

УДК 532.59

ИЗУЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ПРОХОЖДЕНИЕМ ЦИКЛОНОВ НАД АЗОВСКИМ МОРЕМ

Л. В. Черкесов, Т. Я. Шульга

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

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.

L. V. Cherkesov, T. Ya. Shul'ga. STUDY OF THE TRANSFORMATION OF POLLUTION CAUSED BY CYCLONES PASSING OVER THE SEA OF AZOV

The processes of transfer and diffusion of contaminants in the Sea of Azov in the case of cyclonic atmospheric perturbations were studied using a three-dimensional nonlinear mathematical model. The time of dispersal and the maximal volume of impurity penetration (with constant and variable initial distributions of its concentration) were compared for cyclone and calm water conditions. It is demonstrated that the dispersal of impurity slows down as the gradient of its initial concentration increases.

Key words: current velocity; surging phenomena; prognostic wind fields; three-dimensional nonlinear model.

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 POM (Princeton Ocean Model) [9], адаптированная к условиям бассейна Азовского моря, дополненная модулями и подпрограммами расчета характеристик пассивной примеси [7, 8]. На ее основе изучены характеристики ветровых течений, сгонно-нагонных процессов для стационарного и однородного по пространству ветра и также типовых нестационарных полей ветра [5, 6]. В указанных работах выполнен анализ времени полного рассеяния примеси постоянной начальной концен-

трации и ее трансформации при наличии стационарных течений.

В данной работе изучается влияние переменного начального распределения концентрации примеси на продолжительность рассеяния и максимальный объем области загрязнения при наличии и отсутствии циклонических возмущений. Выполнен анализ степени проникновения загрязнения при неоднородном начальном распределении концентрации примеси по сравнению со случаем постоянной начальной концентрации. Исследовано влияние градиента начальной концентрации примеси на величину площади области загрязнения на различных горизонтах Азовского моря.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ГРАНИЧНЫЕ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Для расчета используем нелинейные уравнения движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [8, 9]:

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

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

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

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

В этих уравнениях все обозначения — общепринятые. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости A_M вычисляется с помощью формулы Смагоринского [10], для параметризации коэффициента вертикальной турбулентной вязкости K_M применяется теория Меллора–Ямады [11]. Граничные условия на свободной поверхности имеют вид

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

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 скорости ветра, \mathbf{W} — вектор скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря; C_a — коэффициент поверхностного трения [12], зависящий от скорости ветра \mathbf{W} :

$$10^3 C_a = \begin{cases} 2.5, & |\mathbf{W}| > 22 \text{ м/с} \\ 0.5 + 0.065 |\mathbf{W}|, & 8 \leq |\mathbf{W}| \leq 22 \text{ м/с} \\ 1.2, & 4 \leq |\mathbf{W}| \leq 8 \text{ м/с} \\ 1.1, & 1 \leq |\mathbf{W}| \leq 4 \text{ м/с} \end{cases} \quad (6)$$

На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [9]

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

где $\tau_{1x} = C_b u \sqrt{u^2 + v^2}$ и $\tau_{1y} = C_b v \sqrt{u^2 + v^2}$; 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 донной поверхности. На боковых границах выполняются условия прилипания. В качестве начальных ($t=0$) принимаются условия отсутствия движения жидкости и колебаний свободной поверхности до включения атмосферных возмущений. В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \\ w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

Для расчета изменения со временем концентрации примеси $C(x, y, z, t)$ используем уравнение переноса и диффузии [9]

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

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

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

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

Здесь $r_1 = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}$ — расстояние от центра (x_0, y_0) области загрязнения до точки, в которой вычисляется концентрация; C_{\max} — максимальное значение концентрации в центре области; $z = h_1$ — толщина слоя этой 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 , ч. 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 занима-

Они означают отсутствие потоков примеси в направлении внешней нормали к 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 [5] 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

емую ею площадь на горизонтах $z_0 = \zeta$, $z_0 = -H/2$ и $z_0 = -H + h_2$, вычисляется по формуле $K_{\max} = S_{\max}/S_0$, где 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 [1]. Основные течения в море формируются в прямой зависимости от действующего ветра. Для циклонического образования радиусом основания R_c атмосферное давление p_a находится из соотно-

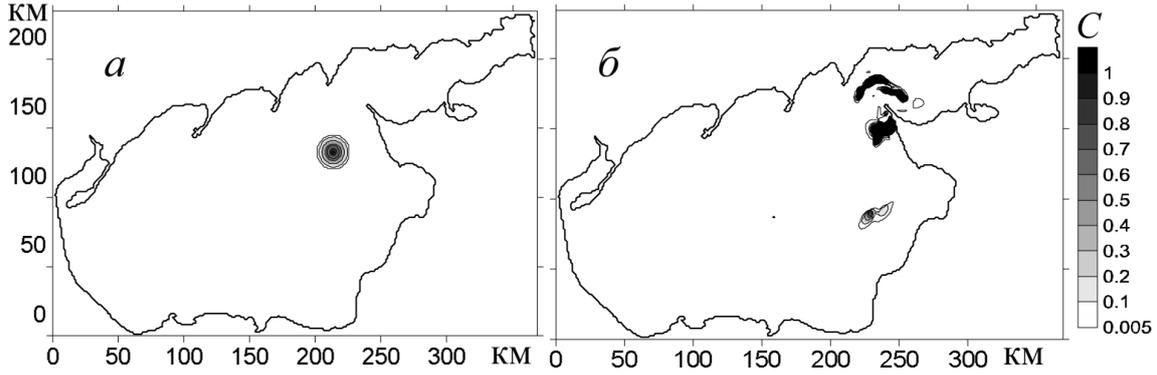


Рис. 1. Трансформация области загрязнения при перемещении циклона с радиусом 100 км на запад со скоростью 10 м/с: а — циклон входит в акваторию моря ($t = 1$ ч); б — через 30 ч после ухода циклона ($t = 45$ ч)

шения, предложенного в [4]:

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

где \tilde{p}_a — фоновое значение давления; p_0 — максимальное отклонение от \tilde{p}_a в атмосферном возмущении; $r = \sqrt{(x_0(t) - x)^2 + (y_0(t) - y)^2}$ — расстояние от центра $(x_0(t), y_0(t))$ движущегося циклона до точки с координатами (x, y) .

Согласно [2], в неподвижном циклоне ветер рассчитываем, умножая модуль вектора геострофической скорости W_g на эмпирический коэффициент $\mu = 0,7$ и учитывая 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 движется поступательно со скоростью \mathbf{c} , получаем такое выражение для скорости приводного ветра:

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

Здесь $W_g = -\frac{fr}{2} + \left[\left(\frac{fr^2}{2} \right) + \frac{(p_a)_r r}{\rho_a} \right]^{1/2}$ — геострофическая скорость; $(p_a)_r$ — радиальный градиент атмосферного давления (12); вектор \mathbf{r} направлен от центра циклона к точке, в которой вычисляется \mathbf{W} ; $\hat{T}(\alpha)$ — матрица поворота на угол α .

В исходных уравнениях (1)–(4), граничных условиях (5), (7) и начальных условиях (8) осуществляется переход от координаты z к σ -координате [8], [9] посредством соотношений $x^* = x$, $y^* = y$, $t^* = t$, $\sigma = (z - \zeta)/(H + \zeta)$,

$\sigma \in [-1; 0]$. Пространственное разрешение модели по широте и долготе составляет $(1/59)^\circ \times (1/84)^\circ$, при этом линейные размеры ячеек 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 $10\Delta t = 180$ с (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 результатов 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. Для расчета эволюции областей загрязнения вследствие процессов адвекции и диффузии выбраны следующие значения коэффициентов турбулентной диффузии: $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$, $K_H = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [3].

Место выброса загрязнения расположено в открытой части моря в самом глубоководном районе (рис. 1, а). На рисунке 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.

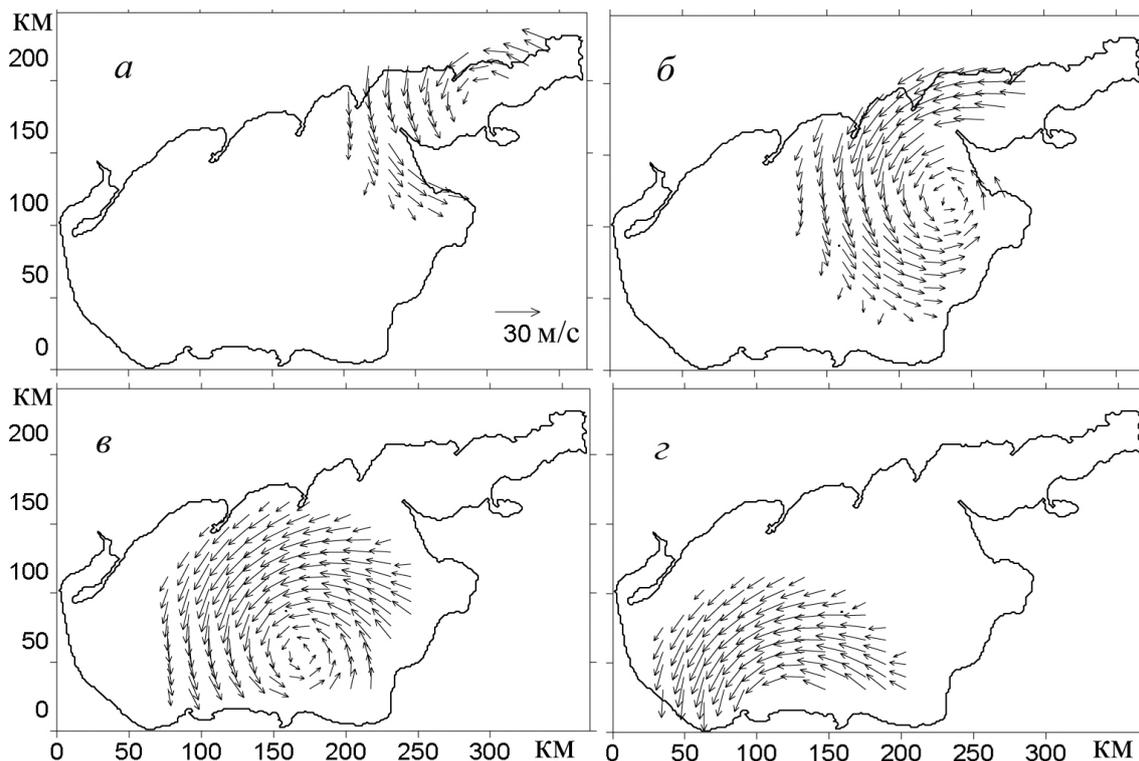


Рис. 2. Поля скоростей приводного ветра при перемещении циклона радиусом 100 км на запад со скоростью 10 м/с: а — циклон входит в акваторию ($t = 1$ ч); б — центр циклона приближается к центральной части моря ($t = 8$ ч); в — циклон прошел центральную часть моря ($t = 12$ ч); г — циклон уходит с акватории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

В процессе распространения атмосферного образования меняется направление приводного ветра (рис. 2) и, как следствие, 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.

В таблице 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 распре-

ления ее концентрации (11). Отметим, что в обоих случаях $C_{\max} = 1$. При этом величина K_{\max} в поверхностном слое и на горизонте $z = -H/2$ для C_{01} превышает в 1,4 раза значение K_{\max} для C_{02} ; на горизонте $z = -H$ K_{\max} больше в 1,6 раза. Сравнивая значения V_{\max} для указанных начальных распределений концентрации, имеем их более чем двухкратное уменьшение для линейной начальной концентрации примеси.

Учитывая результаты моделирования, приведенные в таблице 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.

Таблица 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
$-H \leq z \leq 0$	K_{\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 таблице 1, свидетельствуют о том, что вертикальное распространение примеси замедляется с уве-

личением 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 таблице 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.

Таблица 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
$-H \leq z \leq 0$	K_{\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 таблицах 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты проведенных исследований. Анализ результатов моделирования переноса и распространения примеси в Азовском море постоянной и переменной начальной концентрации с равными максимумами показал, что в первом случае имеют место большие время рассеяния и размеры области проникновения загрязнения. При прохождении циклона над Азовским морем двукратное и трехкратное увеличение градиента начальной концентрации примеси приводит к росту максимальной площади области проникновения загрязнения в 1,3 и 1,6 раза соответственно. Рассеяние примеси при наличии циклона и на тихой воде замедляется с увеличением градиента начальной концентрации. При этом скорость рассеяния существенно не меняется, однако время полного рассеяния увеличивается с ростом максимальной концентрации. Сравнивая объем области, охваченной загрязнением, для указанных начальных распределений концентрации, отмечаем его более чем двукратное уменьшение в случае линейно изменяющейся начальной концентрации примеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том III. Азовское море.* СПб.: Гидрометеоиздат, 1986. 218 с.
2. *Григоркина Р. Г., Фукс В. Р.* Воздействие тайфунов на океан. СПб.: Гидрометеоиздат, 1986. 244 с.
3. *Демьшев С. Г., Коротаев Г. К.* Численная энергосбалансированная модель бароклин-

REFERENCES

1. *Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoj zony morej SSSR. T. III, Azovskoe more [Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the seas of the USSR. Vol. III, Sea of Azov].* St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1986. 218 p.

ных течений океана с неровным дном на сетке С // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. М.: ИВМ РАН, 1992. С. 163–231.

4. *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.

5. *Иванов В. А., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование влияния переменного по пространству и времени ветра на течения, сгонно-нагонные процессы и распространение пассивной примеси в Азовском море // *Метеорология и гидрология.* 2012. № 8. С. 69–79. doi:10.3103/S1068373912080079

6. *Иванов В. А., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Динамические процессы и их влияние на трансформацию пассивной примеси в Азовском море // *Океанология.* 2014. Т. 54, № 4. С. 464–472. doi:10.1134/S0001437014030023

7. *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, ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 178 с.

8. *Фомин В. В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // *Научные труды УкрНИГМИ.* 2002. Вып. 249. С. 246–255.

9. *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.*

10. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // *Mon. Wea. Rev.* 1963. Vol. 91, no. 3. P. 99–164.

11. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. Vol. 20, no. 3. P. 851–875.

12. *Wannawong W., Humphries U. W., Wongwises P. et al.* Mathematical Modeling of Storm Surge in Three-Dimensional Primitive Equations // *Inter. Comp. Math. Sci.* 2011. No. 5. P. 44–53.

Поступила в редакцию 30.05.2016

2. *Grigorkina R. G., Fuks V. R.* Vozdejstvie tajfunov na okean [The impact of typhoons on the ocean]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1986. 244 p.

3. *Demyshev S. G., Korotaev G. K.* Chislennaya ehnergobalansirovannaya model' baroklinnyh techenij okeana s nerovnym dnom na setke C

[Numerical energy-balanced model of baroclinic ocean currents with rough bottom on a C grid]. Chislennye modeli i rezul'taty kalibrovochnykh raschetov techenij v Atlanticheskom okeane [Numerical models and the results of calibration calculations of currents in the Atlantic Ocean]. Moscow: IBM RAS, 1992. P. 163–231.

4. *Ivanov V. A., Kononov A. V., Cherkesov L. V.* Vliyanie ciklonov na izmenenie urovennoj poverhnosti Azovskogo i Chernogo morej [Influence of cyclones on the variation of the level surface in the Sea of Azov and the Black Sea]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2003. No. 4. P. 73–80.

5. *Ivanov V. A., Cherkesov L. V., Shul'ga T. Ya.* Issledovanie vliyaniya peremennogo po prostranstvu i vremeni vetra na techeniya sgonnagonnyye processy i rasprostranenie-primesi v Azovskom more [Investigation of effects of spatially and temporally variable wind on currents, surges, and admixture spread in the Sea of Azov]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2012. Vol. 37, no. 8. P. 553–559.

6. *Ivanov V. A., Cherkesov L. V., Shul'ga T. Ya.* Dinamicheskie processy i ih vliyanie na transformaciyu passivnoj primesi v azovskom more [Dynamic processes and their influence on the transformation of the passive admixture in the Sea of Azov]. *Oceanology*. 2014. Vol. 54, no. 4. P. 426–434. doi: 10.1134/S0001437014030023

7. *Ivanov V. A., Cherkesov L. V., Shul'ga T. Ya.* Dinamicheskie processy i ih vliyanie na rasprostranenie i transformaciyu zagryaznyayushchih veshchestv v ogranichennykh morskikh bassejnah [Dynamic processes and their influence on the distribution and transformation of pollutants in restricted marine basins]. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2010. 178 p.

8. *Fomin V. V.* Chislennaya model' cirkulyacii vod Azovskogo morya [Numerical model of the circulation of waters in the Sea of Azov]. *Nauchnye trudy UkrNIGMI* [Proc. UHMI]. 2002. No. 249. P. 246–255.

9. *Blumberg A. F., Mellor G. L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Ed. N. Heaps. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1987. P. 1–16.

10. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment. *Mon. Wea. Rev.* 1963. Vol. 91, no. 3. P. 99–164.

11. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. Vol. 20, no. 3. P. 851–875.

12. *Wannawong W., Humphries U. W., Wongwises P. et al.* Mathematical Modeling of Storm Surge in Three-Dimensional Primitive Equations. *Inter. Comp. Math. Sci.* 2011. No. 5. P. 44–53.

Received May 30, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Черкесов Леонид Васильевич

главный научный сотрудник, чл.-корр. НАН Украины, д. ф.-м. н., проф.
Морской гидрофизический институт РАН
ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия, 299011
тел.: (8692) 543347

Шульга Татьяна Яковлевна

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Морской гидрофизический институт РАН
ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия, 299011
эл. почта: shulgaty@mail.ru
тел.: (8692) 543347

CONTRIBUTORS:

Cherkesov, Leonid

Marine Hydrophysical Institute of Russian Academy of Sciences
2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia
tel.: (8692) 543347

Shulga, Tatiana

Marine Hydrophysical Institute of Russian Academy of Sciences
2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia
e-mail: shulgaty@mail.ru
tel.: (8692) 543347