

Резонансные колебания в системе смежных бухт

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

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Поступила в редакцию 02.04.2019 г., после доработки – 07.05.2019 г.

Цель. Целью работы является изучение резонансного отклика системы двух модельных бухт на начальное возмущение свободной поверхности, вызванное подвижкой дна моря, а также исследование взаимного влияния друг на друга смежных бухт.

Методы и результаты. В работе на основе численной гидродинамической модели *ADCIRC*, использующей метод конечных элементов, исследуется резонансный отклик системы двух смежных бухт (*A* и *B*) прямоугольной формы, имеющих размеры и глубину, характерные для Севастопольской и Карантинной бухт соответственно, на начальное возмущение свободной поверхности, вызванное подвижкой дна моря. Расчеты проведены при различных размерах области начального возмущения как для системы двух смежных бухт, так и для каждой бухты в отдельности. Для выявления резонансных периодов использовались периодограммы колебаний уровня свободной поверхности в контрольных точках внутри и за пределами бухт.

Выводы. В результате воздействия начального возмущения в бухте *A* генерируются четыре низшие моды собственных колебаний с периодами 45, 15, 9, 6 мин, а в бухте *B* – две низшие моды с периодами 12 и 4 мин. Полученные значения периодов удовлетворительно согласуются с аналитическими оценками. Наличие смежной бухты вызывает интенсификацию моды Гельмгольца в обеих бухтах. Внешнее возмущение с периодом 11,7 мин представляет потенциальную опасность для бухты *B*, так как в этом случае возникает резонанс с ее модой Гельмгольца. На основе аналитической зависимости между периодами инфрагравитационных волн и полученными по данным ретроспективного анализа волнения средними периодами ветровых волн в Севастопольском регионе выявлена теоретическая возможность генерации в обеих бухтах короткопериодных сейш инфрагравитационными волнами.

Ключевые слова: севастопольские бухты, сейши, резонансные колебания, инфрагравитационные волны, численное моделирование, модель *ADCIRC*.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Морского гидрофизического института РАН (тема № 0827-2018-0004) при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-05-80035).

Для цитирования: Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Резонансные колебания в системе смежных бухт // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 423–436. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-423-436

Resonance Oscillations in the System of Adjacent 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 both resonance response of a system of two model bays to the initial disturbance of free surface induced by the sea bottom motion, and mutual influence of the adjacent bays.

© Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В., 2019

Methods and Results. Based on the numerical hydrodynamic model ADCIRC including the method of finite elements, studied is the resonance response of two adjacent bays (*A* and *B*; rectangular form, certain dimensions and depths) similar to the Sevastopol and Karantinnaya bays, respectively, to the initial disturbance of free surface induced by the sea bottom motion. The calculations were carried out at different dimensions of the initial disturbance area both for the system of two adjacent bays and individually for each bay.

Conclusions. Initial disturbance generates in the bay *A* four lowest modes of eigen-oscillations with the periods 45, 15, 9 and 6 min., and in the bay *B* – two lowest modes with the periods 12 and 4 min. The obtained periods are in good agreement with the analytical estimates. Presence of the adjacent bay gives rise to intensification of the Helmholtz mode in each of them. External disturbance with the period 11.7 min. constitutes potential danger for the bay *B* since, in such a case, resonance with its Helmholtz mode occurs. The analytically obtained dependence between the periods of the infra-gravity waves and the average periods of the wind waves in the Sevastopol region (resulted from the retrospective analysis of waves) permitted to reveal theoretical possibility of generating short-period seiches by the infra-gravity waves in both bays.

Keywords: Sevastopol Bay, seiches, resonance oscillation, infra-gravity wave, numerical modeling, ADCIRC.

Acknowledgments: the investigation is carried out within the framework of the state task of Marine Hydrophysical Institute, RAS (theme No. 0827-2018-0004) at partial RFBR support (project No. 18-05-80035).

For citation: Manilyuk, Yu.V., Lazorenko, D.I. and Fomin, V.V., 2019. Resonance Oscillations in the System of Adjacent Bays. *Physical Oceanography*, 26(5), pp. 374-386. doi:10.22449/1573-160X-2019-5-374-386

Введение

Явление, известное под названием «резонанса в гавани» (англ. *harbor resonance*), возникает в полузакрытых бассейнах, таких как бухты или заливы, если параметры внешних воздействий совпадают с периодами собственных колебаний бассейна, которые определяются геометрическими размерами, профилем береговой черты и батиметрией. Энергия внешних волновых возмущений может захватываться полузакрытой областью, из-за чего в этой области происходит усиление колебаний [1]. Это может привести к возникновению тягуна¹, приводящего к столкновению судов, разрыву швартовых и проблемам при погрузочно-разгрузочных работах. Интенсивные колебания в бухтах могут вызываться разнообразными динамическими воздействиями: цугами короткопериодных волн, инфрагравитационными волнами, резкими перепадами атмосферного давления, цунами от удаленных землетрясений и волнами, вызванными подводными оползнями [1]. В результате отражения приходящих из открытого моря волн от берега и кромки шельфа образуются шельфовые сейши². Эти сейши могут проявляться в примыкающих к шельфу бухтах, как, например, в дальневосточной бухте Алексева, расположенной на о-ве Попова [2].

Большой теоретический и практический интерес представляет изучение сейшевых колебаний в системах из нескольких близко расположенных (смежных) бухт. Характерным примером является система севастопольских бухт, включающая семь основных бухт разного размера и конфигурации.

¹ Лабзовский Н. А. Непериодические колебания уровня моря. Л. : Гидрометеиздат, 1971. 237 с.

² Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 325 с.

В общем случае исследование резонансных свойств в такой системе достаточно сложно. Поэтому в качестве первого шага в настоящей работе рассматривается задача для двух смежных бухт, имеющих размеры и глубины Севастопольской и Карантинной бухт. Это даст возможность вначале изучить резонансные свойства на простом примере и затем перейти к рассмотрению реальной системы бухт.

При математическом моделировании сейш обычно используется две методики. Первая методика основывается на нахождении периодов резонансных мод и их пространственной структуры путем решения спектральной задачи на собственные значения для эллиптического оператора³, вторая – на решении серии нестационарных задач с разными видами возмущающих сил, действующих на поверхность водоема. В качестве возмущений обычно рассматриваются: движение циклонов [3], барических фронтов [4], поля стационарного ветра [5], волнопродуктор на жидкой границе бассейна [6], генерирующий волны на интервале, включающем резонансные частоты. В работе [7] исследовались резонансные свойства бухты Алексева при воздействии на нее начального возмущения типа цунами. Подобный метод применяется и в настоящей работе.

Численная модель и выбор параметров. Для моделирования резонансных колебаний в системе смежных бухт применялся линейный вариант численной гидродинамической модели *ADCIRC (Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries)* [8, 9]. Исходные уравнения модели имеют вид

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

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = A_h \frac{\Delta q_y}{H}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Здесь U , V – средние по глубине компоненты вектора скорости течений 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.

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)–(3) уравнение неразрывности (3) представляется в виде уравнения *GWCE (Generalized Wave Continuity Equation)* [8].

³ Архипкин В. С., Иванов В. А., Николаенко Е. Л. Моделирование баротропных сейш в южных морях // Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях. М.: Наука, 1989. С. 104–117.

Численные эксперименты и обсуждение результатов. Конкретные расчеты проводились для двух смежных бухт прямоугольной формы и постоянной глубины. Геометрия расчетной области представлена на рис. 1. Большая бухта (бухта А) имела размеры и среднюю глубину Севастопольской бухты (длина 7 км, ширина 1 км, глубина 11,7 м), меньшая (бухта В) – Карантинной бухты (длина 2,4 км, ширина 370 м, глубина 11,8 м). Наибольшая ширина расчетной области за пределами бухт составляла 21 км, ее глубина – 30 м, что соответствует средней глубине прибрежной зоны Севастопольского региона. Неструктурированная расчетная сетка (рис. 2) состояла из ~ 40000 узлов. Шаг интегрирования системы (1)–(3) по времени составлял 0,025 с. Коэффициент $A_h = 3 \text{ м}^2/\text{с}$.

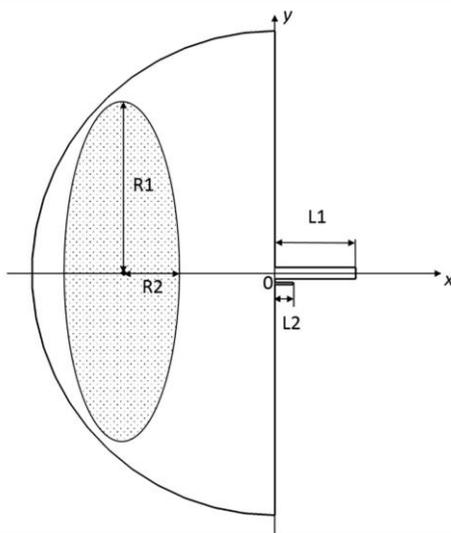


Рис. 1. Схема расчетной области
F i g. 1. Scheme of the computational area

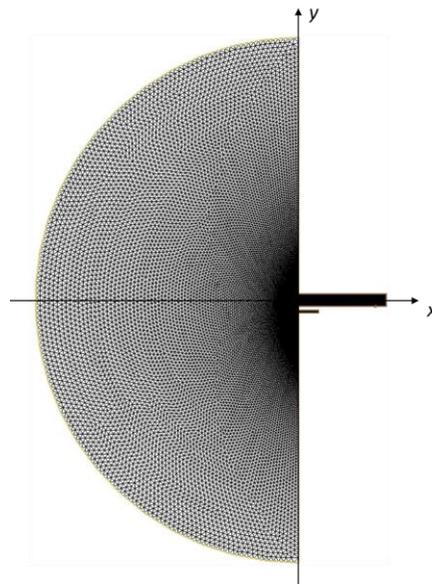


Рис. 2. Неструктурированная расчетная сетка
F i g. 2. Non-structured computational grid

Начальные условия имели вид

$$U = 0, V = 0, \eta = \eta_0 \begin{cases} \sqrt{1-r^2}, & r < 1, \\ 0, & r \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

где $r = \sqrt{(x-x_0)^2/R_1^2 + (y-y_0)^2/R_2^2}$; η_0 – максимальный подъем уровня; x_0, y_0 – координаты центра эллипса; R_1, R_2 – поперечная и продольная полуоси эллипса, лежащего в основании начального возмущения. Константа η_0 в формуле (4) выбиралась так, чтобы амплитуда генерируемой волны составляла примерно 0,5 м на входе в бухту А.

Область начального возмущения была ориентирована параллельно берегу (см. рис. 1). Ее продольный размер не менялся и составлял 30 км. Попе-

речный размер области возмущений выбирался из следующих соображений. Согласно нормативному документу ⁴, период волны цунами τ в прибрежной зоне Севастополя составляет ~ 10 мин. Тогда в рамках длинноволнового приближения в качестве поперечного размера области возмущения можно принять величину

$$\lambda = c\tau = \sqrt{gh} \cdot \tau. \quad (5)$$

Отсюда при $h = 30$ м и $\tau = 10$ мин получаем, что $\lambda \approx 10$ км. В работе [10] размеры характерных для Черного моря очагов землетрясения, определенные по формуле *Wells* [11, с. 984], составляют около $16,4 \times 68$ км. На основании данных оценок в численных экспериментах значения λ изменялись от 10 до 16 км.

На твердых границах расчетной области ставилось условие непротекания. На жидкой границе задавалось условие свободного прохождения вида [7, с. 60]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial \eta}{\partial n} = 0.$$

Было выполнено четыре серии численных экспериментов. В первой серии расчетная область включала в себя обе бухты, во второй – только бухту А, в третьей – только бухту В, в четвертой – только область прибрежного шельфа без бухт. В каждой серии экспериментов параметр λ был равен 10, 14 и 16 км. Общее время интегрирования составляло 4 ч.

Модельные значения уровня моря выводились в 21 точке, расположение которых показано на рис. 3. Далее с использованием спектрального анализа колебаний уровня моря в этих точках выделялись резонансные периоды. Для уменьшения влияния переходных процессов на результат определения резонансных периодов спектры рассчитывались для усеченных рядов, из которых был исключен начальный интервал времени длиной 90 мин.

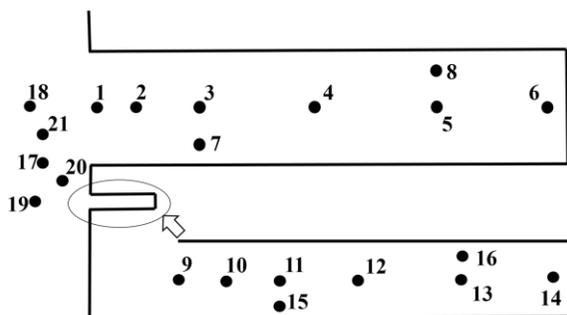


Рис. 3. Схема расположения виртуальных мареографов
Fig. 3. Scheme of location of virtual mareographs

⁴ Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования : СП 292.1325800.2017. Введ. 2017-12-24. М. : Стандартиформ, 2017. 117 с.

Полученные на основе численной модели резонансные периоды сравнивались с периодами, рассчитанными по формуле [12, с. 76]:

$$\tau_{km} = \frac{4}{\sqrt{gh}} \frac{ab}{\sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}}, \quad (6)$$

где a , b , h – длина, ширина и глубина соответствующей бухты; $k = 0, 1, 2, \dots$ – номер продольной моды; $m = 0, 1, 2, \dots$ – номер поперечной моды.

В табл. 1, 2 для каждой из бухт приведены значения резонансных периодов, упорядоченные по убыванию энергетического вклада соответствующих мод и составляющие не менее 10 % от максимума. Арабскими цифрами обозначены номера контрольных точек (рис. 3). Римскими цифрами обозначены серии численных экспериментов.

Как видно из табл. 1, в бухте *A* доминируют моды с периодами 45, 36, 20, 15 и 9 мин. Анализ результатов расчетов показал, что в вершине бухты (точки 5, 6) также прослеживается мода с периодом 6,4 мин. Периоды 45, 15 и 9 мин удовлетворительно согласуются с аналитическим решением (6) (табл. 3), и их можно интерпретировать, как периоды собственных колебаний бассейна *A*. Согласно формуле (6) и табл. 3, значение τ , равное 45 мин, соответствует нулевой моде τ_{00} (моде Гельмгольца); значение τ , равное 15 мин, – одноузловой продольной моде τ_{10} ; значение τ , равное 9 мин, – двухузловой продольной моде τ_{20} . Мода τ_{10} , независимо от ширины области возмущения и наличия смежной бухты, доминирует внутри бухты *A*, за исключением входа в бухту (точка 1, рис. 4, *a*), узловой линии этой моды, проходящей через точку 5 (рис. 4, *b*) и открытого моря (точка 18, рис. 4, *d*). Характерная периодограмма, демонстрирующая преобладание моды τ_{10} в бухте *A*, приведена на рис. 4, *c*.

Периоды 36 и 20 мин не являются периодами собственных колебаний бухт *A* и *B* (в которой они также заметно выражены, см. табл. 2). Их можно интерпретировать как стоячие колебания, образующиеся в результате взаимодействия набегающей волны с вертикальной стенкой². Это предположение подтверждается расчетами для случаев, когда береговая черта не имеет бухт. При этом получено, что для всех рассмотренных значений λ в прибрежной зоне выделяются колебания с периодами около 20 и 34 мин.

В бухте *A* колебание уровня моря с периодом 36 мин возникает только в тех случаях, когда не учитывается смежная бухта *B*. Как следует из табл. 1 и рис. 4, *a*, мода со значением τ , равным 20 мин, доминирует как у входа в бухту *A* (точка 1), так и за ее пределами (точки 17–21).

Таким образом, у входа в бухту *A* собственные моды практически не оказывают влияния на колебания уровня моря, что косвенно подтверждает обоснованность часто используемого при моделировании граничного условия $\eta = 0$, предполагающего наличие на входе в бухту узловой линии уровня собственных мод колебаний. Колебания с периодами 20, 36 мин заметно проявляются в окрестности узловой линии одноузловой продольной моды (ее период равен 15 мин), проходящей через точки 5, 8.

Таблица 1
Table 1

Резонансные периоды (мин) в бухте А в порядке убывания энергии колебаний при разных значениях ширины области начального возмущения
Bay A: Resonance periods (min) corresponding to decrease of oscillations' energy at different values of the initial disturbance area width

1			2			3			4			5			6		
Контрольные точки / Control points																	
Серия экспериментов / Series of experiments																	
I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
20	20	15	15	15	20	15	15	15	15	15	15	9	9	9	15	15	15
20	20	15	20	15	15	15	15	15	15	15	15	9	9	45	15	15	15
15	15	15	20	20	15	20	20	9	9	9	9	20	36	36	20	20	9
15	15	15	15	9	20	20	20	20	9	45	45	20	9	9	20	20	45
-	-	-	9	9	9	9	9	9	-	-	20	45	20	20	-	9	20
-	-	-	9	9	9	-	9	9	-	-	9	45	20	20	-	45	20
Контрольные точки / Control points																	
Серия экспериментов / Series of experiments																	
Контрольные точки / Control points																	
Серия экспериментов / Series of experiments																	
I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
15	15	15	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
15	15	15	45	45	45	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	9	20	36	36	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
20	20	20	20	9	9	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
-	9	20	45	20	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	9	9	9	20	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечания:

1. В I серии экспериментов $\lambda = 10$ км, во II – $\lambda = 14$ км, в III – $\lambda = 16$ км.

2. Значения периодов даны в виде дроби, в числителе которой результат расчета без смежной бухты, а в знаменателе – со смежной бухтой.

Note:

1. In the experiment series I $\lambda = 10$ km; in those II and III – 14 and 16 km, respectively.

2. Values of the periods are given in a form of a simple fraction, the numerator represents the result of calculation without the adjacent bay, and the denominator – with the adjacent bay.

Таблица 2
Table 2

Резонансные периоды (мин) в бухте В в порядке убывания энергии колебаний при разных значениях ширины области начального возмущения
Bay B: Resonance periods (min) corresponding to decrease of oscillations' energy at different values of the initial disturbance area width

Контрольные точки / Control points																	
9			10			11			12			13			14		
Серии экспериментов / Series of experiments																	
I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{20}{20}$
$\frac{36}{14}$	$\frac{36}{14}$	$\frac{36}{-}$	$\frac{36}{14}$	$\frac{36}{14}$	$\frac{36}{14}$	$\frac{12}{14}$	$\frac{36}{14}$	$\frac{36}{14}$	$\frac{14}{14}$	$\frac{14}{14}$	$\frac{12}{14}$	$\frac{36}{14}$	$\frac{14}{14}$	$\frac{12}{14}$	$\frac{12}{14}$	$\frac{14}{14}$	$\frac{12}{14}$
-	-	$\frac{12}{-}$	-	-	$\frac{12}{-}$	$\frac{-}{20}$	$\frac{-}{12}$	$\frac{12}{4}$	$\frac{12}{20}$	$\frac{-}{20}$	$\frac{36}{4}$	$\frac{-}{20}$	$\frac{12}{20}$	$\frac{14}{12}$	$\frac{-}{20}$	$\frac{12}{20}$	$\frac{14}{12}$

Примечания: аналогично табл. 1
Note: the same as in Table 1.

Таблица 3
Table 3

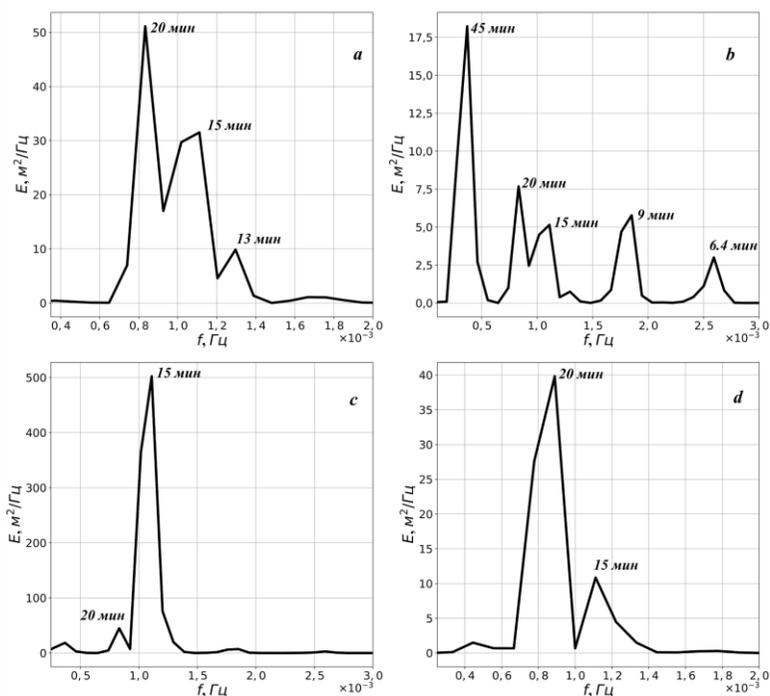
Периоды собственных колебаний бухт А и В, рассчитанные по формуле (6)
Periods of eigen-oscillations in the bays A and B calculated by formula (6)

k	m	$\tau_{km}, \text{МИН} / \tau_{km}, \text{min}$	
		Бухта А / Bay A	Бухта В / Bay B
0	0	43,6	11,7
1	0	14,5	3,9
2	0	8,7	2,3
3	0	6,3	1,7
0	1	3,1	0,7
1	1	3,0	0,7

Сопоставление периодов сейш из табл. 1 и 3 показывает, что увеличение значения λ от 10 до 16 км приводит к расширению модового состава сейш, генерируемых в бухте А. При увеличении λ до 14–16 км в точках 3, 4 начинает проявляться мода с периодом 9 мин, а в точке 6 – либо мода с периодом 9 мин (когда не учитывается смежная бухта), либо мода с периодом 45 мин (когда смежная бухта учитывается).

Как следует из анализа данных табл. 1, бухта В оказывает влияние на волновые процессы в бухте А. Это проявляется в интенсификации моды Гельмгольца в бухте А. Данная мода проявляется в точках 4, 5, 6, удаленных от входа в бухту. При этом энергетический вклад моды Гельмгольца, по сравнению с другими модами, с увеличением ширины области возмущения возрастает. В точке 5 при $\lambda \geq 14$ км мода Гельмгольца становится преобладающей. Можно предположить, что мода Гельмгольца Севастопольской бухты генерируется возмущением, обусловленным подвижкой дна моря. Так цунами, вызванное катастрофическим Ялтинским землетрясением 1927 г., при-

вело к генерации в Севастопольской бухте сейши этой моды с периодом, равным 52 мин, с высотой волны 23 см ⁵.



Р и с. 4. Периодограммы уровня моря для модельной бухты, аппроксимирующей Севастопольскую бухту (ширина области возмущения 10 км) для контрольных точек 1 (a), 5 (b), 6 (c), 18 (d)

Fig. 4. Sea level period-grams for the model bay approximating the Sevastopol Bay (width of the disturbance area is 10 km) for the control points 1 (a), 5 (b), 6 (c), 18 (d)

Анализ виртуальных мареограмм показал, что наличие смежной бухты увеличивает максимальный подъем уровня на 5–10 % в зависимости от ширины области возмущения. Наибольшие различия в высотах подъема уровня отмечались при значениях λ , равных 10 и 16 км.

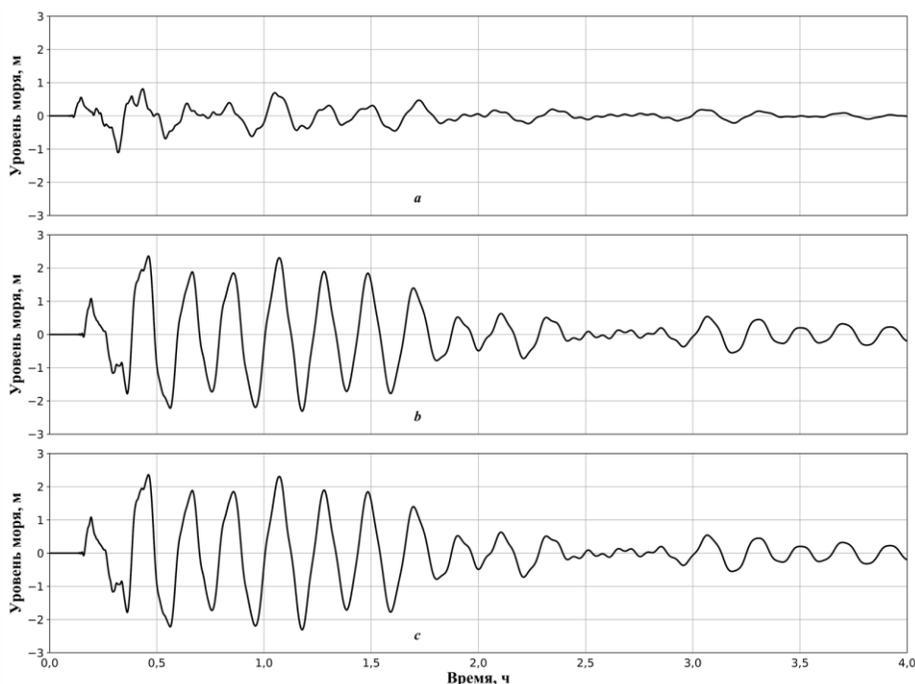
Перейдем к рассмотрению резонансного отклика бухты B на начальное возмущение вида (4). Анализ данных табл. 2 показывает, что в бухте генерируются моды, имеющие периоды 36, 20, 14, 12, 4 мин. Сопоставление значений этих периодов с приведенными в табл. 3 значениями собственных периодов бухты показывает, что сейшами, обусловленными собственными колебаниями бухты B , являются моды с периодами 12 мин (мода Гельмгольца) и 4 мин (одноузловая продольная мода). Колебания с периодами 36 и 20 мин, выделенные в бухте B , вызваны проникновением в нее стоячих колебаний, возникающих у вертикальной стенки. Наиболее интенсивными из мод, генерируемых в бухте B , являются моды с периодами 20 и 12 мин.

⁵ Доценко С. Ф., Иванов В. А. Природные катастрофы в Азово-Черноморском регионе. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 175 с.

Бухта *A* оказывает существенное влияние на волновые процессы в бухте *B*. Она интенсифицирует в ней моду Гельмгольца, а также существенно ослабляет колебание с периодом 36 мин, которое при наличии смежной бухты не проявляется в бухте *B*. Как видно из табл. 2, в случае учета смежной бухты мода Гельмгольца бухты *B* преобладает над остальными модами в кутовой части бухты *B* (точки 12–14), когда λ равна 10 и 14 км. Увеличение ширины области начального возмущения до 16 км приводит к тому, что в бухте *B* начинает преобладать колебание с периодом 20 мин (стоячая волна, возникающая при взаимодействии набегающей волны с вертикальной стенкой). При этом интенсифицируется мода с периодом 4 мин.

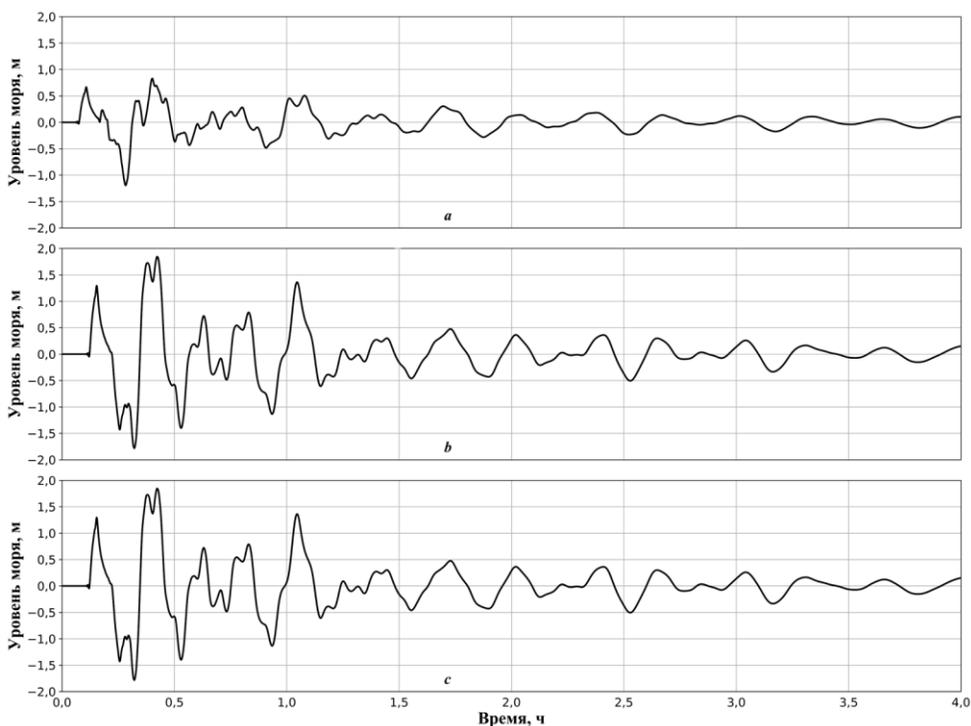
Дополнительно был проведен численный эксперимент для случая, когда значение τ , равное 11,7 мин ($\lambda = 12,036$ км), в формуле (5) в точности совпало с периодом моды Гельмгольца бухты *B*. При этом рассматривалась только одна бухта *B*.

На рис. 5 показаны виртуальные мареограммы уровня моря в бухте *B*, когда ширина области возмущения равна 12 км ($\tau = 11,66$ мин) для точек 10 (рис. 5, *a*), 14 (рис. 5, *b*), 16 (рис. 5, *c*). А на рис. 6 – виртуальные мареограммы уровня моря в бухте *B*, когда ширина области возмущения составляет 12,036 км ($\tau = 11,7$ мин) для точек: 10 (рис. 6, *a*), 14 (рис. 6, *b*), 16 (рис. 6, *c*). На входе в бухту (точка 10) амплитуда волны начального возмущения составляет около 0,5 м (рис. 5, *a*; 6, *a*).



Р и с. 5. Виртуальные мареограммы уровня моря в бухте *B* (ширина области возмущения 12 км, $\tau = 11,66$ мин) для контрольных точек 10 (*a*), 14 (*b*), 16 (*c*)

F i g. 5. Virtual marigrams of the sea level in bay *B* (width of the disturbance area is 12 km, $\tau = 11.66$ min) for the control points 10 (*a*), 14 (*b*), 16 (*c*)



Р и с. 6. Виртуальные мареграммы уровня моря в бухте *B*, ширина области возмущения 12,036 км ($\tau = 11,7$ min) для контрольных точек 10 (*a*), 14 (*b*), 16 (*c*)

F i g. 6. Virtual marigrams of the sea level in bay *B*, width of the disturbance area is 12.036 km ($\tau = 11.7$ min) for the control points 10 (*a*), 14 (*b*), 16 (*c*)

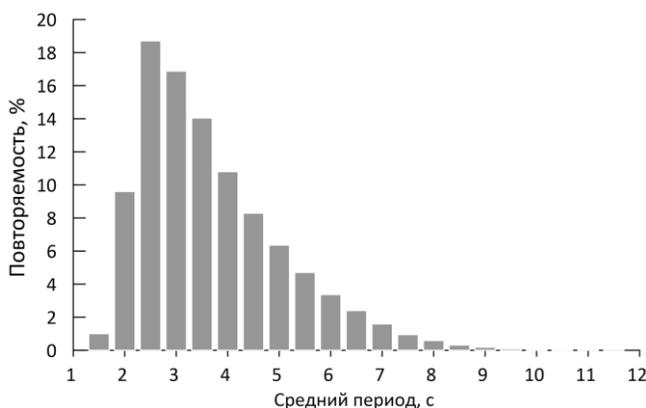
Анализ рисунков 5, 6 показывает, что отклик бухты на возмущение типа (4) очень сильно зависит от ширины области возмущения (периода волны τ). Так, даже если периоды возмущений различаются на 6 с, то волновые картины заметно отличаются. Во-первых, при $\tau = 11,7$ мин в бухте генерируется сейша, амплитуда которой в точках 14, 16 составляет около 3 м (рис. 6, *b, c*). Если $\tau = 11,66$ мин, то амплитуда сейши в указанных точках не превышает 2 м (рис. 5, *b, c*). Во-вторых, в случае резонанса уровень совершает в течение часа четыре колебания со значительной (не менее 2 м) амплитудой (рис. 6, *b, c*). Если $\tau = 11,66$ мин, то имеет место только одно возвышение уровня с амплитудой более 1,5 м (рис. 5, *b, c*).

Анализ результатов расчетов показал, что максимальная амплитуда сейш при ширине области начального возмущения, равной 10 км ($\tau = 10$ мин), 14 км ($\tau = 13,61$ мин) и 16 км ($\tau = 15,55$ мин), составляет около 2 м. Таким образом, волна цунами с периодом 11,7 мин представляет потенциальную опасность для бухты *B*, так как амплитуда генерируемой им сейши будет превышать в 1,5 раза амплитуды сейш для всех других рассмотренных здесь значений начальной ширины области возмущения. При этом колебания уровня с такой высокой амплитудой будут повторяться не менее четырех раз.

Оценка параметров инфрагравитационных волн для прибрежной зоны Севастополя. В спектре собственных колебаний бухты B присутствуют моды с периодами $\tau_{km} < 180$ с. Моды с такими периодами могут возбуждаться инфрагравитационными волнами, вызванными нелинейным взаимодействием ветровых волн. Средний период инфрагравитационных волн τ_{IG} оценивается по формуле из работы [13, с. 32] $\tau_{IG} = 20\bar{\tau} - 50$, где $\bar{\tau}$ – средний период ветровых волн.

Представляет интерес выяснить, существует ли потенциальная возможность генерации инфрагравитационными волнами короткопериодных сейш в бухте, имеющих характерные размеры бухты B . Для этой цели были привлечены результаты численного моделирования ветрового волнения в Черном море с помощью модели *SWAN* [14] и данных атмосферного реанализа *ERA-Interim* за 1979–2017 гг.

Как видно из табл. 3, для бухты B выделяются следующие периоды сейшевых колебаний: $\tau_{01} = \tau_{11} = 42$ с; $\tau_{30} = 102$ с; $\tau_{20} = 138$ с. Значениям τ_{IG} , равным τ_{km} , соответствуют $\bar{\tau}$, равные $\bar{\tau}_1 = 4,5$ с, $\bar{\tau}_2 = 7,5$ с и $\bar{\tau}_3 = 9,5$ с.



Р и с. 7. Повторяемость (%) среднего периода ветрового волнения в прибрежной зоне Севастополя по результатам численного моделирования за 1979–2017 гг.

F i g. 7. Repeatability (%) of the wind wave average period in the Sevastopol coastal zone based on the results of numerical modeling for 1979–2017

На рис. 7 приведена гистограмма повторяемости (%) величины $\bar{\tau}$ в точке, расположенной на взморье Севастополя на глубине 25 м. На гистограмме видно, что максимальная повторяемость 8,3 % соответствует периоду $\bar{\tau}_1$. Повторяемость периодов $\bar{\tau}_2$ и $\bar{\tau}_3$ соответственно равна 1,0 и 0,1 %. Таким образом, с теоретической точки зрения короткопериодные сейши в севастопольских бухтах могут генерироваться инфрагравитационными волнами.

Заключение

На основе численного моделирования исследован резонансный отклик системы двух смежных бухт (бухты A и B) прямоугольной формы, имеющих размеры и глубину Севастопольской и Карантинной бухт соответственно, на

начальное возмущение свободной поверхности, вызванное подвижкой дна моря.

Показано, что в бухте *A* генерируются четыре старших моды собственных колебаний с периодами 45, 15, 9, 6 мин, а в бухте *B* – две старшие моды с периодами около 12 и 4 мин. В обеих бухтах проявляется колебание с периодом около 20 мин, являющееся стоячей волной, вызванной взаимодействием начального возмущения с вертикальной стенкой. Колебание наиболее интенсивно в областях, примыкающих ко входам в бухты.

При наличии смежной бухты происходит интенсификация моды Гельмгольца в обеих смежных бухтах. При этом растет амплитуда колебаний на 5–10 % в зависимости от ширины области возмущения. Расширение области начального возмущения увеличивает модовый состав сейш, генерируемых в бухте *A*, а в бухте *B* интенсифицируются колебания с периодом 20 мин.

Волновые возмущения с периодом 11,7 мин представляют потенциальную опасность для бухты *B*, так как в этом случае имеет место резонанс с нулевой модой бухты, имеющей такой же период. При этом амплитуда генерируемой сейши превышает в 1,5 раза амплитуды сейш для всех других рассмотренных здесь значений начальной ширины области возмущения.

На основе аналитической зависимости между периодами инфрагравитационных волн и средними периодами ветровых волн в Севастопольском регионе (полученными по данным ретроспективного анализа волнения) выявлена теоретическая возможность генерации в обеих бухтах короткопериодных сейш инфрагравитационными волнами.

Проведенные численные расчеты показали применимость модели *ADCIRC* для исследования резонансных свойств на примере модельных бухт (при этом она хорошо описывает случай резонанса), что в дальнейшем позволит использовать ее для исследования резонансных свойств реальной конфигурации севастопольских бухт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Numerical study of transient harbor resonance induced by solitary waves / J. Gao [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2016. Vol. 230, iss. 1. P. 163–176. <https://doi.org/10.1177/1475090214557845>
- 2 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, вып. 4–1. С. 1377–1382.
- 3 Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов / В. Н. Еремеев [и др.] // Океанология. 2000. Т. 40, № 5. С. 658–665.
- 4 Доценко С. Ф., Миклашевская Н. А. Генерация сейш при перемещении барических образований // Морской гидрофизический журнал. 2007. № 6. С. 3–15.
- 5 Демьшев С. Г., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Анализ влияния постоянного ветра на скорость течений и сейшевые колебания уровня Азовского моря // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 46–54.
- 6 Фомин В. В., Лазоренко Д. И., Иванча Е. В. Численное моделирование сейш в Балаклавской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь : МГИ, 2017. Вып. 3. С. 32–39.

7. Резонансные колебания в заливах и бухтах: натурные эксперименты и численное моделирование / Г. В. Шевченко [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. 2010. № 1(80). С. 52–62.
8. *Luetlich 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. Vicksburg, MS : U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1992. 137 p. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA261608 (date of access: 23.01.2019).
9. *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. № 4. P. 79–89. doi:10.22449/1573-160X-2017-4-79-89
10. Численное моделирование распространения черноморских и азовоморских цунами через Керченский пролив / Л. И. Лобковский [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 2. С. 111–122. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-111-122
11. *Wells D. L., Coppersmith K. J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. Vol. 84, no. 4. P. 974–1002. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/84/4/974/119792/new-empirical-relationships-among-magnitude?redirectedFrom=fulltext> (date of access: 23.01.2019).
12. *Манилюк Ю. В., Фомин В. В.* Сейшевые колебания в частично замкнутом бассейне // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2017. № 3. С. 73–83.
13. *Ковалев Д. П., Ковалев П. Д.* Изучение особенностей генерации инфрагравитационных и краевых волн в прибрежной зоне по данным натурных экспериментов. Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН : АНОО ВО СахГТИ, 2018. 111 с.
14. *Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H.* A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C4. P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>

Об авторах:

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

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

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