

Ю.В.Манилюк

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***СЕЙШИ И ТЯГУН В СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЕ**

В рамках линейного приближения теории длинных волн рассматриваются сейшевые колебания в модельном бассейне, аппроксимирующем бухту с открытым входом. С помощью аналитического решения получены оценки периодов старших мод сейш и соответствующих им скоростей сейшевых течений для бухт Севастопольского региона: Севастопольской, Южной. Проведено сопоставление полученных оценок для Севастопольской бухты с данными натурных наблюдений, показавшее удовлетворительное соответствие. Установлено, что дискретность наблюдений за уровнем для выявления сейш в Севастопольской бухте не должна превышать 30 с. Получены оценки скоростей сейшевых течений. Так, максимальным наблюдаемым амплитудам колебаний уровня, равным 5 – 12 см, соответствуют течения со скоростями 9,2 – 22,0 см/с. Проанализированы условия возникновения тягуна в Южной бухте. Установлено, что наибольшую опасность представляют колебания с периодом около 3 мин, которые могут быть причиной возникновения одноузловой поперечной сейши Севастопольской бухты и двухузловой продольной сейши Южной бухты, периоды которых близки к 3 мин. Взаимодействие указанных волн может привести к сильному тягуну в Южной бухте. Также тягун в Южной бухте могут вызывать колебания с периодом около 1 мин, близким к периодам одноузловой поперечной и двухузловой продольно-поперечной сейш Южной бухты.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *сейши в бухте, свободные волны, длинные волны, волновые течения, бассейн с открытым входом, аналитические решения, мода Гельмгольца, Севастопольская бухта, Южная бухта*

doi: 10.22449/2413-5577-2018-3-4-12

Сейши в бухтах являются одним из наиболее часто наблюдаемых явлений и вносят значительный вклад в формирование их гидрологических режимов. Они могут быть причиной такого опасного явления, как тягун [1], когда даже при небольших колебаниях уровня могут иметь место значительные возвратно-поступательные периодические течения, приводящие к ударам судов о причалы или друг о друга, обрыву швартовых, затруднению или полному прекращению погрузо-разгрузочных операций. Также у входа в бухту сейши вызывают сильные течения, затрудняющие судоходство [1]. На Черном море тягун часто возникает в портах Батуми, Поти, Сочи, Туапсе [1]. В Севастопольской бухте явления тягуна отмечаются редко.

Севастопольская бухта территориально находится в границах г.Севастополя. Ее геометрические параметры следующие: длина около 7 км, средняя ширина около 1 км, средняя глубина 11,7 м [2]. Севастопольская бухта играет важную роль в жизни города. В ней расположены три коммерческих порта, причальные стенки, предназначенные для стоянки большого количества судов различного назначения, судоремонтные заводы, другие хозяйственные

© Ю.В.Манилюк, 2018

*Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. вып.3. С.4-12.*

предприятия. В бухте осуществляется интенсивное судоходство, налажено катерное и паромное сообщение между северной и южной сторонами города.

Гидрологический режим Севастопольской бухты изучен недостаточно. Данные о колебаниях уровня получены в основном с помощью мареографа, расположенного на мысе Павловский. В работе [3] представлены результаты обработки данных наблюдений за уровнем, содержащие значения наиболее энергонесущих периодов. Сведения о течениях в Севастопольской бухте очень скудные. В основном они получены в результате кратковременных измерений, выполненных во время экспедиций Морского гидрофизического института в 2008 и 2014 гг. [4, 5].

Практический интерес представляет исследование сейшевых колебаний с использованием аналитических методов, позволяющих получить точные решения для бассейнов с простой геометрией. Аналитические решения могут быть использованы при планировании натурных наблюдений, для оценки значений скоростей сейшевых течений, а также для тестирования численных моделей.

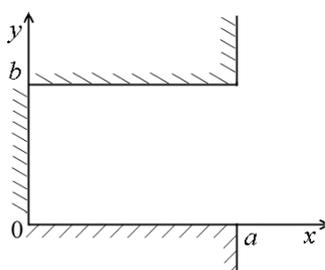


Рис. 1. Модельный бассейн, аппроксимирующий бухту с открытым входом.

Целью настоящей работы является использование аналитического решения для оценки параметров сейш в Севастопольской бухте и анализа условий возникновения тягуна.

Будем аппроксимировать Севастопольскую бухту бассейном прямоугольной формы длиной  $a$ , шириной  $b$  и постоянной глубины  $h$  с открытым входом, равным ширине бухты  $b$  (рис. 1).

В статье [6] получено следующее аналитическое решение задачи о сейшах в бухте данного типа, позволяющее рассчитать периоды сейш, отклонения свободной поверхности и составляющие скорости сейшевых течений:

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

$$\zeta_{km}(x, y, t) = \zeta_{0km} \cos \frac{(1+2k)\pi x}{2a} \cos \frac{m\pi y}{b} \cos \sigma_{km} t, \quad (2)$$

$$u_{km}(x, y, t) = \zeta_{0km} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{(1+2k)b}{\sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}} \sin \frac{(1+2k)\pi x}{2a} \cos \frac{m\pi y}{b} \sin \sigma_{km} t, \quad (3)$$

$$v_{km}(x, y, t) = \zeta_{0km} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{2ma}{\sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}} \cos \frac{(1+2k)\pi x}{2a} \sin \frac{m\pi y}{b} \sin \sigma_{km} t. \quad (4)$$

Здесь использованы следующие обозначения:  $x, y$  – декартовы координаты,  $u, v$  – проекции вектора скорости движения жидкости на оси  $x, y$  соответственно,  $\zeta$  – отклонение свободной поверхности,  $h$  – глубина бассейна,  $t$  – время,  $g$  – ускорение свободного падения,  $a$  – длина бухты ( $0 \leq x \leq a$ ),  $b$  – ширина бухты ( $0 \leq y \leq b$ ), входу в бухту соответствует  $x = a$ .

При этом движение жидкости описывалось линейной системой уравнений длинных волн. На твердых боковых границах бассейна ставились усло-

Таблица 1. Рассчитанные периоды сейш для модельных бассейнов, имеющих характерные размеры Севастопольских бухт ( $a$ ;  $b$ ;  $h$ ) – длина (км), ширина (км), глубина (м) бухты.

мода		$\tau_{km}$ , мин	
$k$	$m$	Севастопольская (7; 1,0; 11,7)	Южная бухта (2,4; 0,37; 11,8)
0	0	43,6	14,9
1	0	14,5	5,0
2	0	8,7	3,0
3	0	6,2	2,1
0	1	3,1	1,1
1	1	3,0	1,1

метры Севастопольской бухты взяты из работы [2], а Южной бухты – из [7].

В статье [3] на основе анализа оцифрованных с дискретностью 5 минут данных наблюдений за уровнем на мысе Павловский за период с апреля 2001 г. по сентябрь 2002 г. установлено, что в Севастопольской бухте выделяются сейшевые колебания с периодами 2,5 ч; 1,25 ч и 50 мин. При этом, энергия последних наиболее значительна. Самым близким к наблюдаемому периоду 50 мин является расчетный, составляющий 43,6 мин. Он меньше его на 12,8 %. Скорей всего, это связано с тем, что в расчетах использовался идеализированный профиль береговой черты – из рассмотрения была исключена бухта Южная. Такой вывод можно сделать, основываясь на результатах, полученных в работе [8]. В ней показано, что наличие залива (в нашем случае Южной бухты) приводит к увеличению (по сравнению с бассейном без залива) периода сейшевых колебаний в бассейне. При этом наиболее сильно влияние залива сказывается на длительности периодов старших мод сейш. Отметим, что в работах [3, 9] численно рассчитан период моды Гельмгольца, который составил 50 мин. Это значение совпадает с данными натурных наблюдений. Как видно из табл.1, величины периодов всех остальных мод сейшевых колебаний Севастопольской бухты более, чем в два раза меньше периода моды Гельмгольца. Аналогичный вывод можно сделать по результатам расчетов методом конечных элементов, приведенных в [9]. Поэтому, по причине большой дискретности по времени данных все остальные моды сейш Севастопольской бухты не выявлены в [3] в результате обработки данных наблюдений. Следовательно, для обнаружения высокочастотных мод сейш Севастопольской бухты необходимо выполнять измерения с меньшей дискретностью. Отметим, что периоды 2,5 часа и 1,25 часа, выделенные в [3], значительно превышают периоды, приведенные в табл.1 и полученные в [9]. Они, вероятно, относятся к модам сейшевых колебаний всего Черного моря в целом. Это предположение согласуется с [10], в которой представлены результаты расчетов параметров сейшевых колебаний Черного моря с помощью метода конечных элементов. В [10], установлено, что в окрестностях Севастополя наиболее весомо (20 %

вия непротекания, а на жидкой границе – условие равенства нулю отклонения свободной поверхности, означающее, что у входа в залив расположены узловые линии для всех собственных мод колебаний жидкости в заливе.

В табл.1 для модельных бассейнов, имеющих характерные размеры и глубину Севастопольской и Южной (часть Севастопольской бухты) бухт, приведены периоды старших мод сейш, рассчитанные по формуле (1). Пара-

от максимальной амплитуды) должна проявляться 8-я мода с периодом 2,9 часа. Более низкие моды сейш Черного моря в районе Севастополя имеют амплитуды, не превышающие 6 % от максимума, и поэтому не выделяются в результате обработки данных наблюдений.

Инструментальные наблюдения за уровнем моря в Севастопольской бухте ведутся с помощью мареографа только в одном месте – на морской гидрометеорологической станции, расположенной на мысе Павловский [3]. Сейша с периодом 50 мин и амплитудой 3 – 4 см наблюдается практически постоянно [3]. Максимальные амплитуды колебаний уровня в районе поста, связанных с сейшевыми колебаниями, составляют 5 – 12 см [3].

Аналитическое решение дает возможность получить оценки максимальных амплитуд колебаний уровня в бухте 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 обычно имеет период, значительно превышающий периоды остальных мод. Также однозначно можно идентифицировать и некоторые другие моды, определяемые характерными 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 превышают периоды других мод (табл.1).

Оценим значения параметров сейш для моды Гельмгольца ( $k = 0, m = 0$ ). Из табл.1 находим, что к наблюдаемому периоду длительностью 50 мин наиболее близок рассчитанный период 43,6 мин, соответствующий моде Гельмгольца. Из (2) получим формулу для вычисления амплитуды сейши данной моды:

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

где  $A_{00}$  – амплитуда колебаний уровня в точке с абсциссой  $x_{ob}$ , установленная в результате наблюдений. Так как для гидрометеорологической станции на мысу Павловском, на которой измеряется уровень,  $x_{ob} \approx 2a/3$ , то  $Z_{00} \approx 2 A_{00}$ . В силу этого, и, учитывая, что по данным наблюдений [3]  $A_{00} \in [5; 12]$  см, получаем оценку максимальных амплитуд колебаний уровня для сейши с периодом 50 мин в Севастопольской бухте:  $Z_{00} \in [10; 24]$  см.

Оценим амплитуды скоростей сейшевых течений для моды Гельмгольца. Из формулы (4) получаем, что для данной моды  $v_{00} = 0$ . Для вычисления амплитуды составляющей скорости  $u_{00}$  имеем из (3) следующее выражение

$$U_{00} = Z_{00} \sqrt{\frac{g}{h}}. \quad (5)$$

Используя (5), находим, что максимальная скорость течения для колебаний уровня с амплитудой 3 – 4 см, наблюдаемых в районе поста наиболее часто, составит 5,5 – 7,3 см/с, а для максимальных наблюдаемых амплитуд, равных 5 – 12 см: 9,2 – 22,0 см/с. Аналогичным образом можно получить оценки параметров других мод продольных сейш.

Анализ выражения (3) показывает, что амплитуды составляющей скорости волновых течений  $u$  для всех продольных мод сейш ( $k \neq 0, m = 0$ ) в

прямоугольном бассейне постоянной глубины с открытым входом не зависят ни от длины бассейна, ни от его ширины и вычисляются по формулам, аналогичным (5). При этом составляющая скорости  $v$  для продольных мод всегда равна нулю (это следует из (4)).

Регулярных наблюдений за скоростями течений в Севастопольской бухте не ведется. В июне 2008 г. Морским гидрофизическим институтом была проведена экспедиция с целью измерения параметров течений в Севастопольской бухте [4]. При этом выявлено, что на выходе из бухты скорости течений составляют около 8 см/с. Также зафиксированы колебания скоростей течений, вызванных сейшми с характерной длиной около половины бухты (3,3 км). Кроме этого, зарегистрированы волны с длинами около 3,8 км и 2,88 км.

В работе [11] 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 до 10 – 12 см/с. Это хорошо согласуется с теоретическими оценками скоростей течений, полученными выше.

Из-за очень малого количества наблюдений в Севастопольской бухте пока не выявлено поперечных сейш ( $m \neq 0$ ). Как показывает анализ табл.1, периоды мод поперечных сейш не превышают 3 мин. Особенностью поперечных сейш в бассейне с открытым входом является то, что они, в отличие от продольных сейш, двумерны. При этом амплитуды скоростей волновых течений поперечных сейш зависят от длины и ширины бассейна. Можно показать, что для данного вида сейш величина модуля скорости волновых течений не превосходит  $\max\{U_{km}, V_{km}\}$ . Получим оценку максимума амплитуды скорости волнового течения для первой моды поперечных сейш ( $k = 0, m = 1$ ). Из формул (3), (4) имеем выражения для расчета амплитуд составляющих волновых скоростей

$$U_{01} = \zeta_{001} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{b}{\sqrt{b^2 + 4a^2}}, \quad V_{01} = \zeta_{001} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{2a}{\sqrt{b^2 + 4a^2}}. \quad (6)$$

Для Севастопольской бухты  $a > b$ . Поэтому, и с учетом (6), приходим к тому, что максимум амплитуды скорости не превосходит максимум  $V_{01}$ . Подставляя во вторую формулу (6) значения геометрических параметров Севастопольской бухты, имеем

$$V_{01} = 0,997 \zeta_{001} \sqrt{\frac{g}{h}}. \quad (7)$$

Таким образом, в Севастопольской бухте максимальная скорость волнового течения одноузловой поперечной сейши очень близка к максимальным скоростям волновых течений продольных сейш.

В [7] указывается, что в Южной бухте возможно возникновение сильно-го тягуна. Он наблюдался, в частности, 27 февраля 2005 г. и 3 марта 1988 г. Тягун был вызван прохождением южного циклона вдоль западного побережья Черного моря при значительных падениях давления. При устойчивом по направлению и продолжительности ветре на поздних стадиях развития процесса ветрового волнения могут образовываться низкочастотные колебания жидкости с периодами около минуты и более. В [7] на основе мето-

дики, изложенной в [12], произведен расчет резонансных параметров для бухты Южная. Вычисленные значения тягунных подвижек ошвартованных судов в бухте Южной могут происходить при совпадении собственных колебаний водных масс в бухте и подошедших длинных волн и зыби с периодами 210 с (3,5 мин) и 70 с (1,2 мин). Как показывают расчеты (табл 1), периодом, близким к 210 с, является период двухузловой продольной сейши ( $k = 2, m = 0$ ), а к периоду 70 с близки периоды одноузловых поперечной ( $k = 0, m = 1$ ) и одноузловой продольно-поперечной ( $k = 1, m = 1$ ) сейш. В работе [13] проведено численное моделирование с помощью спектральной модели *SWAN* на сетке с высоким пространственным разрешением с использованием процедуры вложенных сеток на взморье Балаклавской бухты в период 10 – 13 ноября 2007 г. В результате установлено, что 11 ноября средний период ветровых волн достигал 6 – 8 с. С учетом этого, для среднего периода инфрагравитационных волн получается оценка: 72 – 108 с. Балаклавская бухта расположена в небольшом удалении от Севастопольской бухты. Поэтому можно считать, что значения параметров инфрагравитационных волн на взморье Севастопольской бухты близки к аналогичным значениям на взморье Балаклавской бухты. Анализ табл.1 показывает, что в интервале 72 – 108 с лежат период трехузловой продольной сейши ( $k = 3, m = 0$ ), а также периоды одноузловых поперечной ( $k = 0, m = 1$ ) и одноузловой продольно-поперечной ( $k = 1, m = 1$ ) сейш.

Таким образом, в результате захода в Южную бухту длинноволновой зыби, вызванной прохождением южных циклонов, возможна генерация в Южной бухте трехузловой, двухузловой и одноузловой продольных сейш, а также одноузловой поперечной сейши. Также возможна ситуация, когда входящие в Севастопольскую бухту инфрагравитационные волны с периодом около 3 мин могут генерировать одноузловую поперечную сейшу Севастопольской бухты и двухузловую сейшу Южной бухты, имеющие периоды близкие к 3 мин. При этом одноузловая поперечная сейша Севастопольской бухты может свободно проникать в Южную бухту (из-за того, что вход в бухту параллелен узловой линии этой волны) и резонансно усиливать двухузловую продольную сейшу Южной бухты. Это может быть причиной сильного тягуна. Аналогичная ситуация имеет место для порта Пхохан, расположенного на юго-восточном побережье Кореи [14]. В этом порту период первой моды внешнего залива совпадает с фундаментальным периодом порта, что приводит к аномальным сейшам и сильному тягуну, наблюдаемым в этом порту.

Получим оценки максимальных скоростей волновых течений в Южной бухте. Для определенности предположим, что амплитуда колебаний уровня составляет 20 см. В [15] показано, что для прямоугольного бассейна с открытым входом постоянной глубины амплитуда волновой скорости продольных сейш для всех мод не зависит от номера моды. Поэтому амплитуды трехузловой, двухузловой и одноузловой продольных сейш будут равны. Их можно рассчитать по формулам, аналогичным (5). Расчет дает значение 18 см/с. Воспользовавшись формулой (4), находим, что максимум скорости одноузловой поперечной сейши будет составлять 18 см/с.

На рис.2 приведены векторные поля скорости сейшевых течений для одноузловой (рис.2, а) продольной сейш и для одноузловой поперечной

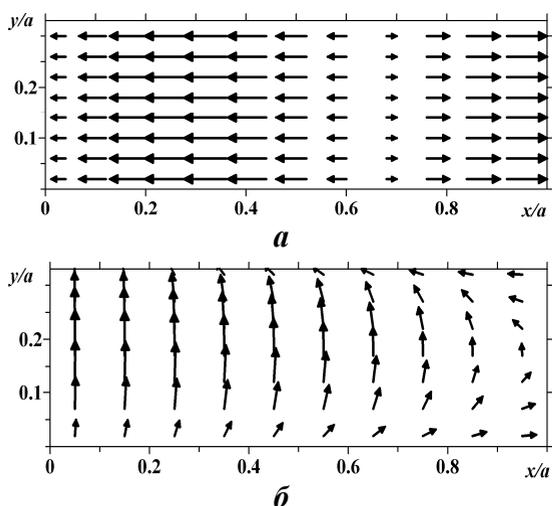


Рис. 2. Векторные поля скорости сейшевых течений для начального отклонения уровня 20 см в модельном бассейне, имеющем характерные размеры Южной бухты: мода ( $k = 1, m = 0$ ) (а), мода ( $k = 0, m = 1$ ) (б).

15 с скорость течения будет монотонно возрастать до максимального значения, а затем в продолжении 1 мин. 15 с будет монотонно убывать до нуля, после чего направление течения изменится на противоположное и т.д. каждые 2 мин. 30 с. В бухте будут сформированы две области, в которых направления течений противоположны. Граница областей будет проходить по прямой  $x = 2a/3$ , на которой отклонения уровня максимальны. Наибольшей опасности будут подвергаться суда, пришвартованные в окрестности пограничной зоны, т.к. течения в этих областях будут полпериода волны противоположны друг другу, затем следующие полпериода будут направлены навстречу друг другу, что может привести к столкновению пришвартованных судов. Поэтому при возникновении опасности тягуна целесообразно перебазировать суда из опасной зоны в другие области бухты. Наибольшие скорости течений будут в окрестности узловых линий, расположенных на прямых  $x = a/3$  и  $x = a$ . Аналогичная картина будет для двухузловой и трехузловой продольной сейш. Расположение узловых линий уровня и границ, где изменяется направление скорости течений, можно определить, воспользовавшись формулами, приведенными в [15].

В случае одноузловой поперечной сейши течения в половине бухты, примыкающей к кутовой части, будут направлены параллельно входу в бухту и менять направление на противоположное каждые 35 с. В половине бухты, примыкающей к входу в нее, направление течений будут составлять разные углы относительно входа в бухту. Чем ближе к выходу из бухты, тем течение будет перпендикулярней входу в бухту. Наибольшие скорости течений будут на линии  $y = b/2$ , проходящей посередине бухты перпендикулярно входу в нее. В окрестности берега скорости течения будут минимальными. Но при этом надо иметь в виду, что у берегов бухты, перпендикулярных входу (по всей их длине), будут максимальные отклонения уровня. Это

сейши (рис.2, б) в модельном бассейне, имеющем характерные размеры Южной бухты.

Рассмотрим возможные риски, которым могут быть подвергнуты суда, пришвартованные у причальных стенок в Южной бухте Севастополя, в результате воздействия вызванного сейшами тягуна. В случае возникновения в бухте одноузловой продольной сейши амплитудой 20 см (рис.2, а) суда будут подвергнуты воздействию вдольберегового течения амплитудой около 18 см/с. В продолжении 2 мин 30 с, составляющих полпериода волны, направление течения будет постоянным. При этом 1 мин

может представлять определенную опасность для пришвартованных судов.

### **Выводы.**

1. Простые модели показывают неплохое согласование расчетных значений параметров сейш со значениями, полученными в результате натуральных наблюдений. Поэтому их можно использовать в качестве вспомогательного средства при планировании натуральных наблюдений и для оценки параметров сейш.

2. Данных натуральных наблюдений за уровнем и течениями в Севастопольской бухте очень мало. Поэтому необходимо в обозримом будущем провести комплекс таких наблюдений. Полученные оценки параметров сейш для Севастопольской бухты показывают, что надо проводить натурные наблюдения за уровнем с дискретностью по времени не больше 30 с.

3. Величины собственных периодов Севастопольской бухты не превышают 50 мин. Периоды 2,5 часа и 1,25 часа, выделяемые в результате обработки данных натуральных наблюдений за уровнем в Севастопольской бухте, являются периодами высокочастотных мод бассейна Черного моря.

4. Инфрагравитационные колебания с периодами 3,5 мин, 1,2 мин, порождаемые штормами, вызываемыми прохождением над регионом Черного моря южных циклонов, могут являться причиной сильного тягуна в Южной бухте, т.к. их значения близки к периодам собственных колебаний Южной бухты. Наибольшую опасность представляют инфрагравитационные колебания с периодом около 3 мин, т.к. их периоды близки к периоду одноузловой поперечной сейши Севастопольской бухты и к периоду двухузловой продольной сейши Южной бухты, взаимодействие которых может привести к аномальным сейшам и сильному тягуну.

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте РАН в рамках государственного задания по теме 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Лабзовский Н.А.* Непериодические колебания уровня моря.– Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1971.– 238 с.
2. *Стокозов Н.А.* Морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2010.– вып.23.– С.198-208.
3. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Репетин Л.Н., Хмара Т.В.* Сейши в Севастопольской бухте // Труды УкрНИГМИ.– 2002.– вып.250.– С.342-353.
4. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Шутов С.А., Зима В.В.* Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений (июнь 2008) // Морской гидрофизический журнал.– 2012.– № 3.– С.31-43.
5. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Шутов С.А., Зима В.В., Чепыженко А.А.* Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP наблюдений, ноябрь 2014 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа.– 2014.– вып.28.– С.25-30.
6. *Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* Исследование сейшевых колебаний в бухте со свободным входом // Морской гидрофизический журнал.– 2017.– № 4.– С.16-25.

7. *Балинец Н.А., Хмара Т.В.* Явление тягуна в бухтах Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа.– 2006.– вып.14.– С.204-208.
8. *Manilyuk Yu.V., Cherkesov L.V.* The influence of the gulf's geometry on seiche oscillations in an enclosed basin // Physical oceanography.– 1997.– v.8, iss.4.– P.217-227.
9. *Чехов В.Н., Лушников В.Ф.* К оценкам сейш в бухтах Крыма методом конечных элементов // Динамические системы.– 2015.– т.5(33), № 1-3.– С.93-102.
10. *Иванов В.А., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* О сейшах Черного моря // Метеорология и гидрология.– 1996.– № 11.– С.57-63.
11. *Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Моделирование циркуляции и пространственной структуры термохалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных (зима 1997 г.) // Морской гидрофизический журнал.– 2005.– № 2.– С.60-76.
12. *Крылов Ю.М., Стрекалов С.С., Цыплухин В.Ф.* Ветровые волны и их воздействие на сооружения.– Л.: Гидрометеиздат, 1976.– 315 с.
13. *Фомин В.В., Лазоренко Д.И., Иванча Е.В.* Численное моделирование сейш в Балаклавской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2017.– вып.3.– С.32-39.
14. *Рабинович А.Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение.– СПб.: Гидрометеиздат, 1993.– 325 с.
15. *Манилюк Ю.В., Фомин В.В.* Сейшевые колебания в частично замкнутом бассейне // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества.– 2017.– вып.3.– С.73-83.

Материал поступил в редакцию 24.05 2018 г.  
После доработки 11.07 2018 г.

Yu.V.Manilyuk

## SEICHES AND HARBOR OSCILLATIONS IN THE SEVASTOPOL BAY

Within the framework of the linear approximation of long wave theory, seiche oscillations in a model basin approximating a open-access pool are considered. Using the analytical solution, the periods of the high seiche modes and corresponding velocities of seiche flow are obtained for the bays in the Sevastopol region: the Sevastopol Bay and the Yugnaya Bay. The estimates obtained for the Sevastopol Bay are compared with data of field observations, which showed a satisfactory agreement. It is established that the discreteness of observations of level for detecting seiches in the Sevastopol Bay should not exceed 30 s. The velocities of seiche flows are estimated. Thus, the maximum observed amplitude of level oscillations, equal to 5 – 12 cm, corresponds to flows with velocities of 9.2 to 22.0 cm/s. The conditions for the appearance of harbor oscillations in the Yugnaya Bay are analyzed. It is established that oscillations with 3 min period are the most dangerous, they can be the reason for the appearance of a single-node transverse seiche of Sevastopol Bay and a two-node longitudinal seiche of the Yugnaya Bay, its periods are close to 3 min. The interaction of these waves can lead to a strong harbor oscillation in the Yugnaya Bay. Also, the harbor oscillation in the Yugnaya Bay can cause oscillations with a period of about 1 min, close to the periods of a single-node transverse and two-node longitudinal-transverse seiche of the Yugnaya Bay.

KEYWORDS: seiche in the bay, free waves, long waves, wave flows, open-access pool, analytical solutions, Helmholtz's node, the Sevastopol Bay, the Yugnaya Bay