

Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга

Исследование зависимости эволюции примеси от начального распределения ее концентрации и параметров циклона

В работе с использованием трехмерной нелинейной математической модели изучаются процессы переноса и диффузии загрязняющих веществ в Азовском море в случае циклонических атмосферных возмущений. Выполнено сравнение времени рассеяния, а также максимального объема проникновения примеси (с постоянными и переменными начальными распределениями ее концентрации) при наличии циклона и на «тихой» воде. Показано, что рассеяние примеси замедляется с увеличением градиента ее начальной концентрации.

Ключевые слова: скорость течения, сгонно-нагонные явления, прогностические поля ветра, трехмерная нелинейная модель.

Введение. Акватория Азовского моря и прибрежные зоны представляют собой единый территориальный регион, который требует организации рационального природопользования и обеспечения экологической безопасности. В прибрежных областях, как правило, располагаются крупные промышленные центры. Интенсивное развитие производительных сил, хозяйственное освоение природных ресурсов морей ставит перед исследователями этих районов ряд важных задач. Большое значение приобретает прогноз ожидаемых изменений в гидрологическом режиме, происходящих в результате естественных процессов и хозяйственной деятельности.

В связи с тем, что прямые эксперименты с природными экосистемами затруднены, математическое моделирование является одним из наиболее перспективных методов прогнозирования динамических процессов и их влияния на распространение загрязнений в морских бассейнах. Результаты расчетов ветровых течений и уровня моря на основе трехмерной гидродинамической модели позволяют специалистам построить карты течений и распространения загрязнений на различных горизонтах.

Для численного моделирования динамических процессов в Азовском море используется трехмерная нелинейная σ -координатная модель [1, 2], в которой применяются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики. На ее основе изучены характеристики ветровых течений, сгонно-нагонных процессов для стационарного и однородного по пространству ветра [3] и типовых нестационарных полей ветра [4, 5]. В указанных работах также выполнен анализ времени полного рассеяния примеси постоянной начальной концентрации и ее трансформации при наличии стационарных течений.

В данной работе изучается влияние переменного начального распределения концентрации примеси на время ее рассеяния и максимальный объем области загрязнения при движении циклона. Показано, что неоднородное начальное распределение поля концентрации примеси приводит к уменьшению объема области загрязнения по сравнению со случаем постоянной начальной

концентрации. Получены зависимости изменения площади области загрязнения на различных горизонтах от изменения градиента начальной концентрации примеси.

Постановка задачи. Граничные и начальные условия. Для расчета используем нелинейные уравнения движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [1, 2]:

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

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

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

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

В этих уравнениях все обозначения – общепринятые. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости A_M вычисляется с помощью формулы Смагоринского [6], для параметризации коэффициента вертикальной турбулентной вязкости K_M применяется теория Меллора – Ямады [7].

Граничные условия на свободной поверхности имеют вид

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

Здесь $\tau_{0x} = \rho_a c_a W_x |\mathbf{W}|$, $\tau_{0y} = \rho_a c_a W_y |\mathbf{W}|$ – проекции касательных напряжений ветра; c_a – коэффициент поверхностного трения [8], зависящий от скорости ветра \mathbf{W} :

$$c_a = k^2 (14,56 - 2 \ln W_0)^{-2}, \quad (6)$$

где $k = 0,4$ – постоянная Кармана; $W_0 = |\mathbf{W}|/W_1$; $W_1 = 1$ м/с.

На дне ($z = H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [2]

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

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 $c_b = k^2 / (\ln^2 z_b / z_0)$; $z_b = h_2$ – шаг по вертикали в придонном слое, $z_0 = 0,003$ м – параметр шероховатости донной поверхности.

В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна:

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

Для расчета изменения со временем концентрации примеси C используем уравнение переноса и диффузии [1]

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (9)$$

Здесь A_H и K_H – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии. На свободной поверхности, в придонном слое и на боковых границах добавляются условия

$$\left(K_H \frac{\partial C}{\partial n} \right) \Big|_{z=\zeta} = 0, \quad \left(K_H \frac{\partial C}{\partial n} \right) \Big|_{z=-H} = 0, \quad A_H \frac{\partial C}{\partial n} = 0. \quad (10)$$

Они означают отсутствие потоков примеси в направлении внешней нормали \mathbf{n} через свободную поверхность, боковые стенки и дно бассейна.

При $t = t_0$ над поверхностью Азовского моря возникает переменный по пространству и времени ветер, вызванный перемещением циклона, центр которого пересекает центральную часть моря. В это же время происходит выброс загрязнения в поверхностном слое моря в виде цилиндрической области радиусом R и глубиной h_1 . При указанных ветровых условиях [9, 10] исследованы параметры эволюции примеси, начальное значение концентрации которой постоянно в данной области ($C_{01}(x, y, z, 0) = 1$).

В этой работе численные эксперименты по распространению загрязнения проведем при условии, что концентрация примеси в момент времени $t = t_0$ убывает с удалением от центра области. Пусть изменение поля концентрации от максимального значения (в центре выброса) до нуля (на границе области) происходит по линейному закону

$$C_{02}(x, y, z, 0) = \begin{cases} C_{\max}(R - r_1)/R, & r_1 \leq R, \quad 0 \geq z \geq -h_1, \\ 0, & r_1 > R, \quad z < 0; \quad r_1 \leq R, \quad z < -h_1, \end{cases} \quad (11)$$

где $r_1 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ – расстояние от центра (x_0, y_0) области загрязнения до точки, в которой вычисляется концентрация; C_{\max} – максимальное значение концентрации в центре области.

Сравнительный анализ результатов моделирования эволюции примеси, имеющей постоянное и переменное распределение начальной концентрации, проводится путем сопоставления величин параметров, характеризующих ее эволюцию. В качестве таких параметров выбраны: коэффициент максимальной площади распространения примеси на каждом уровне K_{\max} ; коэффициент максимального объема проникновения загрязнения N_{\max} ; время полного рассеяния примеси t_d . При этом условием полного рассеяния примеси принимается значение концентрации (C_d), которое не превышает $2,5 \cdot 10^{-2}$ во всей акватории моря.

Безразмерный параметр распространения примеси, определяющий наибольшую занимаемую ею площадь на горизонтах $z = 0$, $z = -H/2$, $z = -H+h_2$, вычисляется по формуле $K_{\max} = S_{\max}/S_0$. Здесь S_{\max} – максимальная площадь, ограниченная изолинией $C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$ в момент времени $t = t_{\max}$; S_0 – площадь области первоначального загрязнения при $t = t_0$ на свободной поверхности.

Соотношение для вычисления коэффициента максимального объема проникновения загрязнения имеет вид: $N_{\max} = V_{\max}/V_0$, где V_{\max} – максимальный объем, охваченный примесью с концентрацией $C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$ в момент времени $t = t_{\max}$; V_0 – объем области первоначального загрязнения при $t = t_0$.

Преобладающим типом волнения в Азовском море является ветровое, которое быстро развивается и так же быстро прекращается после уменьшения скорости ветра [11]. Основные течения в море формируются в прямой зависимости от действующего ветра. Для циклонического образования радиусом основания R_c атмосферное давление p_a находится из соотношения [12]

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R_c}\right) + \tilde{p}_a, & r \leq R_c, \\ \tilde{p}_a, & r > R_c. \end{cases} \quad (12)$$

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

Согласно работе [13], рассчитываем скорость ветра в неподвижном циклоне, умножая модуль вектора геострофической скорости W_g на эмпирический коэффициент $\mu = 0,7$; учитываем, что направление ветра отклоняется от касательных к изобарам на угол $\gamma = 20^\circ$ (угол втока) против часовой стрелки. При условии, что барическое образование движется поступательно со скоростью \mathbf{c} , получаем такое выражение для скорости приводного ветра:

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mu W_g T(90^\circ + \gamma) \frac{\mathbf{r}}{r} + \mathbf{c}, & r \leq R_c, \\ 0, & r > R_c, \end{cases} \quad (13)$$

где $W_g = -\frac{fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{fr}{2}\right)^2 + \frac{(p_a)_r r}{\rho_a}}$ – геострофическая 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 .

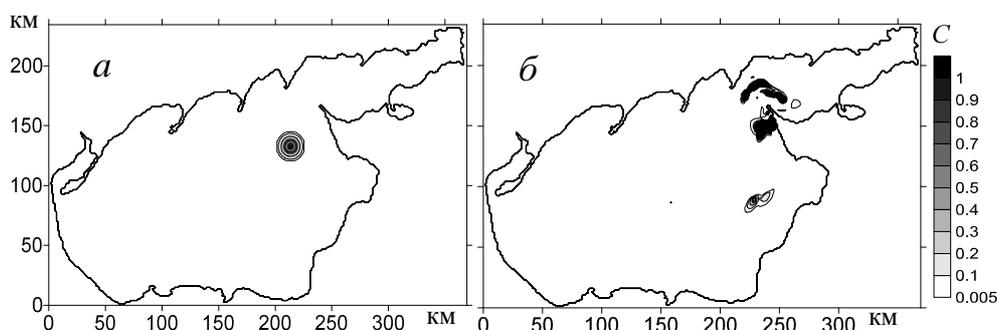
Численная реализация модели и выбор параметров. В исходных уравнениях (1) – (4), граничных условиях (5), (7) и начальных условиях (8) осуществляется переход от координаты z к σ -координате [1, 2] посредством соотношений $x^* = x$, $y^* = y$, $\sigma = [z - \zeta]/[H + \zeta]$, $t^* = t$ ($\sigma \in [-1; 0]$). Пространственное разрешение модели по широте и долготе составляет $(1/59)^\circ \times (1/84)^\circ$, при этом линейные размеры ячейки сетки (Δx и Δy) не превышают 1,4 км.

Количество узлов горизонтальной сетки и расчетных уровней по вертикали равно 276×176 и 11 соответственно. Уравнения интегрируются с шагом $\Delta t = 18$ с для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря и $10\Delta t = 3$ мин – для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компонент скорости.

Топография дна расчетной области на модельную сетку интерполирована, исходя из массива глубин, взятого с навигационных карт. Отклонения уровня моря анализируются для девяти точек морского побережья.

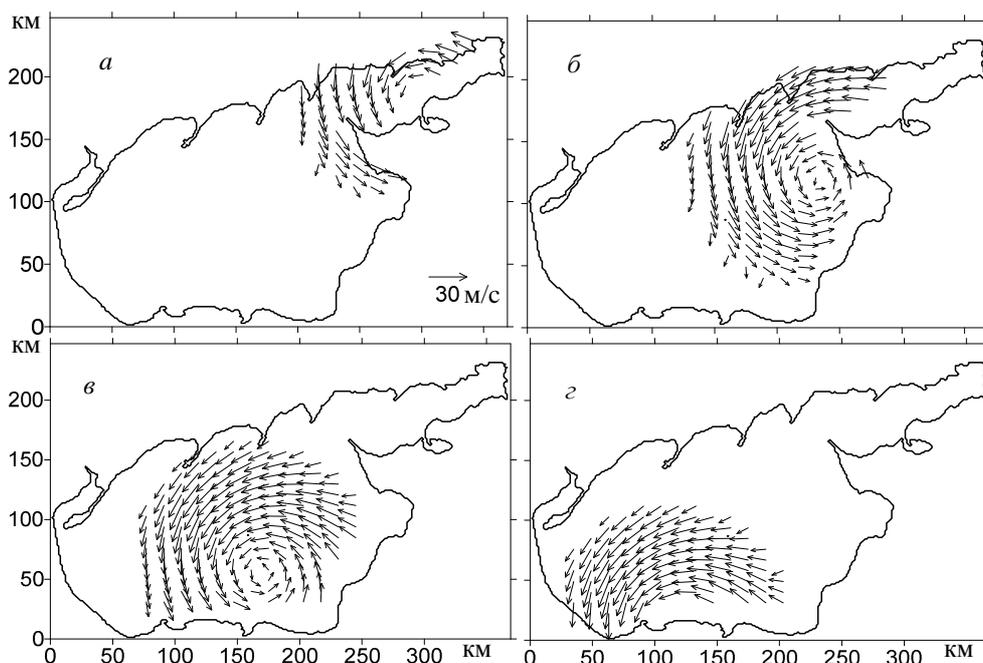
Анализ численных экспериментов. В серии численных экспериментов исследуется влияние различных начальных распределений концентрации примеси на процесс ее эволюции. Поступившие в море загрязняющие вещества трансформируются под действием турбулентной диффузии и переноса течениями, вызванными переменным ветром, генерируемым движущимся циклоном.

Место выброса загрязнения расположено в открытой части моря в самом глубоководном районе (рис. 1, *а*). Для расчета эволюции областей загрязнения вследствие процессов адвекции и диффузии выбраны следующие значения коэффициентов турбулентной диффузии: $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$, $K_H = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [14].



Р и с. 1. Трансформация области загрязнения при перемещении циклона радиусом 100 км на запад со скоростью 10 м/с: *а* – циклон вошел в акваторию моря ($t = 1$ ч); *б* – через 30 ч после ухода циклона ($t = 45$ ч)

На рис. 1, *б* представлено изменение со временем области загрязнения переменной начальной концентрации ($C_{\max} = 1$) под действием циклона радиусом 100 км, движущегося со скоростью 10 м/с на запад, при этом центр циклона проходит через центральную область моря. В процессе распространения атмосферного образования меняется направление приводного ветра (рис. 2) и, как следствие этого, характер генерируемых им течений. В результате этого область загрязнения вначале перемещается на запад (в направлении движения циклона), а затем распадается на несколько небольших областей, которые переносятся от центра выброса в различных направлениях (рис. 1, *б*). Полное рассеяние происходит через 135 ч, что меньше времени рассеяния такой же области загрязнения постоянной начальной концентрации.



Р и с. 2. Поля скоростей приводного ветра при перемещении циклона радиусом 100 км на запад со скоростью 10 м/с: *a* – циклон вошел в акваторию моря ($t = 1$ ч); *б* – центр циклона приближается к центральной части моря ($t = 8$ ч); *в* – циклон прошел центральную часть моря ($t = 12$ ч); *г* – циклон уходит с акватории ($t = 15$ ч)

В табл. 1 приведены значения K_{\max} и N_{\max} , время их достижения (t_{\max} , ч), а также время полного рассеяния примеси (t_d , ч) на различных горизонтах при перемещении циклона радиусом 100 км на запад со скоростью 10 м/с в зависимости от начального распределения концентрации примеси.

Из анализа данных, представленных в этой таблице, следует, что значения параметров распространения примеси постоянной начальной концентрации $C_{01}(x, y, z, 0)$ превышают значения соответствующих параметров, полученных для линейного начального распределения ее концентрации (11). Отметим, что в обоих случаях $C_{\max} = 1$. При этом величина K_{\max} при $z = 0$ и на горизонте $z = -H/2$ для C_{01} превышает в 1,4 раза значение K_{\max} для C_{02} ; на горизонте $z = -H+h_2$ величина K_{\max} больше в 1,6 раза. Сравнивая значения N_{\max} для указанных начальных распределений концентрации, имеем их более чем двукратное уменьшение для линейной начальной концентрации примеси.

Учитывая результаты моделирования, приведенные в табл. 1, оценим влияние градиента начальной линейной концентрации примеси на размеры области ее проникновения и время полного рассеяния пассивной примеси при наличии циклона. Исследование переноса и распространения примеси выполнено для значений $C_{\max} = 1$, $C_{\max} = 2$ и $C_{\max} = 3$. Получено, что с ростом C_{\max} отношение наибольшей площади загрязнения к ее первоначальному значению (K_{\max}) увеличивается и при $z = 0$ составляет 1,9 ($C_{\max} = 1$), 2,2 ($C_{\max} = 2$)

и 2,6 ($C_{\max} = 3$); на глубине $z = -H/2$ — 1,3, 1,5 и 1,8; в придонном слое ($z = -H+h_2$) — 0,7, 0,9 и 1,1 соответственно.

Т а б л и ц а 1

Параметры загрязнения K_{\max} , N_{\max} , время их достижения t_{\max} (ч) и время полного рассеяния примеси t_d (ч) на различных горизонтах моря и в области $-H \leq z \leq 0$ при наличии циклона радиусом 100 км, перемещающегося на запад со скоростью 10 м/с, в зависимости от начального распределения концентрации примеси

Горизонт, область	Параметры загрязнения	C_{01}	C_{02}		
			$C_{\max} = 1$	$C_{\max} = 2$	$C_{\max} = 3$
$z = 0$	K_{\max}	2,7	1,9	2,2	2,6
	t_{\max}	42	35	39	41
	t_d	149	110	122	140
$z = -H/2$	K_{\max}	1,8	1,3	1,5	1,8
	t_{\max}	51	43	48	51
	t_d	152	131	139	140
$z = -H+h_2$	K_{\max}	1,1	0,7	0,9	1,1
	t_{\max}	56	47	52	56
	t_d	155	135	141	155
$-H \leq z \leq 0$	N_{\max}	7,3	3,5	5,0	6,8
	t_{\max}	55	35	42	45
	t_d	155	135	141	155

Из анализа этих данных следует, что на рассматриваемых горизонтах двукратное и трехкратное увеличение начальной концентрации примеси приводит к росту максимальной площади области загрязнения в 1,3 и 1,6 раза соответственно.

Время полного рассеяния примеси t_d зависит от максимума начальной концентрации и становится тем больше, чем больше значение C_{\max} . При этом t_d равняется 135 ч ($C_{\max} = 1$), 141 ч ($C_{\max} = 2$), 155 ч ($C_{\max} = 3$) и увеличивается на 4 и 15% соответственно относительно $C_{\max} = 1$. Результаты моделирования, представленные в табл. 1, свидетельствуют о том, что вертикальное распространение примеси замедляется с увеличением максимального значения ее начальной концентрации. В этом случае наибольший объем области загрязнения N_{\max} при $C_{\max} = 2$ и $C_{\max} = 3$ больше соответственно в 1,4 и 1,9 раза, чем для $C_{\max} = 1$.

Выполним сравнение параметров эволюции примеси в центральной части Азовского моря для различных начальных концентраций при отсутствии ветра (на «тихой» воде). В табл. 2 представлены значения K_{\max} , N_{\max} , время их достижения t_{\max} и время полного рассеяния примеси t_d на различных горизонтах моря в зависимости от начального распределения ее концентрации без учета действия циклона.

Т а б л и ц а 2

Параметры загрязнения K_{\max} , N_{\max} , время их достижения t_{\max} (ч) и время полного рассеяния примеси t_d (ч) на различных горизонтах моря и в области $-H \leq z \leq 0$ при отсутствии циклона в зависимости от начального распределения концентрации примеси

Горизонт, область	Параметры загрязнения	C_{01}	C_{02}		
			$C_{\max} = 1$	$C_{\max} = 2$	$C_{\max} = 3$
$z = 0$	K_{\max}	8,8	3,6	4,1	8,7
	t_{\max}	74	65	47	97
	t_d	168	199	345	343
$z = -H/2$	K_{\max}	2,0	2,3	3,0	5,9
	t_{\max}	85	88	51	94
	t_d	254	157	363	168
$z = -H+h_2$	K_{\max}	4,3	1,5	1,1	2,6
	t_{\max}	128	104	88	61
	t_d	224	377	377	279
$-H \leq z \leq 0$	N_{\max}	25,5	8,9	8,4	21,5
	t_{\max}	118	39	86	63
	t_d	311	265	341	288

Из анализа данных, приведенных в табл. 1 и 2 следует, что в обоих вариантах расчетов при наличии циклона и на «тихой» воде с ростом градиента начальной концентрации происходит увеличение районов распространения загрязнений. Как видно, для одних и тех же значений начальной концентрации, при отсутствии ветра происходит увеличение параметров загрязнений (K_{\max} , N_{\max} , t_d) не более чем в 3 раза по сравнению со случаем наличия циклона.

Выводы. Сформулируем основные результаты проведенных исследований:

- исследование переноса и распространения примеси постоянной и переменной начальной концентрации с равными максимумами показало, что в первом случае имеют место большие время рассеяния и размеры области проникновения загрязнения;
- двукратное и трехкратное увеличение градиента начальной концентрации примеси приводит к росту максимальной площади области проникновения загрязнения в 1,3 и 1,6 раза соответственно при прохождении циклона над Азовским морем;
- рассеяние примеси при наличии циклона и на «тихой» воде замедляется с увеличением градиента начальной концентрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. – 4. – P. 1 – 16.
2. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – Севастополь, 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
3. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния ветрового воздействия на течения и распространение примеси в Азовском море // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 3. – С. 15 – 28.
4. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния циклонических возмущений на динамические процессы и эволюцию примеси в Азовском море при наличии стационарных течений // Там же. – 2009. – № 2. – С. 12 – 25.
5. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния стационарных течений на динамические процессы и трансформацию примеси в Азовском море, вызываемые прохождением циклонов // Допов. НАН України. – 2008. – № 11. – С. 119 – 122.
6. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. – 1963. – 91, № 3. – P. 99 – 164.
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. *Hsu S.A.* A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: A parametric model // Ibid. – 1986. – № 16. – P. 144 – 150.
9. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование эволюции поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений // Допов. НАН України. – 2007. – № 7. – С. 116 – 120.
10. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Динамические процессы и их влияние на распространение и трансформацию загрязняющих веществ в ограниченных морских бассейнах. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – 178 с.
11. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том III. Азовское море.* – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 218 с.

12. *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.
13. *Григоркина Р.Г., Фукс В.Р.* Воздействие тайфунов на океан. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 244 с.
14. *Демьшев С.Г., Кортаев Г.К.* Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке *C* // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН, 1992. – С. 163 – 231.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: shulgaty@mail.ru

Материал поступил
в редакцию 17.06.11
После доработки 14.10.11

АНОТАЦІЯ У роботі з використанням тривимірної нелінійної математичної моделі вивчаються процеси перенесення та дифузії забруднюючих речовин в Азовському морі в разі циклонних атмосферних збурень. Виконане порівняння часу розсіяння, а також максимального об'єму проникнення домішки (з постійними та змінними початковими розподілами її концентрації) за наявності циклону та на «тихій» воді. Показано, що розсіяння домішки сповільнюється із збільшенням градієнта її початкової концентрації.

Ключові слова: швидкість течії, згонні-нагонні явища, прогностичні поля вітру, тривимірна нелінійна модель.

ABSTRACT Processes of transfer and diffusion of contaminating substances in the Sea of Azov at cyclonic atmospheric disturbances are studied using a three-dimensional nonlinear mathematical model. Duration of impurity dispersion and its maximum penetrating volume (with constant and variable initial distributions of its concentration) at presence of a cyclone and at «still» water are compared. It is shown that impurity dispersion becomes slower with increase of the gradient of its initial concentration.

Keywords: current velocity, surge phenomena, prognostic wind fields, three-dimensional nonlinear model.