

## Исследование свободных колебаний уровня Азовского моря, возникающих после прекращения длительного действия ветра

© 2015 В.А. Иванов, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
E-mail: [shulgaty@mail.ru](mailto:shulgaty@mail.ru)

Поступила в редакцию 25.07.2014 г.

Анализируются физические закономерности свободных колебаний жидкости в Азовском море, возникающих после прекращения действия постоянного ветра. Для расчета применяется нелинейная трехмерная сигма-координатная модель, с использованием которой определяются пространственные характеристики сейшеобразных колебаний, расположение узловых линий и скорости возникающих при этом течений. В результате выполненных исследований установлено, что максимальные величины размахов сейшеобразных колебаний в прибрежной зоне сопоставимы с размерами штормовых сгонов и нагонов. При этом высоты свободных колебаний уровня в открытой части моря составляют 50 – 89% от высот колебаний вдоль береговой линии. В центральной части моря максимальные скорости течений при сейшеобразных колебаниях на 21% превышают скорости стационарных течений, вызванных штормовым ветром. Установлено, что сейши вносят существенный вклад в изменчивость скоростей течений. При этом свободные колебания уровня затухают быстрее амплитуд скоростей течений.

**Ключевые слова:** сигма-координатная модель, свободные колебания жидкости, сейши, стационарные течения, штормовые сгоны и нагоны, узловые линии.

В бассейне Азовского моря свободные волновые (сейшеобразные) колебания уровня, происходящие после прекращения действия атмосферных возмущений, наблюдаются постоянно. При этом в районах сужения береговых границ скорости течений могут достигать 1,5 м/с, а высоты волн – 0,8 м [1]. В этих случаях создается реальная угроза возникновения экстремальных течений, затопления прибрежных районов моря и разрушения береговых сооружений.

Изучение сейшеобразных колебаний в Азовском море методом математического моделирования с учетом анализа данных натуральных наблюдений проведено в работах [2, 3]. В [2] методом конечных элементов найдены значения периодов и структур первых шести мод свободных колебаний. В [3] сейшевые колебания уровня Азовского моря и течения, возникающие в результате нагонов величиной 1 м на открытой границе, исследованы в рамках линейной двумерной математической модели.

В данной работе с использованием нелинейной трехмерной численной модели анализируются физические закономерности свободных колебаний жидкости в акватории Азовского моря. Изучены пространственные характеристики сейшеобразных колебаний, расположение узловых линий и скорости возникающих при этом течений.

### Постановка задачи. Граничные и начальные условия

Математическая модель основывается на системе уравнений турбулентного движения вязкой жидкости [4 – 6], записанной в декартовой системе координат, где ось  $x$  направлена на восток,  $y$  – на север,  $z$  – вертикально вверх:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} A_M \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} A_M \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Здесь  $u, v, w$  – проекции скорости по осям  $x, y, z$ ;  $t$  – время;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f$  – параметр Кориолиса;  $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$  – полная производная. Параметризация коэффициентов вертикальной вязкости  $K_M$  производится в соответствии с полуэмпирической дифференциальной моделью Меллора – Ямады [7]. Коэффициент горизонтальной вязкости  $A_M$  вычисляется с использованием модели подсеточной вязкости [8] в зависимости от горизонтальных градиентов скорости.

Граничные условия на свободной поверхности имеют вид

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}), \quad (5)$$

где  $\zeta(x, y, t)$  – профиль свободной поверхности;  $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$  и  $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$  – проекции касательных напряжений ветра,  $\mathbf{W}$  – вектор скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря,  $C_a$  – эмпирический коэффициент поверхностного трения [9], который изменяется в зависимости от скорости ветра:

$$10^3 C_a = \begin{cases} 2,5, & |\mathbf{W}| > 22 \text{ м/с,} \\ 0,49 + 0,065|\mathbf{W}|, & 8 \leq |\mathbf{W}| \leq 22 \text{ м/с,} \\ 1,2, & 4 \leq |\mathbf{W}| \leq 8 \text{ м/с,} \\ 1,1, & 1 \leq |\mathbf{W}| \leq 4 \text{ м/с.} \end{cases} \quad (6)$$

Граничные условия в придонном слое имеют вид [6]

$$\left( w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0, \quad K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H+h_b} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (7)$$

где  $\tau_{1x} = C_b u \sqrt{u^2 + v^2}$ ;  $\tau_{1y} = C_b v \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $C_b$  – коэффициент донного трения, который находится по формуле  $C_b = k^2 / (\ln^2 h_b / z_0)$ ,  $h_b$  – шаг по вертикали в придонном слое,  $z_0 = 0,003$  м – параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности. Значение

$z_0$  определяется с помощью теории Гранта – Мадсена [10], описывающей механизм влияния волн на течения в придонном пограничном слое. На боковых границах выполняются условия прилипания.

В качестве начальных (при  $t = 0$ ) принимаются условия отсутствия движения жидкости и горизонтальности свободной поверхности до начала действия атмосферных возмущений:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (8)$$

Для построения численного алгоритма применена модель *POM* (*Princeton Ocean Model*) [6], адаптированная к условиям бассейна Азовского моря [11]. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [12]. Топография дна интерполирована на модельную сетку с использованием массива глубин, приведенного на навигационных картах. Ее разрешение по широте и долготе составляет  $1/59 \times 1/84^\circ$ . При этом линейные размеры ячейки  $\Delta x = \Delta y = 1,4$  км, количество узлов горизонтальной сетки  $276 \times 176$ , по вертикали 11 расчетных уровней. Уравнения интегрировались по времени с шагом  $\Delta t = 18$  с для нахождения осредненных двумерных компонент скорости и уровня, а также с шагом  $\Delta t_A = 10\Delta t = 3$  мин – для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компонент скорости.

Атмосферные возмущения являются основным источником генерации сейш в Азово-Черноморском регионе [1]. Под влиянием ветра, имеющего устойчивое направление и скорость, возникают течения и повышения уровня у одного берега и понижения – у другого. После прекращения действия ветра имеют место свободные волновые колебания жидкости на поверхности моря.

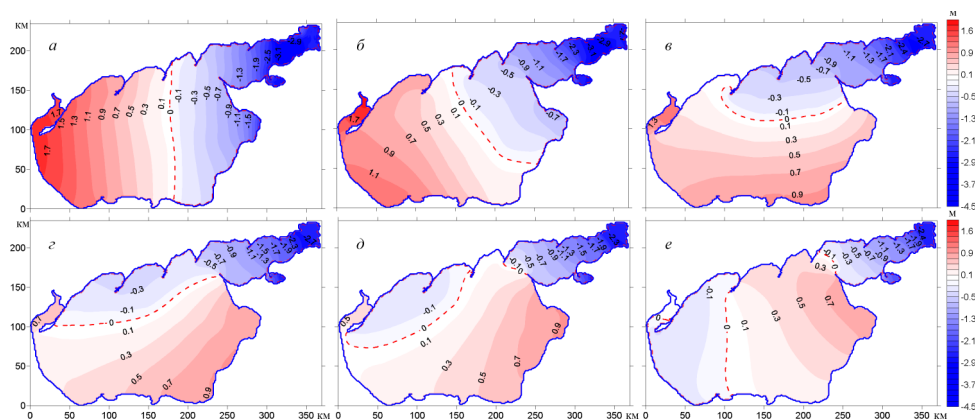
С использованием результатов численных экспериментов, проведенных на основе указанной выше гидродинамической модели, изучается движение жидкости в бассейне Азовского моря после прекращения действия стационарного ветра. Начиная с  $t = 0$ , на первоначально невозмущенную поверхность действует восточный ветер, скорость которого нарастает за первые 3 ч до постоянного значения 20 м/с. После установления течений ( $t_{st} = 48$  ч) скорость ветра линейно уменьшается за 3 ч до нуля ( $t_0 = 51$  ч). Условие выхода движения жидкости на установившийся режим определяется тем, что между двумя соседними значениями времени не происходит заметных изменений отклонений уровня и скоростей течений (не более чем на 5%).

### Анализ результатов численных экспериментов

С целью получения выводов о физических закономерностях свободных колебаний, возникающих после прекращения действия указанного выше ветра, проанализируем результаты численных экспериментов.

На рис. 1 показаны изолинии уровня моря в различные моменты времени. В начальный период поверхность уровня представляет собой одноузловую сейшу. В установившемся режиме (рис. 1, а) возникает понижение уровня вдоль восточного побережья (сгоны) и повышение – вдоль западного (нагоны). Узловая (штриховая) линия пересекает центральную часть моря, она

ориентирована перпендикулярно направлению ветра. Отметим, что самые интенсивные понижения происходят на востоке, в Таганрогском заливе, а наибольшие повышения – в западной части моря. Наименьшие амплитуды колебаний уровня имеют место в его центральной части.



**Рис. 1.** Изолинии уровня (м) Азовского моря при установившемся движении (а), в момент прекращения действия ветра (б), через 3 ч (в), через 6 ч (г), через 9 ч (д), через 12 ч (е)

С прекращением действия ветра (рис. 1, б – е) возникает существенное изменение с течением времени расположения линий равного уровня и узловой линии. В момент прекращения действия ветра (рис. 1, б) узловая линия не сместилась, а зоны сгона и нагона сохраняются в тех же областях моря, что и в установившемся режиме. При этом величины сгонов и нагонов уменьшаются. Из рис. 1, в видно, что узловая линия через 3 ч после прекращения действия ветра развернута относительно центральной области моря и ориентирована в зональном направлении. Зоны сгона и нагона также сместились на запад, в сторону действующего ветра. В Таганрогском заливе прекращение действия ветра через 3 ч мало сказывается на изменениях уровня.

Через 6 ч (рис. 1, г) происходит дальнейшее перемещение узловой линии в восточном направлении. Области нагонов и сгонов перемещаются соответственно в южном и северном направлениях, при этом их величины существенно уменьшаются. На рис. 1, д, е приведены изолинии уровня моря через 9 и 12 ч после прекращения действия ветра. Видно, что свободные колебания в указанные моменты времени имеют вид двухузловых сейш.

Изменения со временем колебаний уровня в любом пункте Азовского моря представляют собой суперпозицию сейш различных мод, на формирование которых влияет много факторов. Используя результаты численного моделирования, выполним анализ изменения амплитуд и периодов сейшеобразных колебаний в пунктах побережья и в центральной части бассейна.

В табл. 1 приведены экстремумы сейшеобразных колебаний ( $\zeta_k$ ;  $k = \overline{1,4}$ ) в районе береговых станций Азовского моря и время их достижения ( $t_k$ ). Из анализа представленных данных следует, что наибольший нагон, генерируемый восточным ветром, имеет место на ст. Геничеськ (2 м). После полного

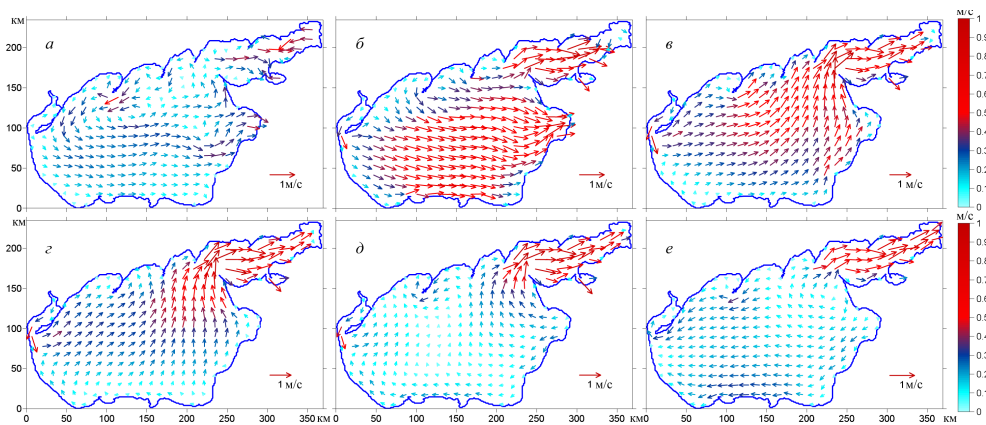
ослабления действия ветра происходит монотонное понижение уровня до наименьшего значения ( $\zeta_1 = -0,27$  м;  $t = 9,5$  ч). При этом размах колебания от стационарного нагона составляет 2,3 м. При  $t = 16,5$  ч отмечается повышение уровня до 0,33 м. Размах второго колебания (0,6 м) в 3,8 раза меньше первого (на 1,63 м). Экстремальное значение при следующем колебании ( $-0,12$  м) имеет место через 8,2 ч (24,7 ч), его размах 0,45 м мало отличается от предыдущего (на 0,15 м). Максимум четвертого свободного колебания  $\zeta_4 = 0,12$  м наступает через  $t_4 = 32,7$  ч, его размах 0,24 м вдвое меньше предыдущего и в 9,6 раза меньше первого.

**Таблица 1.** Стационарные сгоны и нагоны ( $\zeta_{st}$ , см), обусловленные действием постоянного восточного ветра со скоростью 20 м/с, время достижения ( $t_k$ , ч) и экстремумы сейшеобразных колебаний ( $\zeta_k$ ,  $k = \overline{1,4}$ ), возникающих после прекращения действия ветра, в прибрежной зоне Азовского моря

Станция	$\zeta_{st}$	$\zeta_1$	$t_1$	$\zeta_2$	$t_2$	$\zeta_3$	$t_3$	$\zeta_4$	$t_4$
Геническ	202	-27	9,5	33	16,5	-12	24,7	12	32,7
Бердянск	25	-57	2,5	46	7,7	-8	17,6	10	25,6
Мариуполь	-153	-1	12,3	-20	20,2	17	27,1	2	39,2
Таганрог	-158	-89	24,3	30	31,5	-8	41,3	8	50,4
Ейск	-244	-6	18,3	21	28,5	-2	38,9	7	55,7
П.-Ахтарск	-175	92	5,3	-10	13,9	34	21,3	-3	26,7
Темрюк	-18	103	2,7	-14	13,5	25	18,5	-5	28,5
Опасное	32	93	1,7	-8	13,0	23	18	-4	27,9
Мысовое	98	-20	8,7	26	15,4	-6	24,2	3	37,3

Используя результаты табл. 1, выполним анализ свободных колебаний на ст. Ейск, где отмечается наибольший сгон ( $-2,44$  м;  $t = t_0$ ). Прекращение действия ветра вызывает повышение уровня ( $\zeta_1 = -0,06$  м;  $t = 18,3$  ч). При этом размах первого колебания составляет 2,38 м. В дальнейшем уровень продолжает повышаться и через 10,2 ч достигает наибольшего значения 0,21 м, размах второго колебания (0,27 м) в 8,8 раза меньше первого. Еще через 10,4 ч имеет место понижение уровня на 0,23 м ( $\zeta_3 = -0,02$  м;  $t = 38,9$  ч), размах колебания отличается от предыдущего на 0,04 м. Размах следующего колебания ( $\zeta_4 = 0,07$  м), которое происходит через 16,9 ч ( $t_4 = 55,7$  ч), составляет 0,1 м, что в 23,8 раза меньше первого.

На рис. 2 приведены поля течений в поверхностном слое Азовского моря в различные моменты времени. Видно, что в установившемся движении ( $t_{st} = 48$  ч) векторы скорости течений вдоль северо-восточной части побережья и в Таганрогском заливе имеют преимущественное направление в одну сторону с действующим ветром (рис. 2, а). В центральной части моря отмечаются два вихревых образования противоположных знаков с пространственным масштабом  $\sim 100$  км, между которыми выделяются узкие меандрирующие струи.



**Рис. 2.** Поля течений Азовского моря при установившемся движении (*a*), в момент прекращения действия ветра (*b*), через 3 ч (*в*), через 6 ч (*г*), через 9 ч (*д*), через 12 ч (*e*)

При уменьшении скорости ветра до нуля ( $t = t_0$ ) процесс вихреобразования продолжает развиваться, а поле течений представляет собой цепочки вихрей (рис. 2, б). В дальнейшем картина течений существенно меняется (рис. 2, в). Теперь во всей акватории моря векторы скорости течений направлены в сторону, противоположную действующему ветру, скорости больше, чем при  $t_{st}$ , и присутствует один вихрь возмущений. Через 6 и 9 ч после прекращения действия ветра течения остаются достаточно интенсивными и направлены в сторону, противоположную стационарному ветру (рис. 2, г, д). При этом вдоль северного побережья начинает формироваться антициклонический вихрь. Через 12 ч (рис. 2, e) в Таганрогском заливе сохраняется направление течений с запада на восток, у входа в него имеет место антициклонический вихрь, в центральной и западной частях моря течения направлены в противоположную сторону (с востока на запад).

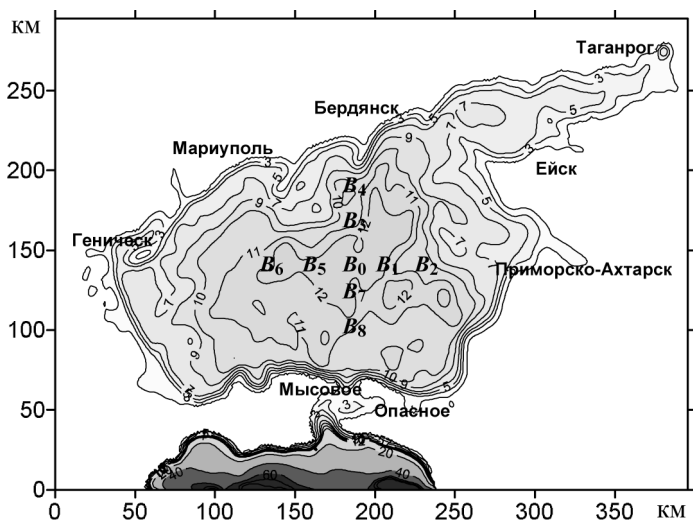
**Таблица 2.** Экстремумы сейшеобразных колебаний, возникающих после прекращения действия ветра, в открытой части Азовского моря

Пункт	$\zeta_{st}$	$\zeta_1$	$t_1$	$\zeta_2$	$t_2$	$\zeta_3$	$t_3$	$\zeta_4$	$t_4$
$B_0$	4	33	7,7	2	14,7	8	20,6	2	29,6
$B_1$	- 46	59	5,6	-3	15,3	18	22,1	0	30,5
$B_2$	5	-37	1,9	43	7,4	-3	17,4	10	23,9
$B_3$	48	2	4,3	16	8,8	2	19,4	2	22,3
$B_4$	10	53	2,8	1	13,7	15	18,5	0	28,6
$B_5$	-125	88	5,3	-10	16,3	30	21,5	-2	27,0
$B_6$	10	-52	1,9	45	7,4	-7	17,4	10	24,7
$B_7$	101	-14	5,7	25	13,3	-2	20,3	7	28,8
$B_8$	11	86	2,5	-8	13,3	22	18,3	-3	28,1

Примечание. Обозначения – в табл. 1.

Для определения периодов и амплитуд сейш в открытой части Азовского моря в табл. 2 приводятся экстремумы сейшеобразных колебаний (см), возникающих после затухания ветра, и соответствующие им моменты времени для

9 пунктов моря (рис. 3). Из анализа представленных данных следует, что наименьшее отклонение уровня в установившемся режиме движения (0,04 м) имеет место в амфидромической точке  $B_0$  (46,25° с. ш., 36,46° в. д.) – геометрическом центре бассейна. В пунктах, расположенных на расстоянии 50 км от центра, амплитуды уровня значительно выше. Так, максимумы отклонений уровня в п.  $B_5$  и  $B_7$  составляют соответственно –1,25 и 1 м, что в 31,3 и 25,3 раза больше, чем в точке  $B_0$  ( $t = t_{st}$ ). Из сравнения наибольших значений – нагона на ст. Геническ (2 м) и повышения уровня в п.  $B_7$  (1,01 м), сгона на ст. Ейск (2,44 м) и понижения уровня в п.  $B_5$  (–1,25 м) – следует, что стационарные нагоны и сгоны двукратно превышают максимальные отклонения уровня в открытой части моря.



**Рис. 3.** Рельеф дна (м) и расположение пунктов  $B_0 - B_8$  в центральной части Азовского моря

Анализируя табл. 2, отметим, что максимальное повышение уровня моря имеет место в п.  $B_7$  (1,01 м). После полного ослабления действия ветра происходит монотонное понижение уровня до наименьшего значения ( $\zeta_1 = -0,14$  м;  $t_1 = 5,7$  ч). При этом размах колебания составляет 1,15 м. Через 7,6 ч отмечается повышение уровня ( $\zeta_2 = 0,25$  м;  $t_2 = 13,3$  ч). Размах второго колебания (0,39 м) в 3 раза меньше первого. Экстремальное понижение при следующем колебании  $\zeta_3 = -0,02$  м имеет место через 7 ч, его размах 0,27 м отличается от предыдущего на 0,12 м. Следующее экстремальное повышение уровня ( $\zeta_4 = 0,07$  м) возникает через 8,5 ч с размахом 0,09 м, который в 12,7 раза меньше первого, оно отмечается через 28,8 ч от момента времени  $t = t_0$ .

Наибольшее понижение уровня моря среди всех рассматриваемых пунктов происходит в п.  $B_5$  (–1,25 м), через 5,3 ч с размахом 2,13 м достигается максимум первого свободного колебания ( $\zeta_1 = 0,88$  м). Через 11 ч

имеет место наибольшее понижение уровня ( $\zeta_2 = -0,1$  м;  $t = 16,3$  ч), размах колебания (0,98 м) в 2,2 раза меньше первого. Следующий экстремум свободных колебаний достигается через 5,2 ч ( $\zeta_3 = 0,3$  м), размах 0,4 м меньше предыдущего в 2,5 раза. Понижение уровня  $\zeta_4 = -0,02$  м происходит через 5,5 ч с размахом колебания 0,32 м, который в 6,7 раза меньше первого, оно наступает через 27 ч от момента времени  $t = t_0$ .

Особенности высот сейшеобразных колебаний в центральной части моря наиболее четко проявляются при сопоставлении с высотами сейш, возникающих в прибрежных районах. Из анализа данных табл. 1 и 2 следует, что амплитуды и размахи свободных колебаний в пунктах открытой части Азовского моря (табл. 2) меньше, чем на береговых станциях. При этом наибольшие значения отклонений уровня в прибрежной и центральной частях моря в стационарном режиме отличаются в два раза, а экстремумы сейшеобразных колебаний – в 1,2 – 2 раза. Наибольшие значения размахов первых колебаний для сгонов на ст. Ейск (2,38 м) в 1,2 раза меньше, чем в п.  $B_5$  (2,13 м), для нагонов на ст. Геничеськ (2,3 м) они в 2 раза больше, чем в п.  $B_7$  (1,15 м). Таким образом, экстремальные размахи сейшевых колебаний в открытой части моря сопоставимы с размахами свободных колебаний в прибрежных районах и составляют 50 – 89% от последних.

Время достижения экстремумов собственных колебаний, приведенное в табл. 1 и 2, позволяет выполнить сравнение двух первых периодов в береговой и открытой частях моря. Период первого свободного колебания в пунктах побережья составляет 15 – 16 ч, на ст. Ейск – 21 ч. Период второго свободного колебания 13 – 19 ч, на ст. Мысовое – 22 ч, на ст. Ейск – 27 ч. При этом в центральной части Азовского моря первое сейшеобразное колебание совершается за 13 – 16,5 ч, второе – за 11 – 17 ч. Следовательно, за исключением станций, расположенных на сложных береговых линиях (рис. 3), первые периоды сейш центральной и береговой частей моря отличаются на 2 – 3 ч.

В табл. 3 приведены значения скоростей поверхностных стационарных течений ( $|\mathbf{U}|_{st}$ , см/с), вызванных действием постоянного восточного ветра со скоростью 20 м/с, а также скоростей течений сейшеобразных колебаний ( $|\mathbf{U}|_k$ ,  $k = \overline{1,6}$ ) в центральной части Азовского моря (рис. 3). Здесь же указаны соответствующие им моменты времени ( $t_k$ , ч).

В районе узловой линии сейшеобразных колебаний (рис. 1, б), где вертикальные колебания уровня близки к нулю, расположены пункты  $B_0$ ,  $B_3$ ,  $B_4$ ,  $B_7$  и  $B_8$ . Рассмотрим некоторые из них. Из анализа данных, представленных в табл. 3, следует, что в п.  $B_0$  первое экстремальное значение скорости  $|\mathbf{U}|_1 = 66,3$  см/с превышает стационарную скорость  $|\mathbf{U}|_{st} = 20,8$  см/с в 3,2 раза. Через 13,8 ч значение скорости ( $|\mathbf{U}|_4 = 3,7$  см/с) существенно уменьшается – в 5,6 раза – по сравнению с  $|\mathbf{U}|_{st}$  и в 18 раз – по сравнению с  $|\mathbf{U}|_1$ . Дальнейшее



убывание скорости до 1 – 2 см/с происходит через 29,2 ч. Аналогичное изменение скорости имеет место в п.  $B_3$ . Скорость течений в начале сейшеобразных колебаний (84,8 см/с) значительно превосходит скорость при стационарном движении (2,6 см/с), при этом время, за которое интенсивность течений уменьшается до 1 см/с, составляет 24,1 ч.

**Таблица 3.** Максимальные скорости поверхностных стационарных течений ( $|U|_{st}$ ), вызванных действием постоянного восточного ветра со скоростью 20 м/с, и максимальные скорости течений ( $|U|_k$ ,  $k = \overline{1,6}$ ), возникающих после прекращения действия ветра, с соответствующими моментами времени в центральной части Азовского моря

Пункт	$ U _{st}$ , см/с	$ U _1$ , см/с	$t_1$ , ч	$ U _2$ , см/с	$t_2$ , ч	$ U _3$ , см/с	$t_3$ , ч	$ U _4$ , см/с	$t_4$ , ч	$ U _5$ , см/с	$t_5$ , ч	$ U _6$ , см/с	$t_6$ , ч
$B_0$	20,8	66,3	0,6	57,9	2,2	64,2	4,1	3,7	13,8	16,0	20,1	0,2	29,2
$B_1$	40,1	52,9	4,4	16,7	9,7	5,9	13,4	10,9	16,1	9,0	18,0	1,9	34,3
$B_2$	47,0	57,1	0,8	7,8	12,0	18,3	20,2	1,4	31,6	2,1	36,4	1,8	37,8
$B_3$	2,6	84,8	0,8	0,7	8,0	21,0	10,2	0,5	14,2	15,5	17,1	0,1	24,1
$B_4$	19,0	72,4	0,7	6,5	8,3	18,1	11,0	1,4	14,5	11,5	17,5	3,2	23,3
$B_5$	13,2	22,5	8,8	6,9	14,0	18,4	7,4	3,4	21,7	10,7	24,1	1,2	35,1
$B_6$	70,4	69,2	0,8	4,0	10,7	21,4	14,7	2,3	26,8	0,4	31,0	1,1	32,6
$B_7$	22,8	46,2	0,9	41,1	2,1	43,7	3,9	5,1	8,6	19,5	11,3	3,1	14,4
$B_8$	24,5	79,2	0,9	5,7	6,1	11,9	17,6	1,4	21,3	11,0	26,3	0,3	33,4

В пунктах  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_5$ ,  $B_6$ , расположенных на удалении 50 и 100 км в зональном направлении от амфидромической точки  $B_0$ , начало свободных движений жидкости не приводит к столь резкому изменению стационарной скорости. Изменение скорости сейшеобразных колебаний рассмотрим на примере п.  $B_1$ , расположенного на 50 км восточнее п.  $B_0$ . Здесь скорость установившегося течения  $|U|_{st} = 40,1$  см/с мало отличается от первого экстремального значения скорости сейшеобразных колебаний  $|U|_1 = 52,9$  см/с ( $t_1 = 4,4$  ч), превышение составляет 1,3 раза. Уменьшение скорости до 2 см/с происходит здесь на 9 – 12 ч дольше (через 34,3 ч), чем в районе узловой линии.

Из анализа величин модуля скорости следует, что в открытом море преобладают высокие скорости течений, до 84,8 см/с (п.  $B_3$ ). При этом направление поверхностных течений имеет вихревой характер с доминирующим меридиональным движением потоков.

Численные эксперименты с использованием гидродинамической модели показали, что затухание свободных колебаний в пунктах центральной части моря происходит быстрее, чем в береговых районах (максимум амплитуды не превышает 2 см). Время затухания свободных колебаний жидкости в прибрежном районе составляет 92,1 ч, что на 23,7 ч больше, чем в центральной части моря (68,4 ч). Периоды первого колебания в центральной и береговой частях Азовского моря также различны. Наибольшие по периоду сейшевые

колебания в прибрежном районе (ст. Ейск и Таганрог) составляют 20,6 и 17 ч, что на 4,1 и 0,8 ч больше, чем в центральной части моря (п.  $B_1$  и  $B_5$ ) – 16,5 и 16,2 ч.

### Выводы

На основании результатов моделирования свободных колебаний жидкости в Азовском море, возникающих после прекращения действия ветра, выполнен анализ физических закономерностей пространственного распределения отклонений уровня и скоростей течений.

Максимальные величины размахов сейшеобразных колебаний в прибрежной зоне сопоставимы с величинами штормовых сгонов и нагонов, при этом высоты свободных колебаний в открытой части моря составляют 50 – 89% от высот колебаний в прибрежной зоне.

В центральной части моря максимальные скорости течений (84,8 м/с) при сейшеобразных колебаниях на 21% превышают скорости стационарных течений, вызванных штормовым ветром (70,4 м/с). Таким образом, сейши вносят существенный вклад в изменчивость скоростей течений.

Свободные колебания уровня (не более 2 см) затухают быстрее (60 ч), чем амплитуды скоростей течений, которые не превышают 2 см/с и прослеживаются в интервале времени 60 – 200 ч.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2010. – 174 с.
2. *Иванов В.А., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* О сейшах Азовского моря // *Метеорология и гидрология.* – 1994. – № 6. – С. 105 – 110.
3. *Матишиов Г.Г., Инжебейкин Ю.И.* Численные исследования сейшеобразных колебаний уровня Азовского моря // *Океанология.* – 2009. – 49, № 4. – С. 485 – 493.
4. *Сретенский Л.Н.* Теория волновых движений жидкости. – М.: Наука, 1977. – 816 с.
5. *Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М.* Введение в гидродинамику и теорию волн. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
6. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model // *Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Ed. N. Heaps.* – Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1987. – P. 1 – 16.
7. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1982. – 20, № 4. – P. 851 – 875.
8. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // *Mon. Wea. Rev.* – 1963. – 91, № 3. – P. 99 – 164.
9. *Wannawong W., Humphries U.W., Wongwiset P. et al.* Mathematical modeling of storm surge in three dimensional primitive equations // *Inter. Comp. Math. Sci.* – 2011. – № 5. – P. 44 – 53.

10. Grant W.D., Madsen O.S. Combined wave and current interaction with a rough bottom // J. Geophys. Res. – 1979. – 84. – P. 1797 – 1808.
11. Фомин В.В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды Укр-НИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
12. Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967. – March. – P. 215 – 234.

## **Studies of free fluctuations of the Azov Sea level arising after the prolonged wind has stopped**

**V.A. Ivanov, L.V. Cherkosov, T.Ya. Shul'ga**

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*  
*e-mail: [shulgaty@mail.ru](mailto:shulgaty@mail.ru)*

Physical regularities of liquid free fluctuations in the Sea of Azov arising after constant wind has stopped, are analyzed. The calculation is done by a nonlinear three-dimensional sigma-coordinate model. Its application permits to define spatial characteristics of seiche-like fluctuations, arrangement of nodal lines and velocities of the arising currents. The performed studies result in revealing the fact that maximum seiche-like oscillations in the coastal zone are comparable to the scales of storm surge phenomena. At that the level free fluctuations' heights in the open sea make 50 – 89% of those along the coastline. In the central part of the sea at seiche-like fluctuations, the currents' maximum velocities exceed the velocities of the gale-induced stationary currents by 21%. It is found that seiches make essential contribution to variability of currents' velocities. At that the level free fluctuations attenuate faster than the amplitudes of currents' velocities.

**Keywords:** three-dimensional nonlinear model, free fluctuations of liquid, seiche, stationary currents, surge phenomena processes, nodal lines.