i*); 2,8 мин (*j*)

F i g. 7. Spatial distribution of the spectral density of main energy-carrying oscillations of sea level in the Sevastopol bay system with periods 22.5 min (*a*); 21.2 min (*b*); 16.4 min (*c*); 13.3 min (*d*); 12.9 min (*e*); 11.3 min (*f*); 10.0 min (*g*); 6.1 min (*h*); 4.0 min (*i*); 2.8 min (*j*)

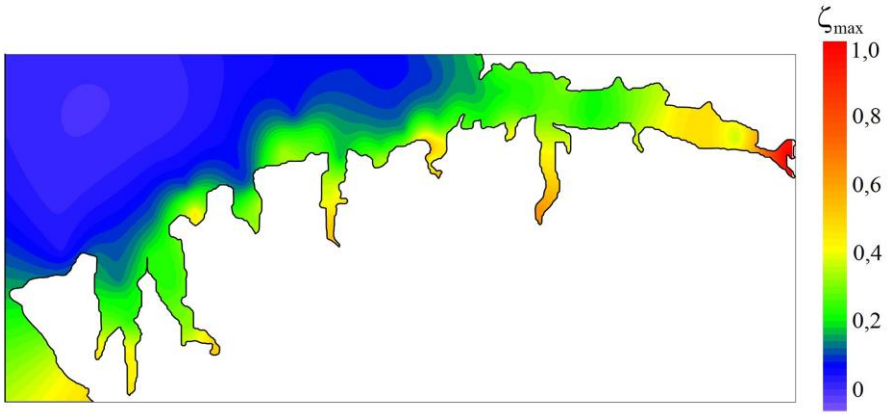
Колебания с периодом 22,5 мин (рис. 7, *a*) наиболее интенсивны в б. Южная и в вершине Севастопольской, этот период соответствует первой моде Севастопольской бухты. Период 21,2 мин (рис. 7, *b*) является собственным периодом б. Камышовая, также он с высокой интенсивностью проявляется в б. Двойная. Периоды 22,5 и 21,2 мин близки по значению, поэтому соответствующие им моды могут усиливать друг друга.

Периоды 16,4; 12,9; 10,0; 6,1 мин обусловлены наличием в системе бухт Севастопольской бухты. Как видно из рис. 7, *b*, *d*, *f*, *h*, данные моды заметно выражены в большинстве бухт системы.

Период 13,3 мин (рис. 7, *d*) принадлежит моде Гельмгольца б. Круглая. Вследствие специфической формы акватории данной бухты энергия колебаний слабо излучается в открытое море и практически не проявляется в бухтах системы.

Период 11,3 мин (рис. 7, *e*) соответствует моде Гельмгольца б. Карантинная, которая с высокой интенсивностью проявляется во всех бухтах системы, за исключением б. Камышовая. Это относится и к другой собственной моде б. Карантинная, имеющей период 4,0 мин (рис. 7, *g*).

На рис. 8 показано пространственное распределение относительных (приведенных к максимальному значению) амплитуд сейшевых колебаний уровня в бухтах, сгенерированных воздействием «красного шума» и содержащих все рассмотренные выше моды. Видно, что наибольшие значения амплитуд приходятся на вершины бухт с максимумом в главной – Севастопольской – бухте.



Р и с. 8. Пространственное распределение относительных амплитуд сейшевых колебаний уровня в системе севастопольских бухт
F i g. 8. Spatial distribution of the relative amplitudes of seiche sea level fluctuations in the Sevastopol bay system

Заключение

Проведены длительные (более 7 мес) наблюдения колебаний уровня в бухтах Голландия (расположена в Севастопольской бухте), Карантинная, Круглая, входящих в состав системы севастопольских бухт. Под влиянием погодных условий и возникших технических проблем непрерывная серия одновременных измерений во всех точках охватывала 39 сут – с 12 сентября по 2 ноября 2024 г., именно этот период был использован для проведенного анализа. Для интерпретации данных натурных наблюдений на базе модели *ADCIRC* выполнено математическое моделирование сейшевых колебаний.

Анализ колебаний уровня и результатов математического моделирования позволил выделить следующие наиболее энергонесущие периоды длинноволновых колебаний (до 1 ч) в системе севастопольских бухт: 54; 48; 42; 29,7; 23; 17; 13,2; 12,5; 11,0; 9,6; 6,8; 4,0; 2,4 мин.

Севастопольские бухты активно взаимодействуют друг с другом за счет связи через их входы, при этом расширяется модовый состав сейшевых колебаний в бухтах. Наиболее крупная Севастопольская бухта оказывает значительное влияние на все бухты системы, но и смежные бухты также влияют на нее. По данным наблюдений, мода Гельмгольца Севастопольской бухты проникает с высокой интенсивностью в бухты Карантинная и Круглая в виде противофазных колебаний с периодом 42 мин и синфазных с периодом 54 мин. Результаты математического моделирования показывают наличие мощного пика на периоде ~ 50 мин во всех бухтах системы. Прочие собственные моды Севастопольской бухты с периодами 23; 17; 12,5; 9,6 мин также выделяются по данным наблюдений в бухтах Карантинная и Круглая. По данным моделирования они выделяются во всех бухтах системы.

Мода Гельмгольца б. Карантинная с периодом ~ 11 мин с высокой интенсивностью проявляется в б. Голландия.

Мода Гельмгольца б. Круглая, имеющая период 13,3 мин, выделена по данным наблюдений и математического моделирования, при этом указанная мода практически не проникает в соседние бухты.

Собственные моды вытянутых узких бухт легко проникают в соседние с ними бухты. Собственные моды б. Круглая, имеющей близкую к кругу акваторию, практически не проникают в соседние бухты.

В малых бухтах системы (Песочная, Абрамова) широко представлены собственные моды крупных соседних с ними бухт, имеющие достаточно высокую интенсивность.

В целом результаты, полученные с помощью численного моделирования, неплохо согласуются с данными натурных наблюдений. Они позволили получить пространственную структуру колебаний уровня всей системы связанных севастопольских бухт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование режимов сейшевых колебаний Севастопольской бухты / Ю. В. Манилюк [и др.] // Океанология. 2023. Т. 63, № 6. С. 916–926. EDN QOSMGE. https://doi.org/10.31857/S0030157423060114
2. Coupling between two inlets: Observation and modeling / P. L.-F. Liu [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2003. Vol. 108, iss. C3. 3069. https://doi.org/10.1029/2002JC001478
3. *Ковалев Д. П., Манилюк Ю. В., Ковалев П. Д.* Колебания уровня моря в смежных бухтах Торгового порта и Холмск-Северный (остров Сахалин) // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 3. С. 450–468. EDN XVLLYV.
4. Numerical Modeling of Long-Wave Oscillations in Two Coupled Bays / Yu. V. Manilyuk [et al.] // Processes in GeoMedia – Volume VIII / Ed. T. Chaplina. Singapore : Springer, 2024. P. 285–295. (Springer Geology Book Series) https://doi.org/10.1007/978-981-97-6627-7_27
5. *Медведев И. П., Архипкин В. С.* Колебания уровня моря в Голубой бухте (Геленджик) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 3. С. 70–78.
6. Tsunami Resonance and Spatial Pattern of Natural Oscillation Modes with Multiple Resonators / R. Aranguiz [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124, iss. 11. P. 7797–7816. https://doi.org/10.1029/2019JC015206
7. *Рабинович А. Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1993. 324 с.

8. *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. EDN QEFCWJ. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-261-276

9. Sea level oscillations spectra of a shallow coastal bay: cost-effective measurements and numerical modelling in Kruglaya Bay / Yu. V. Manilyuk [et al.] // Regional Studies in Marine Science. 2024. Vol. 69. 103326. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103326

10. *Luick J. L., Hinwood J. B.* Water levels in a dual-basin harbour in response to infragravity and edge waves // Progress in Oceanography. 2008. Vol. 77, iss. 4. P. 367–375. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.04.002

11. Сейши в Севастопольской бухте / Ю. Н. Горячкин [и др.] // Труды Украинского гидрометеорологического института. 2002. Вып. 250. С. 342–353.

12. *Балинец Н. А., Хмара Т. В.* Явление тягуна в севастопольских бухтах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2006. Вып. 14. С. 204–208. EDN ZBOAIB.

13. Течения в Севастопольской бухте по данным *ADCP*-наблюдений (июнь 2008 года) / А. Н. Морозов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 3. С. 31–43. EDN TMJXDX.

14. Течения в Севастопольской бухте по данным *ADCP*-наблюдений, ноябрь 2014 г. / А. Н. Морозов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. Вып. 28. С. 25–30. EDN VBFSNL.

15. *Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В.* Сейшевые колебания в системе Севастопольских бухт // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 5. С. 526–536. https://doi.org/10.31857/S0321059621050126

16. *Иванов В. А., Манилюк Ю. В., Санников В. Ф.* Сейши в бассейне с открытым входом // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59, № 4. С. 23–30. EDN XTUVKX. https://doi.org/10.15372/PMTF20180404

17. *Манилюк Ю. В.* Сейши и тягун в Севастопольской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 4–12. EDN VKAKYP. https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-4-12

18. *Zijlema M., Stelling G., Smit P.* SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58, iss. 10. P. 992–1012. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015

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. EDN ZMZFVV.

20. *Рабинович А. Б., Монсеррат С., Файн И. В.* Численное моделирование экстремальных сейшевых колебаний в районе Балеарских островов // Океанология. 1999. Т. 39, № 1. С. 16–24.

21. *Nakano M., Fujimoto N.* Seiches in Bays Forming a Coupled System // Journal of the Oceanographical Society of Japan. 1987. Vol. 43. P. 124–134. https://doi.org/10.1007/BF02111888

22. *Чехов В. Н., Лушников В. А.* К оценкам сейш в бухтах Крыма методом конечных элементов // Динамические системы. 2015. Т. 5, № 1–2. С. 93–102. EDN XWZLTJ.

Об авторах:

Манилюк Юрий Владимирович, научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5752-7562**, **WoS ResearcherID: P-6662-2017**, **Scopus Author ID: 6602563261**, **SPIN-код: 4548-0051**, uvmsev@yandex.ru

Юровский Юрий Юрьевич, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией прикладной физики моря, отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9995-3965**, **WoS ResearcherID: F-8907-2014**, **Scopus Author ID: 24377122700**, **SPIN-код: 8482-5777**, y.yurovsky@mhi-ras.ru

Багаев Андрей Владимирович, ведущий научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4018-7642**, **WoS ResearcherID: K-5373-2016**, **Scopus Author ID: 57189266640**, **SPIN-код: 5426-7176**, a.bagaev1984@mhi-ras.ru

Белоконь Александра Юрьевна, старший научный сотрудник, отдел вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1299-0983**, **WoS ResearcherID: M-6839-2018**, **Scopus Author ID: 57259494800**, **SPIN-код: 5633-9877**, a.bazykina@mhi-ras.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, **ORCID ID: 0000-0001-7524-565X**, **ResearcherID: J-1925-2015**, **SPIN-код: 4712-6050**, d.lazorenko.dntmm@gmail.com

Вержевская Людмила Владимировна, ведущий специалист, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-1547-7966**, **ResearcherID: R-4253-2018**, **SPIN-код: 7309-7879**, ludmila.ver@mhi-ras.ru