

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТЕО-
ВОЗМУЩЕНИЙ НА УРОВЕННУЮ
ПОВЕРХНОСТЬ АЗОВО-
ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА**

А.В. Коновалов, Л.В. Черкесов

Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: oaci@alpha.mhi.iuf.net

Одной из основных причин, приводящих к значительным отклонениям уровня Черного и Азовского морей являются возмущения в поле атмосферного давления типа циклонов, прохождение которых над акваторией этих бассейнов может вызывать интенсивные сгонно-нагонные колебания уровня в различных участках побережья. Об этом свидетельствуют и анализ натурных наблюдений над уровнем моря [1-4] и результаты численного моделирования штормовых нагонов в Черном и Азовском морях [5-8], основной целью которых было определение максимальных отклонений уровня моря в различных пунктах побережья при различных метеоусловиях.

Однако, несмотря на полученные результаты для прибрежной зоны, вопрос о реакции уровенной поверхности открытой части моря на движущиеся циклоны остается слабо изученным. Это обстоятельство определило основную цель настоящей работы – на основе разработанной численной гидродинамической модели рассчитать и провести анализ изменений уровенной поверхности Азовово-Черноморского бассейна при прохожде-

нии характерных для данного региона циклонов.

Перейдем к математической постановке и методу решения задачи. Будем предполагать жидкость однородной и несжимаемой, волны длинными. Для описания движения жидкости воспользуемся системой уравнений мелкой воды в полных потоках [9]:

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

Здесь U, V - проекции вектора полного потока на горизонтальные оси x, y соответственно; H - глубина жидкости; ζ - возвышение свободной поверхности; p - возмущение атмосферного давления; τ_1^w, τ_2^w - проекции касательного напряжения ветра на оси x, y ; τ_1^h, τ_2^h - проекции напряжения придонного трения; ρ - плотность жидкости; g - ускорение свободного падения; f - параметр Кориолиса; индекс снизу означает дифференцирование по соответствующей переменной.

На вертикальной боковой границе бассейна Γ потребуем равенства нулю нормальной составляющей полного потока

$$U_n|_{\Gamma} = 0. \quad (2)$$

Считаем, что в начальный момент времени $t = 0$ жидкость покоятся, свободная поверхность горизонтальна, возмущения атмосферного давления отсутствуют:

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

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]

$$\tau^* = k_1 \rho_a |W| W \quad (5)$$

где ρ_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 вtoka) против часовой стрелки [11].

Система (1) аппроксимируется неявной разностной схемой переменных направлений [6,12]. 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 223×143 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.

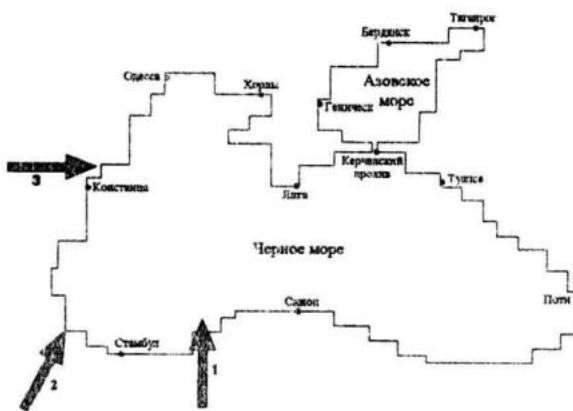


Рис. 1 Расчетная область численной модели и траектории движения центров модельных циклонов.

В численных экспериментах, проведенных с помощью данной модели, изучалась реакция уровенной поверхности Азо-Черноморского бассейна на прохождение циклонов по 3 различным траекториям (рис.1), характерным для южных циклонов [14]. Кроме того, для оценки влияния водообмена между Черным и Азовским морями, вызываемого проходящими циклонами, на изменение

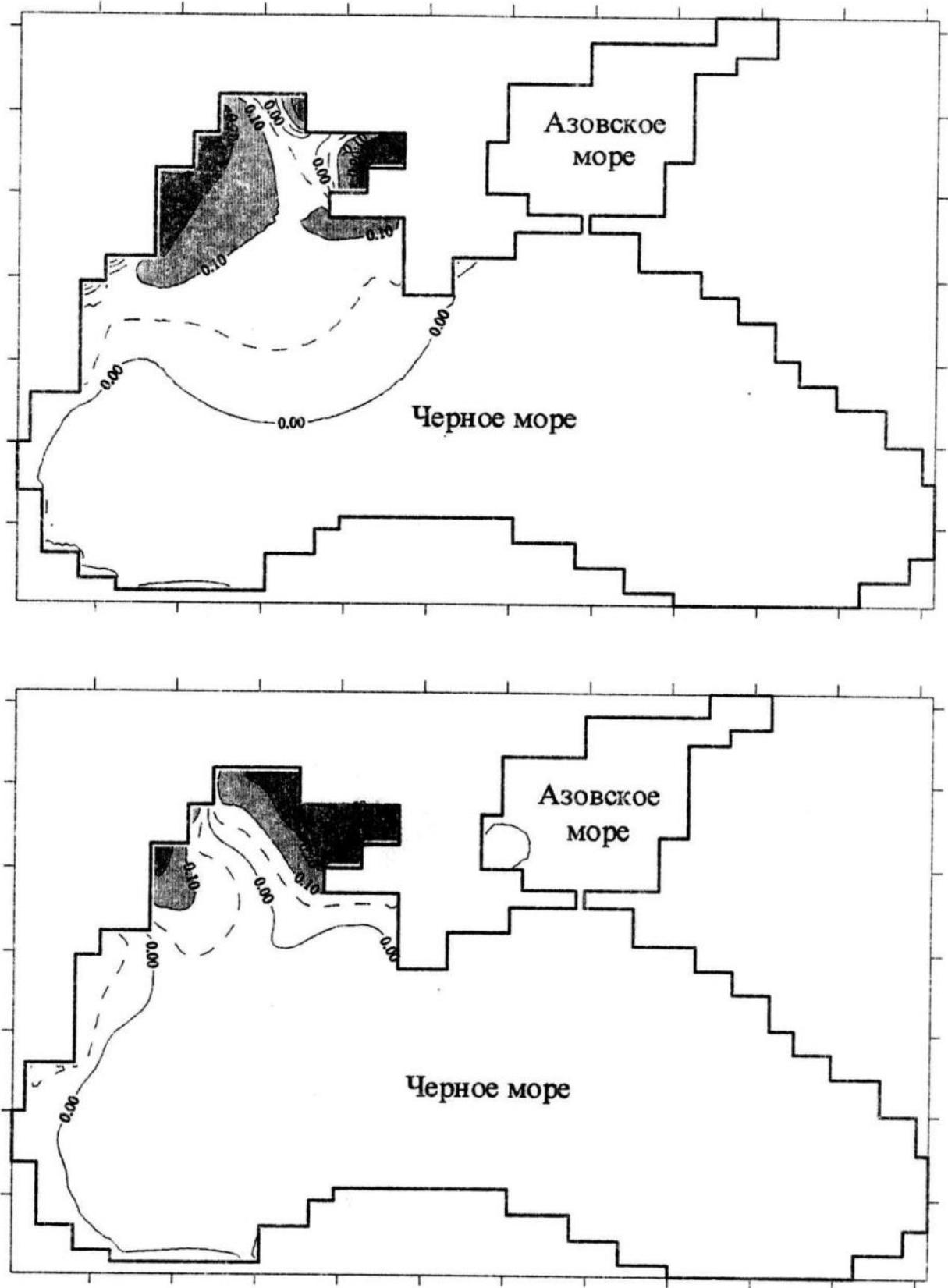


Рис 2. Поля отклонений уровня Азово-Черноморского бассейна при прохождении циклона по траектории 1 в моменты времени $t=19$ часов (а) и $t=26$ часов (б).

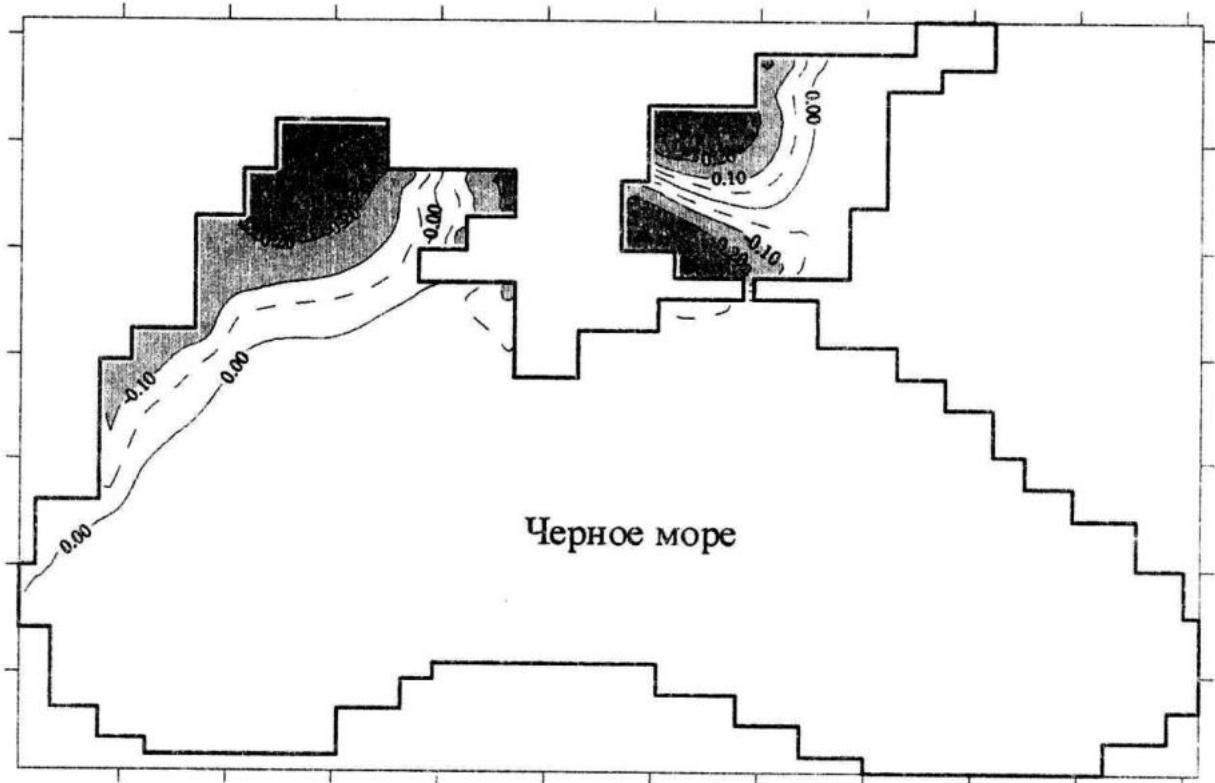
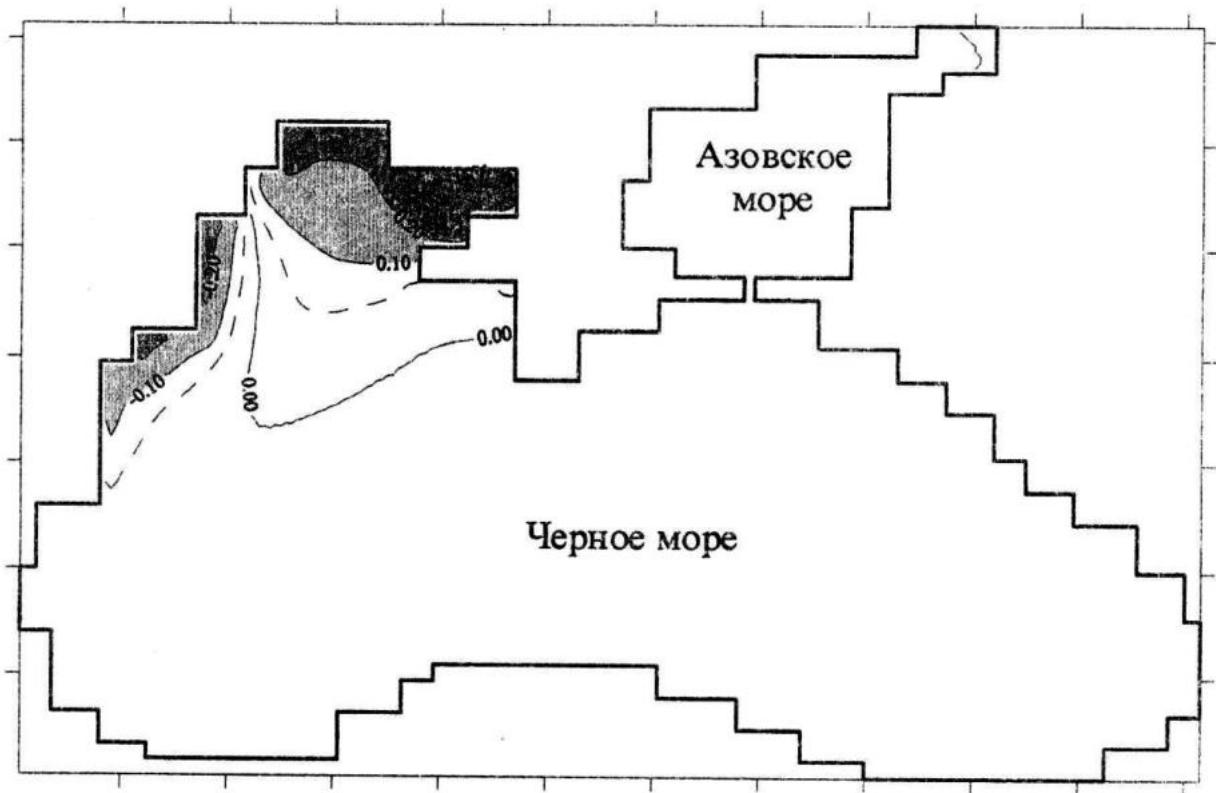


Рис 3. Поля отклонений уровня Азово-Черноморского бассейна при прохождении циклона по траектории 3 в моменты времени $t=11$ часов (а) и $t=16$ часов (б).

уровня этих морей на каждом шаге по времени определялся суммарный расход воды через Керченский пролив. Во всех расчетах давление внутри области, занятой циклоном определялось по формуле (4). При этом задавались следующие значения параметров: $p_0 = -10$ гПа; $R = 300$ км; $c = 10$ м/с.

Перейдем к анализу полученных результатов. На рис. 2 показаны поля отклонений уровня в Азово-Черноморском бассейне при прохождении циклона по траектории 1 для моментов времени $t = 19$ часов (центр циклона над северо-западной частью Черного моря) и $t = 26$ часов (задняя часть циклона над северо-западной частью Черного моря). Начальный момент времени $t = 0$ соответствует выходу передней (по ходу движения) части циклона на акваторию бассейна. Штриховкой выделены области, в которых отклонения уровня от невозмущенной поверхности (по модулю) превышают 0.1, 0.2 и 0.5 метра.

Как видно из рисунка 2, максимумы отклонений уровня получены в точках побережья северо-западной части Черного моря. Однако области существенных (более 0.1 м) отклонений уровня не ограничены узкой прибрежной зоной, а достаточно далеко выдаются в открытую часть моря и по площади соизмеримы с акваторией северо-западной части Черного моря. Так, для момента $t=19$ часов площадь области с $\zeta > 0.1$ м составляет 25000 км^2 , а область с $\zeta < 0.1$ м занимает 7000 км^2 . Соответствующие величины для поля отклонений уровня при $t=26$ часов составляют 15000 км^2 и 3250 км^2 . Указанные области расположены в мелководной северо-западной части Черно-

го моря и для них характерна значительная трансформация (изменение размеров и положения) по мере прохождения циклона. Отметим также отсутствие существенных возмущений уровенной поверхности Азовского моря. Это объясняется тем, что при данных траектории и радиусе циклона, область возмущений атмосферного давления не проходит над акваторией Азовского моря.

На рис. 3 приведены аналогичные распределения отклонений уровня в Азово-Черноморском бассейне в моменты $t=11$ часов и $t=16$ часов, соответствующие перемещению циклона по траектории 3. Из него видно, что как и в предыдущем случае (траектория 1), при прохождении циклона над северо-западной частью Черного моря в ней формируются значительные по площади области существенных (более 0.1 м) отклонений уровня моря различных знаков. При этом, образовавшаяся на западе Черного моря область пониженного уровня (рис. 3,а) по мере дальнейшей эволюции циклона увеличивается в размерах в северо-восточном направлении, вытесняя область повышенного уровня, и к моменту $t=16$ часов (рис. 3,б) достигает площади 30000 км^2 . Значительную деформацию испытывает и уровенная поверхность Азовского моря. На рис. 3,б хорошо видны образовавшиеся при движении циклона над этим бассейном области повышенного и пониженного более чем на 0.1 м уровня, суммарная площадь которых составляет значительную часть акватории моря.

Рассмотрим теперь влияние водообмена через Керченский пролив, вызываемого прохождением южных цикло-

нов, на уровенную поверхность Черного и Азовского морей.

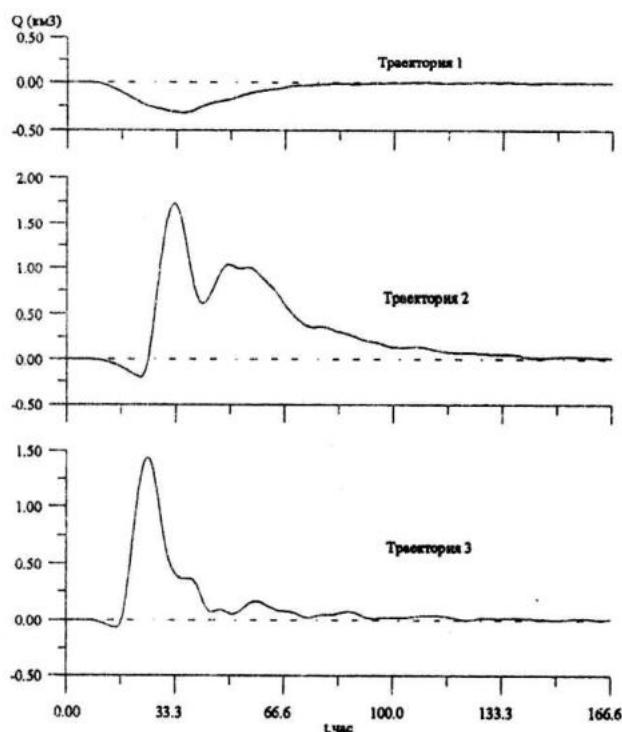


Рис. 4 Кривые интегрального водообмена через Керченский пролив при прохождении циклонов по различным траекториям.

Как отмечалось выше, в ходе численных экспериментов на каждом шаге по времени рассчитывались значения функции интегрального водообмена, определяемой выражением

$$Q(t_k) = \sum_{i=0}^k R(t_i) \delta t, \quad (7)$$

где $R(t_i)$ – расход воды через Керченский пролив на i -ом временном шаге, δt – величина шага по времени численной модели. Зависимости $Q(t)$ для каждой из рассмотренных траекторий движения циклона представлены на рис. 4. Здесь положительные значения Q соответствуют увеличению объема Азовского моря за счет черноморской воды, отрица-

тельные – свидетельствуют об увеличении объема вод Черного моря.

Как следует из последнего рисунка, характер и количественные показатели водообмена в значительной степени зависят от траектории циклона. Так, при перемещении циклона по траектории 1 отмечается поступление воды из Азовского в Черное море, что приводит к увеличению его объема на 0.3 км^3 . После ухода циклона ($t > 35$ час.) поток через Керченский пролив меняет направление на противоположное и баланс между объемами морей постепенно выравнивается.

При прохождении циклонов по траекториям 2 и 3 водообмен между морями имеет более сложный характер. Напомним, что перемещаясь по этим траекториям, циклоны пересекают акваторию Азовского моря. Сложный характер водообмена проявляется прежде всего в том, что направление потока через Керченский пролив неоднократно меняется как при движении циклона над поверхностью Азово-Черноморского бассейна, так и после ухода циклона за его границы.

Другой существенной особенностью водообмена в этих случаях является поступление значительного объема черноморских вод в Азовское море при прохождении циклона. Как видно из рис. 4, увеличение объема Азовского моря достигает 1.7 км^3 (траектория 2) и 1.4 км^3 (траектория 3).

Из-за разности площадей Черного и Азовского морей (422000 и 38000 км^2 соответственно), изменение их объема вследствие возникающего водообмена неодинаково отражается на средней уро-

венной поверхности этих бассейнов. Несложные расчеты показывают, что уменьшение объема Черного моря на 1.7 км³ приводит к понижению его среднего уровня на 0.4 см, а соответствующее увеличение объема Азовского моря влечет за собой рост его среднего уровня на 4.5 см. Таким образом, влияние водообмена через Керченский пролив, вызываемого движущимися циклонами, можно считать существенным только для уровня Азовского моря.

В заключение сформулируем основные выводы, полученные в данной работе.

Анализ результатов численных экспериментов свидетельствует о том, что при прохождении южных циклонов над Азово-Черноморским бассейном в северо-западной части Черного моря образуются значительные по площади (порядка десятков тысяч км²) области существенных (более 0.1 м) отклонений уровня моря различных знаков с максимумами на побережье. В процессе эволюции циклонов меняются как размеры, так и положение этих областей.

Области существенных отклонений уровня в Азовском море образуются только в случаях прохождения циклонов над акваторией данного бассейна.

Водообмен между Черным и Азовским морями через Керченский пролив, возникающий под действием перемещающихся циклонов, несущественно влияет на изменение уровенной поверхности Черного моря. В то же время, средний уровень Азовского моря под влиянием этого фактора может измениться на несколько сантиметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря./Под ред. Нелепо Б.А. -Л.: Гидрометеоиздат, 1984. -240 с.
2. Проект "Моря СССР". Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические исследования. -С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 1991
3. Проект "Моря СССР". Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, т. V, Азовское море. С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 1991, - 200 с.
4. Фомичева Л.А. Сгоны-нагоны, суточные колебания уровня и сейши Черного моря // Тр. ГОИН, 1975. Вып. 125, С. 48-59
5. Белов В.П., Филиппов Ю.Г. Влияние неоднородности поля ветра на величину сгонно-нагонных колебаний уровня мелкого моря на примере Азовского моря// Труды ГОИИ, вып. 143. М.: Гидрометеоиздат, 1979.
6. 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
7. Иванов В.А., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В. Математическое моделирование сгонно-нагонных колебаний в Черном море // Метеорология и Гидрология, 1999, №11, с.56-63.

8. Еремеев В.Н., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов // Океанология, 2000, т.40, № 5 с. 616-623
9. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 300 с.
10. Кричак О.Г. Синоптическая метеорология. -Л.: Гидрометеоиздат, 1956. -531 с.
11. Григоркина Р.Г., Фукс В.Р. Воздействие тайфунов на океан. -Л.: Гидрометеоиздат, 1986. -244 с.
12. Марчук Г.И., Каган Б.А. Океанские приливы -Л.: Гидрометеоиздат, 1977.- 296 с.
13. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы М.: Наука, 1977. 440 с.
14. Гришин Г.А., Баянкина Т.М., Калинин Е.И., Лундберг М.М. Об эволюции южных циклонов, выходящих на Черное море и территорию Украины, по данным спутниковых и наземных наблюдений // Исследование Земли из космоса. - 1991. -N 3. -C. 89-95.