

В.А. Иванов, В.В. Фомин, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга

Исследование влияния циклонических возмущений на динамические процессы и эволюцию примеси в Азовском море при наличии стационарных течений

С использованием трехмерной нелинейной математической модели изучаются динамические процессы под действием циклонических возмущений в поле стационарного ветра в Азовском море, а также особенности трансформации примеси. На основании результатов численных расчетов сделаны выводы о влиянии направления перемещения циклона на максимальные скорости генерируемых им течений. Установлено, что циклон, перемещающийся на запад, вызывает течения с большими максимальными скоростями, чем циклоны других направлений. Показано, что перемещение атмосферных возмущений приводит к существенному увеличению площади распространения загрязнения по сравнению с воздействием только стационарных течений. Исследовано влияние скоростей стационарных течений на максимальные скорости течений, вызванные прохождением циклона.

Одной из задач современной океанологии является изучение динамики вод в морских бассейнах и прогнозирование их будущих изменений, что связано с глобальными процессами потепления и растущим антропогенным воздействием. Особая роль в исследованиях отведена анализу наиболее вероятных сценариев распространения загрязнений, эволюция которых происходит в основном за счет переноса течениями. В Азовском море, сравнительно небольшом и мелководном бассейне, течения определяются, прежде всего, прямым воздействием ветра и рельефом дна. На основании результатов численного моделирования [1 – 3] показано, что динамика вод с прохождением циклонов над Азовским морем становится более интенсивной. Поэтому представляет интерес изучение влияния атмосферных аномалий типа циклонов на циркуляцию вод и распространение загрязнений в этом бассейне.

Численному моделированию динамики вод Азовского моря посвящен ряд работ, где с использованием трехмерной нелинейной σ -координатной модели [4] изучены основные характеристики ветровых течений, сгонно-нагонных процессов для типовых стационарных полей ветра [5] и для нестационарного и однородного по пространству ветра [6]. В [5] также выполнен анализ времени полного рассеивания примеси, максимальной площади загрязнения и трансформации примеси при наличии стационарных течений, в [7] те же процессы исследованы под действием переменного ветра.

В данной работе указанная выше математическая модель применена для изучения воздействия циклонических возмущений в поле стационарных течений на динамику вод и трансформацию пассивной примеси в Азовском море. Приводятся результаты численных расчетов для различных параметров атмосферных возмущений.

Постановка задачи. Граничные и начальные условия

Введем систему координат, в которой ось x направлена на восток, y – на север, z – вертикально вверх. Для расчета используем нелинейные уравнения

© В.А. Иванов, В.В. Фомин, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга, 2009

движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [4]:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{11}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{12}) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{21}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{22}) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

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

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

Здесь все обозначения общепринятые.

Компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса τ_{ij} в (1), (2) определяются через градиенты осредненных скоростей по формулам

$$\tau_{11} = 2A_M \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{12} = \tau_{21} = A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad \tau_{22} = 2A_M \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (5)$$

Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости A_M вычисляется с помощью формулы Смагоринского [8].

Граничные условия на свободной поверхности имеют вид

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad (6)$$

$$K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}). \quad (7)$$

Здесь $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$ и $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$ – проекции касательных напряжений ветра, W_x, W_y – компоненты вектора скорости ветра \mathbf{W} на высоте 10 м над уровнем моря с модулем $|\mathbf{W}| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$. Для численных расчетов коэффициент поверхностного трения выбран на основе соотношения [9]

$$C_a = \begin{cases} 1,14 \cdot 10^{-3}, & |\mathbf{W}| \leq 10 \text{ м/с}, \\ (1,49 + 0,065|\mathbf{W}|) \cdot 10^{-3}, & |\mathbf{W}| > 10 \text{ м/с}. \end{cases} \quad (8)$$

На боковых границах выполняется условие прилипания. На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости

$$\left(w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (9)$$

Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [4]

$$K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (10)$$

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 $C_b = k^2 \ln^{-2}(z_2/z_0)$, z_2 – шаг по вертикали в придонном слое, $z_0 = 0,003$ м – параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности).

В начальный момент времени $t = 0$ движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна, циклон находится за пределами акватории:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (11)$$

В качестве ветра, выводящего течения на установившийся режим, выбран однородный по пространству ветер, скорость которого \mathbf{W}_{st} первые 3 ч нарастает со временем по линейному закону, достигает своего максимального значения и далее не меняется. Для численных расчетов скорость и направление этого ветра выбраны на основании данных, приведенных в [10].

Степень приближения к установившемуся режиму оценивается по относительным изменениям полной энергии $E_S(t)$, которая находится как сумма осредненных по пространству кинетической $E_K(t)$ и потенциальной $E_P(t)$ энергий. Изменение E_S находим по формуле $\delta E_S^n = |E_S^{n+1} - E_S^n| / E_S^n$, где $E_S = E_K + E_P$, n – номер шага по времени. Считаем, что стационарный режим достигается при $\delta E_S^n \leq 10^{-2}$. Исходя из этого, определяем время установившегося движения жидкости, начала действия барических возмущений и выброса загрязнения при $t = t_0$.

Область загрязнения при $t = t_0$ расположена в поверхностном слое и имеет вид пятна радиусом R :

$$C_0(x, y, z, t_0) = \begin{cases} 1, & r \leq R, \quad 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, \quad z < 0; \quad r \leq R, \quad z < -z_1, \end{cases} \quad (12)$$

где $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ – расстояние от центра (x_0, y_0) возмущения до точки, в которой вычисляется концентрация; z_1 – толщина слоя области загрязнения.

Для расчета распространения концентрации C используем уравнение переноса диффузии [7]

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (13)$$

Здесь A_H и K_H – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии. К граничным условиям на свободной поверхности и в придонном слое при $t = t_0$ добавляются условия

$$\left(K_H \frac{\partial C}{\partial n} \right) \Big|_{z=\zeta} = 0, \quad (14)$$

$$\left(K_H \frac{\partial C}{\partial n} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (15)$$

На боковых границах выполняется условие отсутствия потока примеси в направлении внешней нормали \mathbf{n}

$$A_H \frac{\partial C}{\partial n} = 0. \quad (16)$$

Считая радиус циклонического образования равным R_c [11], представим атмосферное давление p_a в виде

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R_c}\right) + \tilde{p}_a, & r \leq R_c, \\ \tilde{p}_a, & r > R_c, \end{cases} \quad (17)$$

где \tilde{p}_a – фоновое значение давления; p_0 – максимальное отклонение от \tilde{p}_a в атмосферном возмущении; r – расстояние от центра движущегося циклона до точки с координатами (x, y) .

Согласно [12], в неподвижном циклоне рассчитываем ветер, умножая модуль вектора гециклострофической скорости W_g на эмпирический коэффициент $\mu = 0,7$; учитываем при этом, что направление ветра отклоняется от касательных к изобарам на угол $\gamma = 20^\circ$ (угол втока) против часовой стрелки. При условии, что барическое образование возникает над полем стационарного ветра и движется поступательно со скоростью \mathbf{c} , получим следующее выражение для скорости приводного ветра:

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mathbf{W}_{st} + \mu W_g T(90^\circ + \gamma) \frac{\mathbf{r}}{r} + \mathbf{c}, & r \leq R_c, \\ \mathbf{W}_{st}, & r > R_c, \end{cases} \quad (18)$$

где $W_g = -\frac{fr}{2} + \left[\left(\frac{fr}{2} \right)^2 + \frac{(p_a)_r r}{\rho_a} \right]^{1/2}$ – гециклострофическая скорость,

$(p_a)_r$ – радиальный градиент атмосферного давления; вектор \mathbf{r} направлен от центра циклона к точке, в которой вычисляется \mathbf{W} ; $T(\alpha)$ – матрица поворота на угол α .

Численная реализация модели и выбор параметров. В исходных уравнениях (1) – (4), (13), граничных условиях (6), (7), (9), (10), (13) – (16) и начальных условиях (11) осуществляется переход от координаты z к σ -координате [4, 7]:

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = (z - \zeta)/(H + \zeta), \quad t^* = t, \quad \sigma \in [-1; 0]. \quad (19)$$

В численных экспериментах используются равномерные шаги по горизонтальным координатам $\Delta x = \Delta y = 1350$ м и по σ -координате. Количество расчетных уровней по вертикали равно 11. Уравнения решаются с шагом $\Delta t = 18$ с для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря и с шагом $10\Delta t$ – для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компоненты скорости. Рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря в узлах сетки сняты с навигационных карт.

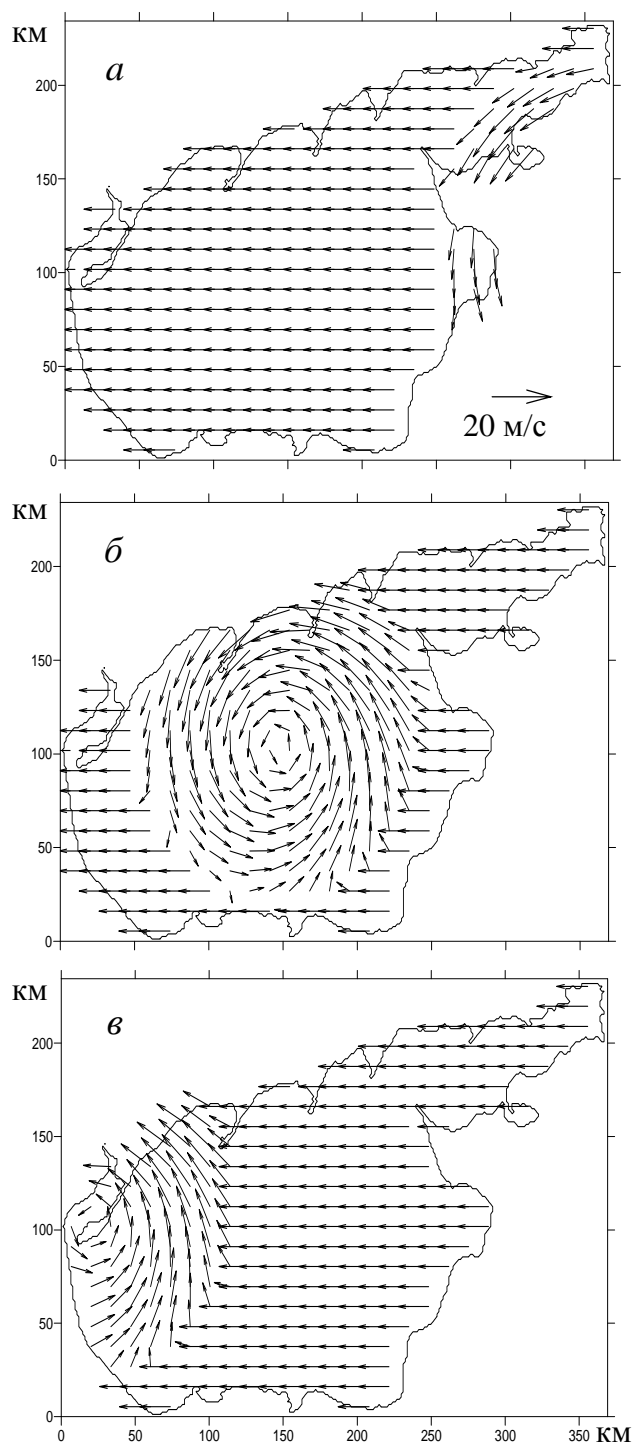
Анализ численных экспериментов

Наибольшую повторяемость в осенний период имеют ветры северо-восточного и восточного направлений со скоростями 5 – 15 м/с [10]. В летний период наибольшую непрерывную продолжительность (до 2,5 сут) имеют ветры юго-восточного направления. Таким образом, в численных расчетах выход течений на установившийся режим осуществляется постоянным восточным ветром, скорость которого изменяется в пределах 5 – 15 м/с ($\mathbf{W}_{st}^1 = 5$, $\mathbf{W}_{st}^2 = 2\mathbf{W}_{st}^1 = 10$, $\mathbf{W}_{st}^3 = 3\mathbf{W}_{st}^1 = 15$).

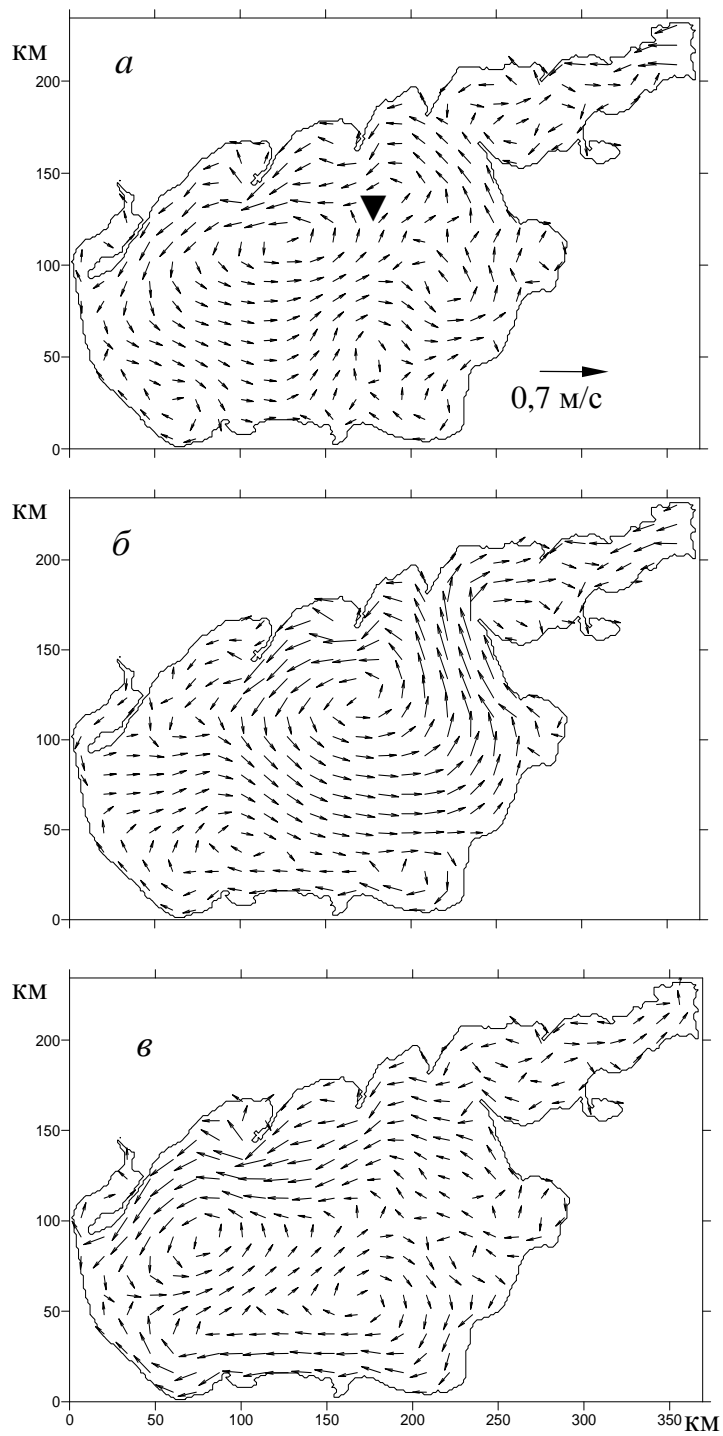
Как следует из анализа метеорологической информации [10], над Азовским морем даже в течение одного месяца наблюдается частая смена ветров различных направлений. Поэтому моделирование циркуляции вод и распространения примеси проводится при условии, что циклонические атмосферные возмущения могут иметь направления и скорости перемещения, не совпадающие с направлением и скоростью постоянного ветра, выводящего течения на установившийся режим. Предполагается, что по мере своего перемещения центр циклона пересекает Азовское море по заданной траектории и проходит через его центральную часть ($x = 173$ км, $y = 79$ км). Время выхода течений на установившийся режим, перемещения по всей акватории и полного рассеяния примеси составляет время расчета численных экспериментов. Загрязнение считается рассеявшимся при условии, что максимум концентрации C_d становится равным $2,5 \cdot 10^{-2}$.

1. В первой серии численных экспериментов исследуется влияние различных направлений перемещения циклонов на отклонения уровня и поля скоростей течений. Согласно данным наблюдений [11] полагаем, что циклон перемещается со скоростью 5 м/с, имеет радиус 100 км, перепад давления между центром и периферией составляет 15 гПа. Расчеты проведены для его передвижения на юго-запад (ЮЗ), запад (З) и северо-запад (СЗ). Указанные направления составляют с осью x углы 135° , 180° и 225° соответственно.

На рис. 1 представлены поля ветра на высоте 10 м над Азовским морем, которые соответствуют различным этапам перемещения атмосферного образования. Через 1 ч от начального момента времени $t = t_0$ циклон входит в акваторию (рис. 1, а), затем при $t = t_0 + 8$ ч (рис. 1, б) пересекает центральную часть моря и при $t = t_0 + 15$ ч (рис. 1, в) уходит из акватории.



Р и с. 1. Поля скоростей приводного ветра при перемещении циклона на запад со скоростью 5 м/с: *а* – циклон вошел в акваторию ($t = t_0 + 1$ ч), *б* – пересекает центральную часть моря ($t = t_0 + 8$ ч), *в* – уходит из акватории ($t = t_0 + 15$ ч)

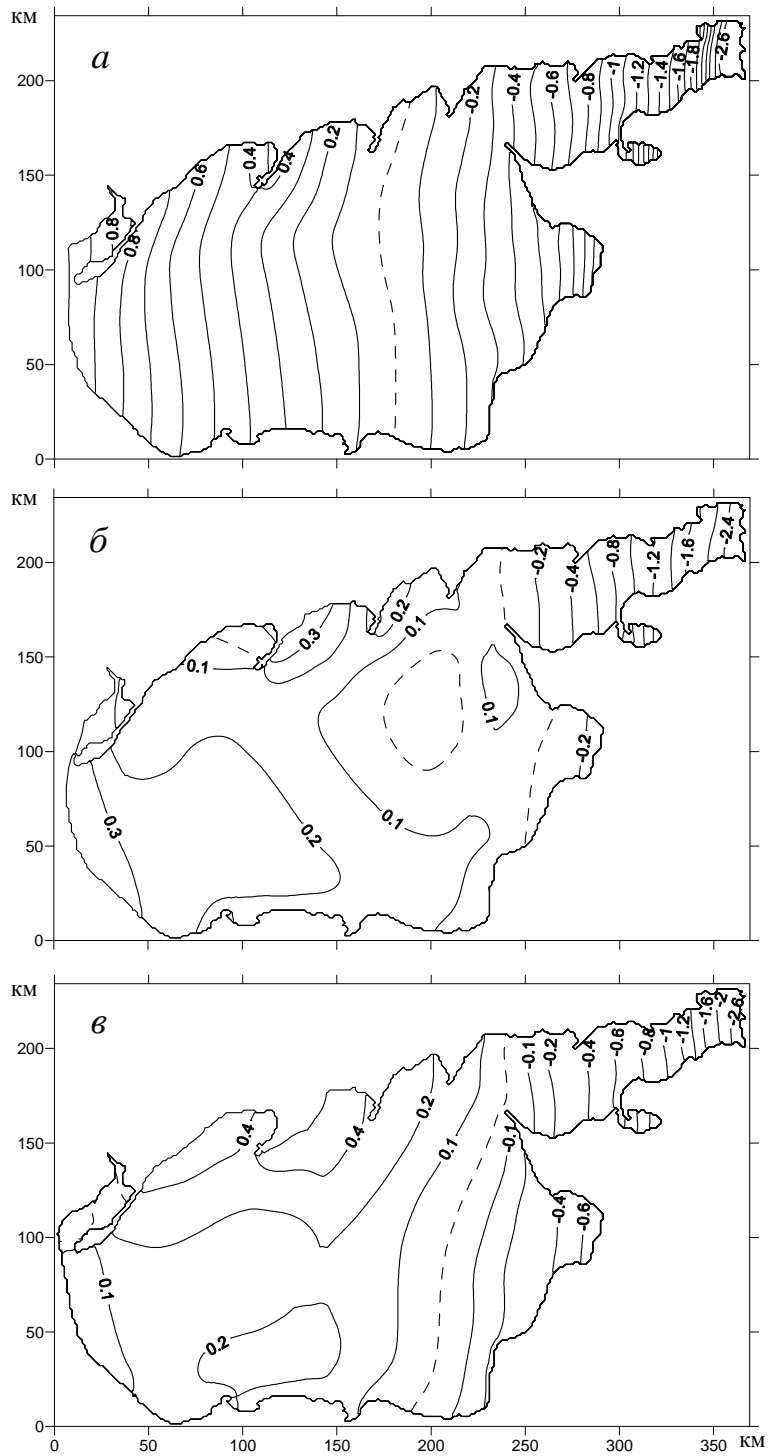


Р и с. 2. Поля скоростей течений в Азовском море (в те же моменты времени, что на рис. 1)

На рис. 2 в те же моменты времени приведены поля течений на поверхности моря, генерируемые циклоном, движущимся на запад. Для стационарного режима (рис. 2, а) характерно преобладающее направление течений в сторону действующего ветра и наличие в центре северной части бассейна одного антициклонического вихря. С началом действия циклона структура установившихся течений изменяется (рис. 2, б). Их направление спустя 8 ч (циклон пересекает центральную часть моря) в одних районах противоположно направлению перемещения циклона, в других – перпендикулярно ему. Через 15 ч (рис. 2, в), когда циклон уходит из акватории, в северной части моря и Таганрогском заливе преобладает направление течений в сторону атмосферных возмущений, в центральной части – под углом 90° к ним.

Поля уровня моря для указанных параметров циклона, полученные в результате моделирования, показаны на рис. 3 (в те же моменты времени). Из их анализа следует, что в установившемся режиме (рис. 3, а) имеет место понижение уровня вдоль западного побережья (сгоны) и повышение – вдоль восточного берега (нагоны). Узловая линия (показана штриховой) пересекает центральную часть моря, она ориентирована перпендикулярно направлению ветра. Через 8 ч после начала действия циклона (рис. 3, б) изолиния нулевых отклонений уровня уже имеет эллиптическую форму и смещается от центра на запад. Большая ось этого эллипса ориентирована в меридиональном направлении, малая – в зональном. Центр эллипса приблизительно совпадает с узловой линией установившегося режима, разделяющей море на зоны сгона и нагона. С удалением на восток колебания постепенно возрастают и наибольших значений достигают вблизи Мариуполя. При дальнейшем движении к Таганрогскому заливу появляются области небольших понижений уровня. К западу от центра эллипса (рис. 3, б) колебания уровня не превышают 3 см. С уходом циклона (рис. 3, в) одна из узловых линий проходит через центральную часть моря, она ориентирована практически так же, как в установившемся режиме. В восточной части моря вновь отмечается подъем уровня, в западной части – его понижение.

В табл. 1 приведены зависимости максимальных скоростей течений от начальных скоростей стационарных течений (СТ) и направления перемещения циклонов (скорость 5 м/с, радиус 100 км). Видно, что при увеличении скорости постоянного ветра в 2 и 3 раза скорости стационарных течений на поверхности достигают 14; 34; 62 см/с, т.е. возрастают соответственно в 1,8 и 4,4 раза. С прохождением циклонов над акваторией скорости течений на всех горизонтах резко увеличиваются. Наибольшие максимальные скорости имеют место при движении атмосферных возмущений на запад, наименьшие – на северо-запад. Сравнивая генерируемые циклоном в западном направлении скорости течений в поверхностном слое (86, 108, 126 см/с), отметим их рост в 1,2 и 1,4 раза. Такое же характерное соотношение скоростей течений прослеживается и на других горизонтах. Под действием атмосферных возмущений происходит увеличение скорости течений с глубиной, наибольшее значение отмечается в придонном слое.



Р и с. 3. Поля уровня Азовского моря (в те же моменты времени, что на рис. 1)

Скорости стационарных течений и максимальные скорости течений (м/с), вызванных прохождением циклонов, при трех скоростях постоянного ветра и трех характерных направлениях перемещения циклонов

Глубина, м	$W_{st}^1 = 5 \text{ м/с}$				$W_{st}^2 = 10 \text{ м/с}$				$W_{st}^3 = 15 \text{ м/с}$			
	СТ	Направление циклона			СТ	Направление циклона			СТ	Направление циклона		
		ЮЗ	З	СЗ		ЮЗ	З	СЗ		ЮЗ	З	СЗ
0	0,14	0,83	0,86	0,80	0,34	1,07	1,08	1,02	0,62	1,25	1,26	1,21
3	0,11	0,77	0,79	0,74	0,28	0,99	1,00	0,96	0,52	1,17	1,16	1,13
5	0,09	0,72	0,75	0,70	0,24	0,93	0,94	0,90	0,46	1,10	1,10	1,06
10	0,06	0,50	0,52	0,49	0,17	0,65	0,66	0,63	0,32	0,77	0,77	0,74

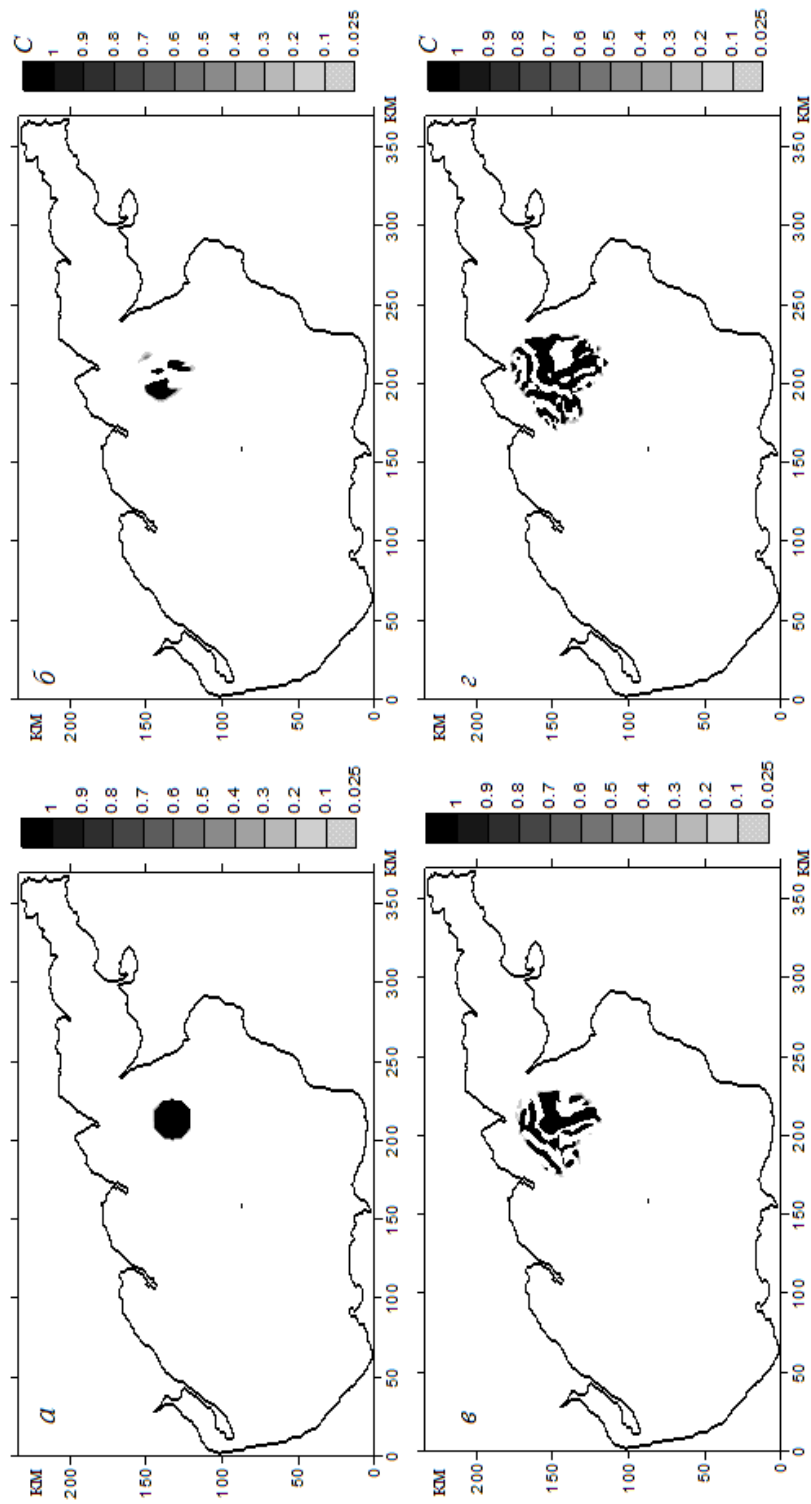
По данным, приведенным в табл. 1, проанализируем влияние различных направлений перемещения циклонов, действующих над полем стационарных течений, установившихся при $W_{st}^3 = 15 \text{ м/с}$. Максимальные скорости течений на поверхности моря составляют 1,25; 1,26 и 1,21 м/с. Они отличаются незначительно, разница между наибольшим на западе и наименьшим на северо-западе значениями скорости 4,1%.

Следовательно, скорости течений, вызванные прохождением циклонов, мало зависят от скоростей начальных стационарных течений. Изменение направления перемещения циклона приводит к небольшим различиям максимальных скоростей течений.

2. В следующей серии численных экспериментов оценим влияние параметров атмосферных возмущений на размеры области проникновения и время полного рассеяния пассивной примеси от мгновенного источника. Поступившие в море загрязняющие вещества распространяются под действием турбулентной диффузии. Они также переносятся ветровыми течениями, возбуждаемыми системой ветров, слагаемых из постоянного ветра и вызванных прохождением циклонов неоднородного и переменного ветров.

На рис. 2, а темным треугольником показано место выброса загрязнения над самой глубоководной ($H = 12 \text{ м}$) частью, координаты центра $x_0 = 180 \text{ км}$, $y_0 = 120 \text{ км}$. Радиус пятна примеси принимается равным 9 км. Для расчета областей загрязнений вследствие процессов адвекции и диффузии выбраны следующие значения коэффициентов: $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$, $K_H = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [13]. При решении этой задачи принимаем за начало отсчета время выброса загрязнений ($t = t_0$) в момент выхода течений на установившийся режим.

Для количественной оценки площади распространения загрязнений введем безразмерную величину K_{\max} . Ее коэффициент рассчитывается как отношение максимальной площади S_{\max} , ограниченной изолинией концентрации примеси C_d , в момент времени $t = t_{\max}$ к площади первоначального загрязнения S_0 при $t = t_0$ ($K_{\max} = S_{\max} / S_0$).



Р и с. 4. Трансформация области загрязнения при перемещении циклона радиусом 100 км на запад со скоростью 5 м/с: *а, б, в* даны в те же моменты времени, что на рис. 1, *г*, – через 30 ч после ухода циклона

В первом численном эксперименте исследуется перенос примеси в установившемся режиме, вызванный действием постоянного ветра со скоростями 5 – 15 м/с. Оценим параметры проникновения аварийных выбросов при скорости ветра 15 м/с, которые, согласно работе [8], будут наибольшими. В месте поступления загрязняющих веществ стационарные течения на поверхности со скоростью 62 см/с направлены в сторону действующего ветра (рис. 2, а), где наблюдается перенос примеси (рис. 4). Эти области с течением времени все больше вытягиваются в западном направлении. Опускание примеси на горизонт $z = -H/2$ происходит через 2 ч, в придонный слой – спустя 9 ч. На этих глубинах области концентрации имеют форму, также вытянутую в западном направлении.

В рассматриваемом поле установившихся течений максимум площади, занятой загрязнением на поверхности, составляет 1,22 ($t_{\max} = 3$ ч), на глубине $z = -H/2$ – 1,23 ($t_{\max} = 10$ ч), в придонном слое – 1,22 ($t_{\max} = 25$ ч). Полное рассеяние происходит через 53 ч с момента выброса, при этом с течением времени направление трансформации примеси существенно не меняется.

Рассмотрим более подробно эволюцию области загрязняющих веществ под действием атмосферного образования радиусом 100 км, движущегося на запад со скоростью 5 м/с. Его воздействие происходит в поле установившихся течений, вызванных ветром с наименьшей из рассматриваемых скоростей (5 м/с). В районе аварийного выброса скорости установившихся течений составляют: в поверхностном слое 14 см/с, при $z = -H/2$ – 9 см/с, у дна 6 см/с. Вследствие прохождения циклона эти скорости увеличиваются и достигают максимальных значений: при $z = 0$ – 86 см/с (через 15 ч), при $z = -H/2$ – 75 см/с (через 18 ч), при $z = -H$ – 52 см/с (через 20 ч). Увеличение скоростей течений на указанных глубинах составляет 6,2; 8,3; 8,6 раза.

В процессе перемещения атмосферного образования меняется направление приводного ветра и как следствие – направление генерируемых им течений. В результате области загрязнения первые 2 ч перемещаются на запад, в направлении стационарных течений (рис. 4, а), а затем через 10 ч распадаются на несколько небольших фрагментов (рис. 4, б, в). Части области переносятся от центра выброса в различных направлениях на значительные расстояния и спустя 30 ч достигают северного побережья Азовского моря в районе Бердянска и Мариуполя (рис. 4, г). С течением времени участки загрязняющих веществ переносятся на запад. Полное рассеяние происходит через 149 ч, что в 2,7 раза превышает время рассеяния такой же области загрязнения в установившемся режиме.

Исследуем влияние направления атмосферных образований радиусом 100 км, движущихся со скоростью 5 м/с, на эволюцию области загрязнения с теми же параметрами, которые рассматривались ранее в установившемся режиме. Для циклонов различных направлений время проникновения примеси на глубину $z = -H/2$ длится значительно дольше, чем в установившемся режиме, и составляет 15 ч после ее выброса на поверхность. Более продолжительным (до 20 ч) становится также опускание загрязняющих веществ в придонный слой. Таким образом, вертикальное распространение примеси под действием циклона замедляется по сравнению со стационарным случаем в 7,5 раза ($z = -H/2$) и в 2,2 раза ($z = -H$).

В табл. 2 приведены коэффициент максимального охвата области загрязнения, время его достижения и полного рассеяния примеси на различных глубинах моря в установившемся режиме и под действием циклонов, перемещающихся со скоростью 5 м/с в различных направлениях. Согласно этим данным, циклоны оказывают существенное влияние на параметры распространения примеси. При западном направлении параметры проникновения и время полного рассеяния областей загрязнения наибольшие. Сравнивая значения K_{\max} для этого направления циклона с полученными при расчетах при наличии только стационарных течений, отметим их более чем восьмикратное увеличение на различных горизонтах.

Т а б л и ц а 2

Параметры эволюции примеси на различных глубинах под действием стационарных течений и циклонов, перемещающихся в трех направлениях

Глубина, м	Максимальные значения K и t , ч	$W_{st}^1 = 5$ м/с				$W_{st}^2 = 10$ м/с				$W_{st}^3 = 15$ м/с			
		СТ	Направление циклона			СТ	Направление циклона			СТ	Направление циклона		
			ЮЗ	З	СЗ		ЮЗ	З	СЗ		ЮЗ	З	СЗ
0	K_{\max}	1,14	7,52	7,75	7,24	1,19	8,63	8,69	8,66	1,22	8,91	9,15	8,78
	t_{\max}	4	140	142	141	3	150	156	150	3	162	165	162
	t_d	18	149	150	149	17	162	167	162	17	170	175	170
5	K_{\max}	1,17	7,65	7,98	7,39	1,18	8,56	8,61	8,59	1,23	9,08	9,16	8,93
	t_{\max}	13	140	143	141	10	151	157	151	10	162	166	162
	t_d	35	150	151	150	34	163	168	163	33	170	176	170
10	K_{\max}	1,12	7,29	7,67	7,00	1,17	8,48	8,54	8,52	1,22	8,87	9,09	8,72
	t_{\max}	23	140	143	141	21	151	157	151	15	163	166	162
	t_d	57	150	151	151	55	163	168	163	53	170	176	170

Площадь распространения загрязнения зависит от скорости ветра, выводящего течения на установившийся режим, и от направления перемещения циклона. Видно, что с ростом W_{st} (табл. 1) становятся больше скорости течений в установившемся режиме, в связи с этим увеличиваются область проникновения и время полного рассеяния примеси (табл. 2). Согласно приведенным данным, максимальное время полного рассеяния при W_{st}^3 (176 ч) в 1,2 раза больше, чем при W_{st}^1 (151 ч).

Выводы

Сформулируем основные результаты проведенных исследований:

– в поле стационарных течений движущийся в западном направлении циклон генерирует движение жидкости, скорость которой больше скорости течений, возникающих под действием циклона, перемещающегося на юго-запад или северо-запад;

- при наличии стационарного движения жидкости перемещение циклона приводит к существенному увеличению площади вертикального распространения загрязнения по сравнению с действием только стационарного течения;
- увеличение скоростей стационарного ветра от 5 до 15 м/с приводит к росту на 40% скоростей течений при прохождении одного и того же циклона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Еремеев В.Н., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов // *Океанология*. – 2000. – 40, № 5. – С. 658 – 665.
2. *Иванов В.А., Коновалов А.В., Черкесов Л.В.* Влияние циклонов на изменение уровня поверхности Азовского и Черного морей // *Метеорология и гидрология*. – 2003. – №4. – С. 73 – 80.
3. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2006. – №11. – С. 109 – 113.
4. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // *Научные труды УкрНИГМИ*. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
5. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование эволюции поля приливи в Азовском море при наличии стационарных течений // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2007. – №7. – С. 160 – 120.
6. *Фомин В.В., Шульга Т.Я.* Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // Там же. – 2006. – №12. – С. 110 – 115.
7. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния течений, вызванных западным ветром, на эволюцию областей загрязнения в Азовском море // Там же. – 2007. – №3. – С. 112 – 117.
8. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // *Mon. Weather Rev.* – 1963. – 91. – P. 99 – 164.
9. *Large W.G., Pond S.* Open ocean momentum fluxes in moderate to strong winds // *J. Phys. Oceanogr.* – 1981. – 11. – P. 324 – 326.
10. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том III. Азовское море.* – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 218 с.
11. *Алексеев Д.В., Иванча Е.В., Иванов В.А. и др.* Моделирование эволюции волновых полей в районе северо-западного шельфа Черного моря при прохождении циклона // *Морской гидрофизический журнал*. – 2005. – №1. – С. 42 – 54.
12. *Григоркина Р.Г., Фукс В.Р.* Воздействие тайфунов на океан. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 244 с.
13. *Якушев Е.В., Сухинов А.И., Лукашев Ю.Ф. и др.* Комплексные океанологические исследования Азовского моря в 28-м рейсе научно-исследовательского судна «Акванавт» (июль – август 2001 г.) // *Океанология*. – 2003. – 43, №1. – С. 44 – 53.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 07.09.07
После доработки 18.09.07

ABSTRACT Using three-dimensional nonlinear mathematical model, dynamic processes affected by cyclonic disturbances in the field of stationary wind in the Azov Sea, and also peculiarities of impurity transformation are studied. Based on the results of numerical calculations, the conclusions on the influence of direction of a moving cyclone upon maximum velocities of the generated currents are drawn. It is revealed that the westward moving cyclone induces the currents with considerably higher velocities than those of other directions. It is shown that movement of atmospheric disturbances results in more significant increase of the contaminated area as compared to the influence only of stationary currents. Influence of the velocities of stationary currents upon the maximum velocities of the cyclone-induced ones is studied.