

# Сгонно-нагонные колебания в Черном море : влияние Азовского моря и Керченского пролива

Коновалов А.В., Манилюк Ю.В.,

Черкесов Л.В.

*Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины*

Черное и Азовское моря соединены Керченским проливом. Ширина его составляет от 4 до 15 км, длина 41 км, глубина - 5-15 м. В силу того, что геометрические размеры Керченского пролива намного меньше размеров Черного моря, то в подавляющем большинстве работ, посвященных исследованию волновых процессов в Черном море [1-5], связь Черного и Азовского морей через Керченский пролив не учитывается и используется модель полностью замкнутого Черного моря. Вопросы, связанные с оценкой возникающих при этом погрешностей в этих работах не рассматриваются.

Между тем, исследование длинноволновых процессов в системе из двух бассейнов, соединенных проливом, проведенное в [6], показало, что при определенных соотношениях между параметрами бассейнов и пролива влияние одного из бассейнов системы на волновые процессы в другом может быть весьма существенным. В связи с этим, основной целью исследования в настоящей работе является оценка влияния Азовского моря через Керченский пролив на

характеристики длинноволновых процессов в Черном море. В качестве таких процессов рассматриваются сгонно-нагонные колебания уровня моря, вызываемые прохождением типичных для Азово-Черноморского региона циклонов.

Рассмотрим длинные баротропные волны в замкнутом двухмерном бассейне переменной глубины, вызываемые движущимся возмущением атмосферного давления. Предполагая жидкость вязкой и несжимаемой, будем исходить из следующей системы уравнений мелкой воды в полных потоках [7]:

$$\begin{aligned} U_t + gH\zeta_x - fV &= -\frac{H}{\rho} p_x + \frac{1}{\rho} (\tau_1^w - \tau_1^h), \\ V_t + gH\zeta_y + fU &= -\frac{H}{\rho} p_y + \frac{1}{\rho} (\tau_2^w - \tau_2^h), \\ \zeta_t &= -U_x - V_y. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $U, V$  - проекции вектора полного потока на горизонтальные оси  $x, y$  соответственно;  $H$  - глубина жидкости;  $\zeta$  - возвышение свободной поверхности;  $p$  - возмущение атмосферного давления;  $\tau_1^w, \tau_2^w$  - проекции касательного напряжения ветра на оси  $x, y$ ;  $\tau_1^h, \tau_2^h$  - проекции напряжения придонного трения;  $\rho$  - плотность жидкости;  $g$  - ускорение свободного падения;  $f$  - параметр Кориолиса; индекс снизу означает дифференцирование по соответствующей переменной.

На вертикальной боковой границе бассейна  $\Gamma$  потребуем равенства нулю нормальной составляющей полного потока

$$U_n|_r=0. \quad (2)$$

Считаем, что в начальный момент времени  $t = 0$  жидкость покоится, свободная поверхность горизонтальна, возмущений атмосферного давления нет:

$$\begin{aligned} U(x,y,0) = 0, V(x,y,0) = 0, \zeta(x,y,0) = 0, \\ p(x,y,0) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Циклон моделируем в виде движущейся с постоянной скоростью области возмущений атмосферного давления

$$p(x,y,t) = \begin{cases} p_0 \cos^2 \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{r_c}{R} \right) \right], & r_c \leq R, \\ 0, & r_c > R, \end{cases} \quad (4)$$

с соответствующим ей полем касательных напряжений ветра.

Здесь  $r_c$  - расстояние от точки  $(x,y)$  до центра циклона  $(x_0,y_0)$ ,  $x_0(t) = x_0(0) + c_1 t$ ,  $y_0(t) = y_0(0) + c_2 t$ ,  $R$  - радиус циклона,  $p_0$  - максимальное отклонение давления от фонового (невозмущенного) значения,  $c_1$  и  $c_2$  - проекции вектора скорости движения циклона на горизонтальные оси.

Вектор тангенциального напряжения ветра определяем по формуле [1]

$$t^w = k_1 \cdot \rho_a \cdot |W| W \quad (5)$$

где  $\rho_a$  - плотность воздуха,  $W$  - вектор горизонтальной скорости ветра в приводном слое,  $k_1$  - безразмерный коэффициент. Для нахождения  $W$  воспользуемся соотношением для скорости геоциклострофического ветра в циклоне [10]

$$W^T = -f l / 2 + [(f l)^2 / 4 + p_r \cdot l / \rho_a]^{1/2}, \quad (6)$$

где  $W^T$  - тангенциальная скорость ветра на расстоянии  $l$  от центра циклона,  $p_r$  - радиальный градиент атмосферного давления. Ветер в приводном слое воздуха рассчитываем, умножая  $W^T$  на эмпирический коэффициент  $k_2=0.7$  и поворачивая вектор геоциклострофической скорости на угол  $\gamma=20^\circ$  (угол втока) против часовой стрелки [11].

Система (1) аппроксимируется неявной разностной схемой переменных направлений [8,9]. Решение ищется для сеточных функций  $\{U, V, \zeta\}_{m,n}^k$  определенных в узлах расчетной сетки, состоящей из квадратных ячеек. Граница области интегрирования аппроксимируется ломаной, отрезки которой параллельны одной из горизонтальных осей. Для адаптации численной модели к условиям бассейна Черного и Азовского морей сформирована расчетная область (рис. 1.) и выполнена аппроксимация береговой черты на разностной сетке размерностью  $223 \times 143$  точек (шаг по пространственным переменным - 5 км). При этом, ширина Керченского пролива составляет 10 км. Глубина, заданная во внутренних узлах сетки, отражает реальную батиметрию. В граничных точках глубина принята равной 2 м.

С использованием данной модели проведены две серии численных экспериментов, в которых определялись характеристики длинноволновых процессов в Черном море, вызываемых прохождением типичных для этого региона циклонов. В первой из

них на входе в Керченский пролив со стороны Черного моря ставилось условие (2), что соответствует модели полностью замкнутого Черноморского бассейна. Во второй серии аналогичные вычисления проводились для системы Черного и Азовского морей, соединенных Керченским проливом.

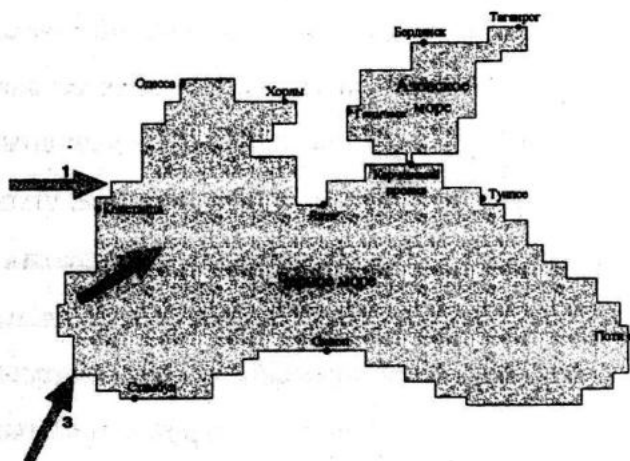


Рис. 1 Расчетная область численной модели и траектории движения центров модельных циклонов.

Во всех расчетах давление внутри области, занятой циклоном определялось по формуле (4). При этом задавались следующие значения параметров:  $p_0=10$  гПа;  $R = 300, 400$  км;  $c = 5, 10$  м/с. Траектории смещения центров модельных циклонов показаны на рис.1.

Перейдем к анализу полученных результатов. В таблицах 1-4 для ряда пунктов побережья Черного моря приведены максимумы сгонно-нагонных колебаний уровня, полученные на основе результатов двух серий численных экспериментов. В таблицах

использованы следующие обозначения:  $N_i$  - максимальная величина нагона,  $S_i$  - максимальная величина сгона,  $i$  - номер серии численных экспериментов ( $i=1$  соответствует модели полностью замкнутого Черного моря,  $i=2$  - модели Азово-Черноморского бассейна). Величины сгонов и нагонов указаны в сантиметрах, выделены соответствующие значения  $N_1, N_2$  и  $S_1, S_2$  отличающиеся друг от друга на 0,5 см и более.

Как видно из этих таблиц, количество случаев, при которых разница между результатами двух серий численных экспериментов  $\delta \geq 0,5$  см, растет с увеличением радиуса циклона и уменьшается с увеличением скорости его перемещения. Так, наибольшее количество указанных случаев (восемь) получено при прохождении циклонов с параметрами  $R=400$  км,  $c=5$  м/с, а при задании  $R=300$  км,  $c=10$  м/с таких случаев зафиксировано не было. Отметим также, что по результатам всех расчетов наиболее часто учет Азовского моря приводил к изменению максимумов сгонов и нагонов более чем на 0,5 см при движении циклонов по траектории 2 (8 случаев).

Влияние Азовского моря на амплитуды сгонно-нагонных колебаний уровня для отдельных пунктов побережья Черного моря в значительной степени зависит от параметров циклона (траектории, радиуса, скорости перемещения). Величины разностей между соответствующими значениями

Табл. 1

Максимумы сгонно-нагонных колебаний уровня при прохождении циклонов с параметрами : R=300 км, c=5м/с.

Пункт	Траектория 1			Траектория 2			Траектория 3						
	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	S <sub>2</sub> см
Одесса	20	20	7,5	57	57	27	27	90	91	73	73		
Хорлы	8,6	8,9	81	36	35	88	88	93	93	44	44		
Ялта	12	12	2,6	2,6	9,5	8,3	9,1	0,2	0,3	3,0	2,9		
Констанца	31	31	5,0	4,8	43	43	11	49	49	12	12		
Туапсе	9,4	9,3	3,0	2,9	1,0	0,7	3,0	0,6	0,7	3,1	2,9		
Поти	4,2	4,5	3,4	3,3	1,1	0,8	3,2	0,9	0,9	3,2	3,1		
Синоп	13	13	5,0	4,9	0,8	0,7	3,4	0,7	0,7	3,6	3,5		
Стамбул	5,6	6,0	7,1	7,0	4,0	3,3	7,2	7,1	7,2	11	11		

Табл. 3

Максимумы сгонно-нагонных колебаний уровня при прохождении циклонов с параметрами : R=300 км, c=10м/с.

Пункт	Траектория 1			Траектория 2			Траектория 3						
	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	S <sub>2</sub> см
Одесса	16	16	11	11	58	43	43	96	96	78	78		
Хорлы	48	48	100	100	48	97	97	120	120	55	55		
Ялта	11	11	2,5	2,5	9,8	9,9	8,3	1,1	1,1	2,6	2,6		
Констанца	28	28	5,9	5,8	41	41	8,2	47	47	18	18		
Туапсе	7,7	7,7	2,8	2,8	2,0	2,0	2,9	1,6	1,7	3,0	3,0		
Поти	4,8	5,1	3,2	3,2	2,6	2,3	3,3	2,1	2,1	3,4	3,3		
Синоп	9,0	8,9	4,7	4,7	1,3	1,0	2,7	1,0	1,1	2,9	2,9		
Стамбул	4,6	4,6	4,8	4,9	2,9	2,6	6,0	4,8	4,8	8,0	8,0		

Табл. 2

Максимумы сгонно-нагонных колебаний уровня при прохождении циклонов с параметрами : R=400 км, c=5м/с.

Пункт	Траектория 1			Траектория 2			Траектория 3						
	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	S <sub>2</sub> см
Одесса	65	65	6,8	6,6	69	39	39	79	80	63	63		
Хорлы	6,6	7,3	75	75	26	25	65	83	83	47	46		
Ялта	11	11	3,2	3,2	8,9	8,9	7,0	3,2	3,4	4,6	4,6		
Констанца	26	26	7,0	6,9	37	37	11	47	47	15	15		
Туапсе	9,6	9,4	3,8	3,7	3,2	2,8	4,1	0,2	0,2	4,1	3,9		
Поти	6,5	7,2	4,2	4,1	1,0	0,8	4,3	0,7	0,6	4,4	4,3		
Синоп	14	14	6,9	6,8	5,7	5,1	5,9	1,8	1,6	5,2	5,1		
Стамбул	5,5	6,2	5,0	5,0	4,4	4,2	8,4	7,8	7,9	9,8	9,8		

Табл. 4

Максимумы сгонно-нагонных колебаний уровня при прохождении циклонов с параметрами : R=400 км, c=10м/с.

Пункт	Траектория 1			Траектория 2			Траектория 3						
	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	N <sub>1</sub> см	N <sub>2</sub> см	S <sub>1</sub> см	S <sub>2</sub> см
Одесса	66	66	12	12	71	71	36	83	83	58	58		
Хорлы	26	26	92	92	28	27	76	110	110	60	60		
Ялта	10	10	3,0	3,0	10	9,9	6,3	3,6	3,7	4,4	4,4		
Констанца	26	26	6,9	6,5	37	37	7,7	45	45	15	15		
Туапсе	8,5	8,3	4,1	4,1	3,4	3,0	3,8	0,5	0,2	3,9	3,9		
Поти	5,9	6,2	4,5	4,5	1,1	0,9	3,9	1,0	0,8	4,2	4,1		
Синоп	11	11	6,7	6,7	3,1	2,7	5,6	1,2	1,1	4,1	4,1		
Стамбул	5,2	5,2	4,4	4,4	3,8	3,9	6,4	5,2	5,3	7,0	7,0		

$N_1, N_2$  и  $S_1, S_2$ , полученными для рассматриваемых пунктов при различных вариантах задания параметров циклона, могут отличаться как по величине, так и по знаку. Наибольшее количество случаев превышения этих разностей 0,5 см (по модулю) отмечено в пункте Хорлы – 5. В Ялте зафиксировано 3 таких случая, в Одессе и Стамбуле – по 2 случая, в Туапсе, Синопе и Потти – по 1 случаю. В Констанце случаев  $\delta \geq 0,5$  см не было отмечено.

В целом, из сопоставления величин  $N_i$  и  $S_i$  представленных в таблицах 1-4 следует, что учет связи Черного и Азовского морей через Керченский пролив весьма слабо отражается на амплитудах сгонно-нагонных колебаний уровня в Черном море, вызываемых рассмотренными типами циклонов. Ни в одном из вариантов задания параметров барического возмущения отличие результатов первой и второй серии численных экспериментов не превышает 1 см.

Анализ кривых изменений уровня, построенных для рассматриваемых пунктов побережья Черного моря, а также анализ периодограмм изменений уровня в этих пунктах свидетельствуют о соответствии амплитудно-частотных характеристик колебаний уровня после ухода циклона, полученных в рамках модели Черного моря и модели Азово-Черноморского бассейна.

В заключение сформулируем основные выводы, полученные в данной работе.

Учет связи Черного и Азовского моря через Керченский пролив слабо отражается на амплитудах сгонно-нагонных колебаний уровня в Черном море, вызываемых характерными для региона типами циклонов. При этом чем меньше горизонтальные размеры циклона и больше скорость его перемещения, тем влияние Азовского моря слабее.

Азовское море практически не влияет на спектральный состав колебаний уровня, возникающих в пунктах побережья Черного моря после ухода циклонов.

Полученные оценки влияния Азовского моря на характеристики длинноволновых процессов в Черном море свидетельствуют о том, что модель замкнутого Черного моря вполне применима для теоретических исследований баротропных волн, генерируемых атмосферными возмущениями типа циклонов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. / Под ред. Нелепо Б.А. -Л.: Гидрометеиздат, 1984. - 240 с.
2. Еремеев В.Н., Коновалов А.В., Черкесов Л.В. Моделирование Длинных баротропных волн в Черном море, вызываемых движущимися барическими возмущениями // Океанология, 1996, N 2, с. 191-196

3. *Архипкин В.С., Иванов В.А., Николаенко Е.Г.* Моделирование баротропных сейш в южных морях // Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях. М.:Наука, 1989, с.104-117
4. *Иванов В.А., Янковский А.Я.* Длинно-волновые движения в Черном море. Киев: Наукова Думка, 1992. 112 с.
5. *Доценко С.Ф., Коновалов А.В.* Численное моделирование распространения цунами в открытой части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. -1995. - N 1. -С. 67-80.
6. *Коновалов А.В., Короткова Т.Г., Черкесов Л.В.* Генерация длинных баротропных волн движущимися барическими возмущениями в системе бассейнов, соединенных проливом // Морской гидрофизический журнал, 1998, N 1, -С. 3-11
7. *Вольцингер Н.Е., Пяковский Р.В.* Основные океанологические задачи теории мелкой воды. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 300 с.
8. *Годунов С.К., Рябенкий В.С.* Разностные схемы М.: Наука, 1977. 440 с.
9. *Марчук Г.И., Каган Б.А.* Океанские приливы -Л.: Гидрометеоздат, 1977.- 296 с.
10. *Кричак О.Г.* Синоптическая метеорология. -Л.: Гидрометеоздат, 1956. -531 с.
11. *Григоркина Р.Г., Фукс В.Р.* Воздействие тайфунов на океан. -Л.: Гидрометеоздат, 1986. -244 с.