

УДК 532.59; 551.46

## СЕЙШИ В БАССЕЙНЕ С ОТКРЫТЫМ ВХОДОМ

В. А. Иванов, Ю. В. Манилюк, В. Ф. Санников

Морской гидрофизический институт РАН, 299011 Севастополь, Россия

E-mails: vaivanov@inbox.ru, uvmsev@yandex.ru; vf\_sannikov@mail.ru

В рамках линейной теории длинных волн рассматриваются двумерные сейшевые колебания в прямоугольном бассейне постоянной глубины с открытым входом. Получено аналитическое решение для случая, когда на входе в бассейн расположена узловая линия уровня. Показано, что поперечные сейши в бассейне с открытым входом являются двумерными в отличие от аналогичных мод в полностью замкнутом бассейне, являющихся одномерными. Проведен расчет параметров сейш для модельных бассейнов, имеющих размеры и глубину, характерные для ряда севастопольских бухт. Проведено сравнение результатов расчетов с данными натурных наблюдений и показано, что они удовлетворительно согласуются.

**Ключевые слова:** сейши в бухте, свободные волны, длинные волны, волновые течения, бассейн с открытым входом, аналитические решения, мода Гельмгольца, бухты Севастополя.

DOI: 10.15372/PMTF20180404

**Введение.** Сейши являются одним из наиболее распространенных видов движения жидкости в ограниченных водоемах и вносят существенный вклад в формирование их гидрологических режимов. Большой класс водоемов образуют бассейны с открытым входом (бухты, лагуны, эстуарии, гавани, губы и другие), соединяющиеся с основным бассейном. На побережье таких водоемов часто располагаются населенные пункты, промышленные предприятия, во многих бухтах обустраиваются порты, осуществляется интенсивное судоходство. Сейши в бухте могут быть причиной такого явления, как тягун [1]. При этом имеют место сильные возвратно-поступательные движения воды, приводящие к ударам судов о причалы или друг о друга, обрыву швартовых, затруднению или полному прекращению погрузо-разгрузочных операций [1]. Сейши в бухтах исследуются более 100 лет. В работах [1, 2] приведены формулы для расчета периодов сейш в бухтах простой формы для случаев, когда движение зависит от одной пространственной координаты. В [3] рассматриваются продольные сейши в канале, открытом с одной стороны, приведена формула для расчета отклонения свободной поверхности для случая, когда движение жидкости зависит от одной пространственной переменной. В работе [4] исследуется влияние геометрических характеристик залива на сейши в ограниченном бассейне. В [5] приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований резонансных колебаний уровня моря в портах Сахалинской области. В работе [6] рассматриваются сейшевые колебания в прямоугольном канале с резко меняющимся поперечным сечением. Показано, что одномерная модель позволяет удовлетворительно описать частоты сейшевых колебаний, однако данные о положении узловых точек сейшевых колебаний, полученные с ее

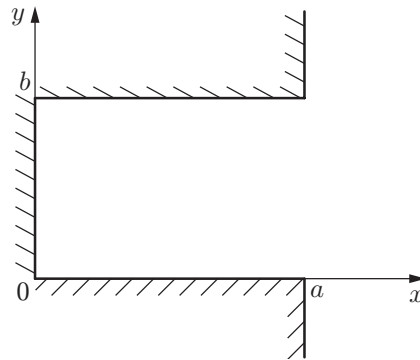


Рис. 1. Схема бассейна

использованием, отличаются от данных, полученных с помощью двумерной модели, и экспериментальных данных. Зависимости амплитуд колебаний от продольной координаты, рассчитанные по одномерной и двумерной моделям, также различаются. Поэтому представляет интерес найти аналитическое решение двумерной задачи и использовать его для анализа сейш.

Целями настоящей работы являются аналитическое решение задачи о сейшах в прямоугольном бассейне постоянной глубины с одним входом и сравнение результатов модельных расчетов с данными натуральных наблюдений.

**1. Постановка задачи и ее аналитическое решение.** В линейном приближении рассматриваются свободные колебания однородной невязкой жидкости в бассейне, имеющем одну свободную границу. Полагается, что волны имеют большую длину, атмосферное давление над акваторией бассейна является постоянным и влиянием вращения Земли можно пренебречь. В такой постановке движения жидкости описываются системой уравнений длинных волн [7]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial (hu)}{\partial x} - \frac{\partial (hv)}{\partial y}. \quad (1)$$

Здесь  $x, y$  — продольная и поперечная горизонтальные координаты;  $u, v$  — продольная и поперечная горизонтальные компоненты вектора скорости движения жидкости;  $\zeta$  — смещение свободной поверхности;  $h$  — глубина бассейна;  $t$  — время;  $g$  — ускорение свободного падения.

На твердых боковых границах бассейна должно выполняться условие непротекания

$$n_x u + n_y v = 0, \quad (2)$$

где  $n_x, n_y$  — направляющие косинусы внешней нормали  $n$  к береговой линии. На открытой границе бассейна  $\Gamma$  задается приближенное условие

$$\zeta(x, y, t)|_{\Gamma} = 0, \quad (3)$$

означающее, что узловые линии для всех мод свободных колебаний жидкости в рассматриваемом бассейне совпадают с границей  $\Gamma$ .

Рассмотрим бассейн прямоугольной формы с постоянной глубиной  $h$ , длиной  $a$  и шириной  $b$  (ширина входа равна ширине бассейна) (рис. 1). Для такого бассейна граничные условия (2), (3) запишем в виде

$$u(0, y, t) = 0, \quad v(x, 0, t) = 0, \quad v(x, b, t) = 0, \quad \zeta(a, y, t) = 0. \quad (4)$$

Найдем периодические по времени решения системы (1):

$$(u(x, y, t), v(x, y, t), \zeta(x, y, t)) = \text{Re}((u_1(x, y), v_1(x, y), \zeta_1(x, y)) e^{i\sigma t}), \quad (5)$$

где  $\sigma$  — частота колебаний жидкости;  $i$  — мнимая единица.

Подставляя (5) в (1), получаем систему

$$u_1 = \frac{ig}{\sigma} \frac{\partial \zeta_1}{\partial x}, \quad v_1 = \frac{ig}{\sigma} \frac{\partial \zeta_1}{\partial y}, \quad \frac{\partial^2 \zeta_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta_1}{\partial y^2} + \lambda \zeta_1 = 0, \quad (6)$$

где  $\lambda = \sigma^2/(gh)$  ( $\sqrt{\lambda}$  — волновое число). Граничные условия (4) для уравнений (6) преобразуем к виду

$$\frac{\partial \zeta_1(0, y)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \zeta_1(x, 0)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \zeta_1(x, b)}{\partial y} = 0, \quad \zeta_1(a, y) = 0. \quad (7)$$

Задача (6), (7) допускает разделение переменных и применение метода Фурье [8]. Соответствующие собственные функции  $\zeta_{km}(x, y, t)$  и собственные значения  $\lambda_{km}$  для уравнений (1) с граничными условиями (4) имеют вид

$$\zeta_{km}(x, y, t) = Z_{km} \cos \frac{(1+2k)\pi x}{2a} \cos \frac{m\pi y}{b} \cos \sigma_{km} t, \quad \lambda_{km} = \left( \frac{1+2k}{2a} \pi \right)^2 + \left( \frac{m}{b} \pi \right)^2, \quad (8)$$

где  $k, m$  — целые неотрицательные числа;  $Z_{km}$  — амплитуда начального отклонения свободной поверхности. Собственные периоды определяются по формулам

$$\tau_{km} = \frac{2\pi}{\sigma_{km}} = \frac{2\pi}{\sqrt{gh\lambda_{km}}} = \frac{4ab}{\sqrt{gh} \sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}}. \quad (9)$$

С учетом (5), (6), (8) запишем формулы для вычисления составляющих скорости движения жидкости:

$$u_{km}(x, y, t) = U_{km} \sin [(1+2k)\pi x/(2a)] \cos (m\pi y/b) \sin (\sigma_{km} t); \quad (10)$$

$$v_{km}(x, y, t) = V_{km} \cos [(1+2k)\pi x/(2a)] \sin (m\pi y/b) \sin (\sigma_{km} t); \quad (11)$$

$$U_{km} = \frac{g}{\sigma_{km}} \frac{(2k+1)\pi}{2a} Z_{km}, \quad V_{km} = \frac{g}{\sigma_{km}} \frac{m\pi}{b} Z_{km}. \quad (12)$$

Следует отметить, что собственные значения могут быть кратными, например, при  $a = 2b$  собственное значение  $\lambda = 25(\pi/(2a))^2$  имеет кратность, равную двум, так как  $\lambda_{11} = \lambda_{20}$ .

Узловые линии простейших мод (8) параллельны границам бассейна. Кратным собственным значениям соответствуют линейные комбинации простейших мод. При этом распределение линий уровня может быть более сложным (рис. 2).

Заметим, что в случае если имеются кратные собственные значения  $\lambda_{km}$ , значение выражения  $(2a/b)^2$  является рациональным числом. Поэтому в приложениях такой случай можно считать исключительным.

**2. Свойства сейшевых колебаний в бассейне с открытой границей.** Исследуем периоды сейш. Из формулы (9) следует, что периоды продольных мод ( $k \neq 0, m = 0$ ) не зависят от ширины бассейна  $b$  и прямо пропорциональны его длине  $a$ . Такая же закономерность имеет место в полностью замкнутом бассейне [9]. Особенностью сейшевых колебаний в бассейне с открытой границей является отсутствие “чистых” поперечных сейш ( $k = 0, m \neq 0$ ), параметры которых не зависят от длины  $a$ , как в случае полностью замкнутого бассейна [9]. Все моды сейшевых колебаний в бассейне с открытым входом, для которых  $m \neq 0$ , являются продольно-поперечными и их периоды зависят от ширины и длины бассейна. При  $k = 0, m = 0$  в колебаниях в бассейне с открытым входом имеется мода Гельмгольца, отсутствующая в полностью замкнутом бассейне.

Разделив выражение, определяющее периоды сейш  $\tau_{km}^*$  в полностью замкнутом бассейне [1], на выражение (9), получаем

$$\frac{\tau_{km}^*}{\tau_{km}} = \frac{\sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}}{\sqrt{(2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}} = \sqrt{1 + \frac{(1+4k)b^2}{4k^2 b^2 + 4m^2 a^2}}. \quad (13)$$

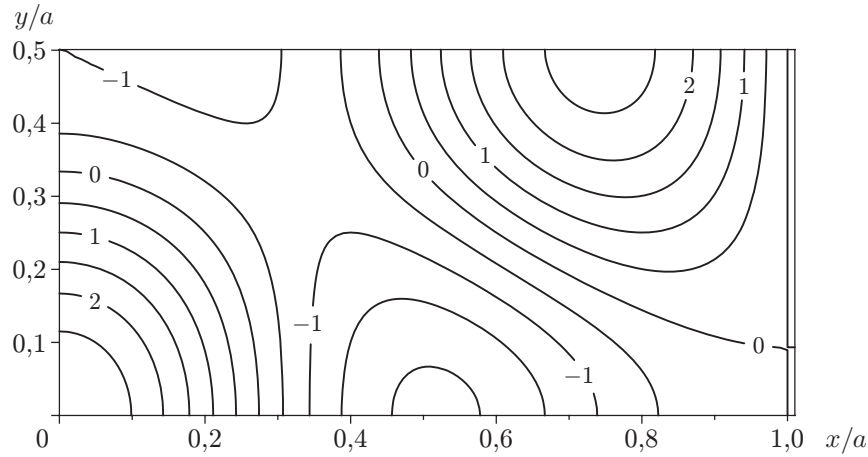


Рис. 2. Изолинии уровня  $2\zeta_{11} + \zeta_{20}$  при  $a = 2b$ ,  $Z_{11} = Z_{20} = 1$  м

При этом исключим из рассмотрения моду Гельмгольца, не существующую в полностью замкнутом бассейне. Из соотношения (13) следует, что периоды мод сейшевых колебаний в прямоугольном бассейне с открытым входом меньше периодов мод с соответствующими значениями индексов  $k, m$  в полностью замкнутом бассейне таких же размеров и глубины.

Исследуем профили свободной поверхности для сейш различного вида. Профили свободной поверхности жидкости для первых нескольких мод продольных сейш в бассейне с открытой границей представлены в работе [1]. Изолинии уровня для сейш данного вида всегда параллельны оси  $y$ , однако в отличие от полностью замкнутого бассейна узловые линии сдвигаются в направлении кутовой части бассейна (влево параллельно оси  $x$  (см. рис. 1)).

На рис. 3 представлены изолинии уровня для мод  $(k = 0, m = 1)$  и  $(k = 0, m = 2)$ , рассчитанные для модельного бассейна, аппроксимирующего бухту Круглая, расположенную в окрестностях Севастополя. Линии уровня ортогональны твердым границам (см. рис. 1) и коллинеарны открытой границе. В случае полностью замкнутого бассейна изолинии уровня для данных мод параллельны оси  $x$ .

Рассмотрим скорости сейшевых течений. Для продольных сейш  $(k \neq 0, m = 0)$  из формулы (11) следует, что  $v_{km}(x, y) = 0$  для всех допустимых значений  $k$  и волновые

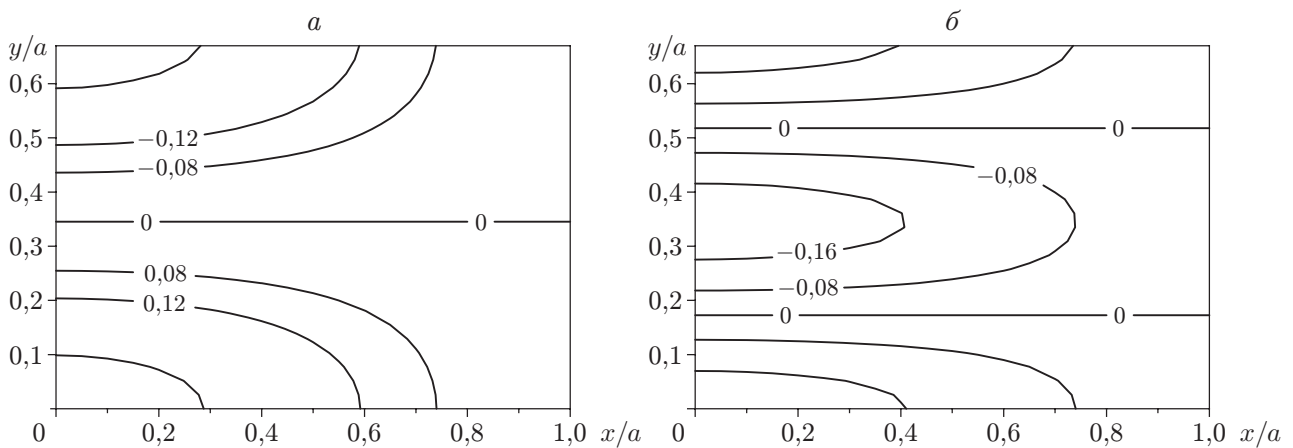


Рис. 3. Изолинии уровня при  $Z_{01} = Z_{02} = 0,2$  м для различных мод:  
 а — мода  $(k = 0, m = 1)$ , б — мода  $(k = 0, m = 2)$

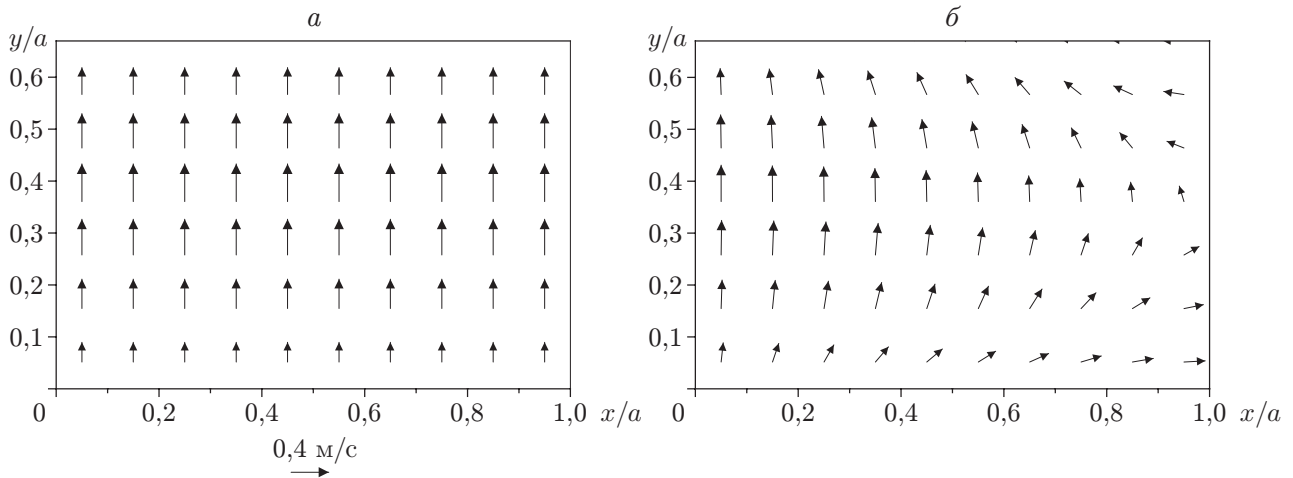


Рис. 4. Векторные поля волновых скоростей сейш для моды ( $k = 0, m = 1$ ) при  $Z_{01} = Z_{02} = 0,2$  м:  
 а — замкнутый бассейн,  $t = \tau_{01}^*/2$ , б — бассейн с открытым входом,  $t = \tau_{01}/2$

течения параллельны оси  $x$ . Используя выражения (9), (10), (12), находим амплитуду продольной составляющей скорости волнового течения  $u$ :

$$U_{k0} = Z_{k0} \sqrt{g/h}. \quad (14)$$

Максимальная скорость волнового течения в случае продольных сейш не зависит от ширины и длины как открытого бассейна, так и замкнутого [9].

Для продольно-поперечных сейш ( $m \neq 0$ ) из выражений (9)–(12) следует, что амплитуды составляющих скорости  $u$  и  $v$  зависят от параметров  $a, b, h$ . Для сейш данного вида значение модуля скорости волновых течений не превышает значения  $\max \{U_{km}, V_{km}\}$ .

В замкнутом бассейне [9] и в бассейне с открытым входом поля волновых скоростей наиболее различаются в области открытой границы (рис. 4), где волновые течения в бассейне с открытым входом являются двумерными и достигают максимальной интенсивности.

В случае бассейна с открытым входом низшая мода ( $k = 0, m = 0$ ) является модой Гельмгольца [1]. В замкнутом бассейне такая мода отсутствует. Для данной моды амплитуда составляющей скорости  $U_{00}$  определяется формулой (14), а  $V_{00} = 0$ . Волновое течение для моды Гельмгольца направлено параллельно оси  $x$ , максимальная скорость течения не зависит от ширины и длины бассейна. Наибольших значений скорость течения достигает на открытой границе бассейна.

Для бассейнов рассмотренных видов максимальная скорость волновых течений сейш обратно пропорциональна  $\sqrt{h}$ .

**3. Сейши в бухтах Севастополя.** В настоящее время сейши в севастопольских бухтах изучены недостаточно; количество работ, посвященных их исследованию, невелико. В работе [10] на основе анализа оцифрованных с дискретностью 5 мин данных наблюдений за уровнем за период апрель 2001 г. — сентябрь 2002 г. установлено, что в Севастопольской бухте выделяются сейшевые колебания с периодами  $\tau = 150, 75, 50$  мин, при этом энергия последних наиболее значительна. В [11] с использованием метода конечных элементов вычислены периоды первых шести мод сейшевых колебаний в Севастопольской бухте: 50,0; 22,0; 14,7; 12,0; 9,5; 7,9 мин.

Результаты расчетов по формуле (9) периодов старших мод сейш в бухтах Севастопольского региона с использованием морфометрических характеристик [12] представлены в таблице.

Периоды сейш для бухт Севастополя, вычисленные по формуле (9)

Мода		$\tau_{km}$ , мин		
$k$	$m$	Севастопольская бухта ( $a = 7$ км, $b = 1,0$ км, $h = 11,7$ м)	Южная бухта ( $a = 2,4$ км, $b = 0,39$ км, $h = 11,8$ м)	Бухта Круглая ( $a = 1,2$ км, $b = 0,80$ км, $h = 2,5$ м)
0	0	43,6	14,9	16,2
1	0	14,5	5,0	5,4
2	0	8,7	3,0	3,2
3	0	6,2	2,1	3,1
0	1	3,1	1,2	5,1
1	1	3,0	1,2	3,8

Наиболее близким к наблюдаемому периоду  $\tau = 50$  мин является расчетный период  $\tau_{km} = 43,6$  мин, который на 12,8 % меньше наблюдаемого. Возможно, это обусловлено тем, что в расчетах использовался идеализированный профиль береговой черты (не рассматривалась Южная бухта). Данное предположение основано на результатах работы [4], в которой показано, что при наличии залива (в рассматриваемом случае — Южной бухты) период сейшевых колебаний в бассейне увеличивается (по сравнению с бассейном без залива). При этом наибольшее влияние наличие залива оказывает на длительность периодов старших мод сейш. Заметим, что период  $\tau_{km} = 50$  мин, полученный численно в [11], совпадает с данными наблюдений. Значения периодов остальных мод сейшевых колебаний в Севастопольской бухте, полученные теоретически, не превышают значения  $\tau_{km} = 14,5$  мин. В работе [10] эти периоды не выявлены вследствие большой дискретности данных наблюдений. Следовательно, для обнаружения высокочастотных мод сейш Севастопольской бухты измерения необходимо выполнять с меньшей дискретностью. Заметим, что периоды  $\tau = 150, 75$  мин, полученные в [10], значительно больше периодов, приведенных в таблице и в работе [11]. Вероятно, это периоды мод сейшевых колебаний в Черном море в целом. Данное предположение согласуется с результатами работы [13], в которой проведен расчет параметров сейшевых колебаний в Черном море с помощью метода конечных элементов. В частности, в [13] показано, что в окрестностях Севастополя наибольшую амплитуду (20 % максимальной амплитуды для моря в целом) должна иметь восьмая мода с периодом 2,9 ч. Меньшие моды сейш Черного моря в районе Севастополя имеют амплитуды, не превышающие 6 % максимального значения, и не фиксируются при обработке данных наблюдений.

Наблюдения за уровнем моря в Севастопольской бухте с помощью мареографа ведутся в одном месте — на морской гидрометеорологической станции, расположенной на мысе Павловский [10]. Сейша с периодом  $\tau = 50$  мин и амплитудой  $3 \div 4$  см наблюдается практически постоянно. В окрестности поста максимальные амплитуды колебаний уровня, связанных с сейшевыми колебаниями, составляют  $5 \div 12$  см.

Аналитическое решение позволяет получить оценки максимальных амплитуд колебаний уровня в бассейне и скоростей сейшевых течений по результатам наблюдений за уровнем в одной точке для мод сейшевых колебаний, однозначно идентифицируемых по их периоду. В частности, это относится к моде Гельмгольца, которая имеет период, значительно превышающий периоды остальных мод. Также однозначно можно идентифицировать некоторые другие моды, определяемые особенностями конкретного бассейна. Например, для Севастопольской бухты это одноузловая продольная ( $k = 1, m = 0$ ) и двухузловая продольная ( $k = 2, m = 0$ ) сейши, периоды которых значительно отличаются от периодов других мод (см. таблицу).

Оценим интенсивность сейш моды Гельмгольца. Из таблицы следует, что к наблюдаемому периоду длительностью  $\tau = 50$  мин наиболее близок рассчитанный период  $\tau_{km} = 43,6$  мин, соответствующий моде Гельмгольца ( $k = 0, m = 0$ ). Из выражения (8) получаем формулу для вычисления амплитуды сейши данной моды

$$Z_{00} = A_{00} \cos^{-1}(\pi x_{ob}/(2a)),$$

где  $A_{00}$  — амплитуда колебаний уровня в точке с абсциссой  $x_{ob}$ , зафиксированная в результате наблюдений. Поскольку для гидрометеорологической станции на мысе Павловский, на которой измеряется уровень,  $x_{ob} \approx 2a/3$ ,  $Z_{00} \approx 2A_{00}$ . С учетом этого и данных наблюдений [10], согласно которым  $A_{00} \in [5; 12]$  см, получаем оценку максимальных амплитуд колебаний уровня для сейши с периодом  $\tau = 50$  мин в Севастопольской бухте:  $Z_{00} \in [10; 24]$  см.

Амплитуды скоростей сейшевых течений для моды Гельмгольца оценим по формуле (14). Средняя глубина Севастопольской бухты равна 11,7 м, поэтому для амплитуд колебаний уровня  $3 \div 4$  см, наблюдаемых в районе поста наиболее часто, скорость течения составляет  $5,5 \div 7,3$  см/с, а для максимальных наблюдаемых амплитуд, равных  $5 \div 12$  см, скорость течения равна  $9,2 \div 22,0$  см/с.

Регулярные наблюдения за скоростями течений в Севастопольской бухте не ведутся. В июне 2008 г. Морским гидрофизическим институтом НАНУ была проведена экспедиция с целью измерения параметров течений в Севастопольской бухте [14]. При этом выявлено, что на выходе из бухты скорости течений составляют приблизительно 8 см/с. Также зафиксированы колебания скоростей течений, вызванных сейшами с характерной длиной, равной 3,3 км (порядка половины длины бухты). Кроме того, зарегистрированы волны с длинами порядка 3,80 и 2,88 км. Такие длины волн соответствуют одноузловой продольной сейше и двухузловой продольной сейше.

В работе [15] приведены результаты численного моделирования течений в Севастопольской бухте, вызванных воздействием ветра. Отмечено, что после прекращения ветрового воздействия может существовать достаточно интенсивная остаточная циркуляция со скоростями течений, достигающими  $10 \div 12$  см/с. Этот результат хорошо согласуется со значениями скоростей течений, полученными выше.

Работы, посвященные анализу данных натурных наблюдений за колебаниями уровня и течений в Южной бухте и бухте Круглая Севастополя, авторам не известны.

Результаты расчетов показывают, что сейшевые колебания в севастопольских бухтах сопровождаются интенсивными течениями. Так, при амплитуде колебаний 20 см в Севастопольской и Южной бухтах возможны течения со скоростями до 18 см/с, а в бухте Круглая — до 40 см/с.

**Закключение.** На основе полученного аналитического решения в линейном приближении проведено исследование сейшевых колебаний в прямоугольном бассейне постоянной глубины с открытым входом. Показано, что в бассейне данного типа все моды сейшевых колебаний за исключением продольных имеют двумерный характер. Установлено, что собственные значения рассмотренной задачи могут быть кратными. Соответствующие им сейшевые колебания представляют собой суперпозицию простейших мод, имеющую сложное распределение линий уровня. Получены оценки скоростей волновых течений в зависимости от амплитуды начальных отклонений свободной поверхности и геометрических параметров бассейна. Проведено сравнение сейшевых колебаний в полностью замкнутом бассейне и в бассейне с открытой границей, установлены их различия и сходства. Результаты расчета скоростей волновых течений с использованием данных наблюдений за уровнем на гидрометеорологическом посту на мысе Павловский в Севастопольской бухте показывают, что при амплитудах колебаний уровня в окрестности поста  $5 \div 12$  см максимальные скорости волнового течения для моды Гельмгольца составляют  $9,2 \div 22,0$  см/с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Rabinovich A. B.** Seiches and harbor oscillations. Chap. 9 // Handbook of coastal and ocean engineering / Ed. by Y. C. Kim. Singapoure: World Sci. Publ., 2009. P. 193–236.
2. **Рабинович А. Б.** Длинные гравитационные волны в океане. СПб.: Гидрометеиздат, 1993.
3. **Ле Блон П.** Волны в океане: В 2 т. / П. Ле Блон, Л. Майсек. М.: Мир, 1981. Т. 1.
4. **Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V.** The influence of the gulf's geometry on seiche oscillations in an enclosed basin // Phys. Oceanography. 1997. V. 8, iss. 4. P. 217–227.
5. **Ковалев Д. П.** Натурные эксперименты и мониторинг инфрагравитационных волн для диагностики опасных морских явлений в прибрежной зоне на примере акваторий Сахалино-Курильского региона: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск, 2015.
6. **Букреев В. И., Стурова И. В., Чеботников А. В.** Сейшевые колебания в прямоугольном канале с резким расширением поперечного сечения // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 4. С. 22–32.
7. **Сретенский Л. Н.** Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977.
8. **Владимиров В. С.** Уравнения математической физики. М.: Наука, 1981.
9. **Maniliuk Yu. V., Cherkesov L. V.** Investigation of free liquid oscillations in a bounded basin representing an approximate model of the sea of Azov // Phys. Oceanography. 2016. V. 2. P. 14–23.
10. **Горячкин Ю. Н., Иванов В. А., Репетин Л. Н., Хмара Т. Н.** Сейши в Севастопольской бухте // Тр. Укр. науч.-исслед. гидрометеорол. ин-та. 2002. Вып. 250. С. 342–353.
11. **Чехов В. Н., Лушников В. Ф.** К оценкам сейш в бухтах Крыма методом конечных элементов // Динам. системы. 2015. Т. 5, № 1–3. С. 93–102.
12. **Стокозов Н. А.** Морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт // Экол. безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. Вып. 23. С. 198–208.
13. **Иванов В. А., Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В.** О сейсах Черного моря // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 57–63.
14. **Морозов А. Н., Лемешко Е. М., Шутов С. А., Зима В. В.** Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений (июнь 2008) // Мор. гидрофиз. журн. 2012. № 3. С. 31–43.
15. **Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.** Моделирование циркуляции и пространственной структуры термохалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных (зима 1997) // Мор. гидрофиз. журн. 2005. № 2. С. 60–76.

*Поступила в редакцию 11/VII 2017 г.,  
в окончательном варианте — 19/X 2017 г.*

---