МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИМЕСИ В АЗОВСКОМ МОРЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ И СТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ

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

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net
*Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт

В работе проведен анализ процессов адвекции-диффузии загрязняющей примеси в акватории Азовского моря при наличии гидродинамических процессов, генерируемых стационарным ветром, а так же при наличии возмущающих циклонических образований.

Введение. 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. В Азовском море, сравнительно небольшом и мелководном бассейне, течения определяются прежде всего прямым воздействием ветра и рельефом дна. В работе [0] в рамках двумерной модели исследована динамика вод в Азовском море при прохождении циклонов. В данной работе с использованием нелинейной трехмерной математической модели изучено влияние атмосферных аномалий типа циклонов на циркуляцию вод и распространение загрязнений в этом бассейне.

Для расчета используем нелинейные уравнения движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [2]:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{11}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{12}) + \frac{\partial}{\partial z}K_M\frac{\partial u}{\partial z},$$
$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{21}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{22}) + \frac{\partial}{\partial z}K_M\frac{\partial v}{\partial z},$$
$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0, \qquad (1)$$
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

Здесь все обозначения общепринятые.

Граничные условия на свободной поверхности имеют вид:

$$w\big|_{z=\zeta} = \frac{\partial\zeta}{\partial t} + u\frac{\partial\zeta}{\partial x} + v\frac{\partial\zeta}{\partial y}, \qquad (2)$$
$$K_M\left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right)\Bigg|_{z=\zeta} = \left(\tau_{0x}, \tau_{0y}\right), \left(K_H \cdot \frac{\partial C}{\partial z}\right)\Bigg|_{z=\zeta} = 0,$$

где $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$, $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$ – проекции касательных напряжений ветра; W_x, W_y – компоненты вектора скорости ветра $\mathbf{W}$ на высоте 10 м над уровнем моря с модулем $|\mathbf{W}|$.

На боковых границах выполняются условия прилипания и отсутствие потока в направлении внешней нормали. На дне выполняются условия:

$$\left(w + u\frac{\partial H}{\partial x} + v\frac{\partial H}{\partial y}\right)\Bigg|_{z=-H} = 0, \qquad (3)$$
$$K_M\left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right)\Bigg|_{z=-H} = \left(\tau_{1x}, \tau_{1y}\right), \left(K_H\frac{\partial C}{\partial z}\right)\Bigg|_{z=-H} = 0.$$

Здесь $\tau_{1x} = c_b u\sqrt{u^2+v^2}$, $\tau_{1y} = c_b v\sqrt{u^2+v^2}$, $c_b = k^2 \mathbf{ln}^{-2}(z_2/z_0)$ – коэффициент донного трения; z_2 – шаг по вертикали в придонном слое; z_0=0,003 м – параметр шероховатости; k – постоянная Кармана. В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

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. Степень приближения к установившемуся режиму оценивается по относительным изменениям полной энергии $E_S(t)$, которая находится как сумма осредненных по пространству кинетической и потенциальной энергий. Считаем, что стационарный режим достигается при условии $\delta E_S^n \le 10^{-2}$, где $\delta E_S^n \le \left|E_S^{n+1} - E_S^n\right| / E_S^n$; n – номер шага по времени. Время установления движения жидкости ($t = t_0$) принимаем за начало отсчета действия барических возмущений и выброса загрязнения. Область загрязнения при $t = t_0$ расположена в поверхностном слое и имеет вид пятна радиуса R.

Для расчета распространения концентрации C к уравнениям (1) добавляется уравнение переноса и диффузии

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

Здесь $A_H=10$ м^2/с, $K_H=10^{-4}$ м^2/с – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии. На боковых границах и дне выполняются условия отсутствия потока примеси в направлении внешней нормали.

Атмосферное давление p_a при радиусе циклонического образования R_c, представляется в виде [3]

$$p_a=\begin{cases}-p_0\cos^2\left(\dfrac{\pi r}{2R_c}\right)+\widetilde{p}_a, & r\le R_c,\\ \widetilde{p}_a, & r>R_c,\end{cases}$$

где $\widetilde{p}_a$ – фоновое значение давления; p_0 – максимальное отклонение от $\widetilde{p}_a$ в атмосферном возмущении; r – расстояние от центра движущегося циклона до точки с координатами (x, y). В неподвижном циклоне рассчитываем ветер, умножая модуль вектора геоциклострофической скорости W_g на эмпирический коэффициент $\mu=0{,}7$. Учитываем при этом, что направление ветра отклоняется от касательных к изобарам на угол $\gamma=20°$. При условии, что барическое образование возникает над полем стационарного ветра и движется поступательно со скоростью **c**, получаем выражение для скорости приводного ветра:

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

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

В исходных уравнениях (1), граничных условиях (2), (3), и начальных условиях осуществляется переход от координаты z к σ-координате [2, 4]. Исходными данными являются рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря, которые в узлах сетки сняты с навигационной карты. В численных расчетах формирование установившихся течений осуществляется квазистационарным восточным ветром различной скорости. Исходя из анализа метеорологической информации, полагаем, что циклон перемещается со скоростью 5 м/с, имеет радиус 100 км, перепад давления между центром и периферией составляет 15 гПа.

Расчеты проведены при условии, что по мере своего перемещения на юго-запад (ЮЗ), запад (З) и северо-запад (СЗ) центр циклона пересекает Азовское море и проходит через его центральную часть.

В таблице 1 приведены зависимости максимальных скоростей течений от начальных скоростей стационарных течений (СТ) и направления перемещения циклонов.

Таблица 1 – Скорости стационарных течений и максимальные скорости течений (м/с), вызванные прохождением циклонов, при трех скоростях постоянного ветра и трех характерных направлениях перемещения циклонов

Глубина, м	$\mathbf{W}_{st}^1$ = 5 м/с				$\mathbf{W}_{st}^2$ = 10 м/с				$\mathbf{W}_{st}^3$ = 15 м/с			
	СТ	Направление циклона			СТ	Направление циклона			СТ	Направление циклона		
		ЮЗ	З	СЗ		ЮЗ	З	СЗ		ЮЗ	З	СЗ
0	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

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 соотношение скоростей течений характерно и для других горизонтов. Под

действием атмосферных возмущений происходит увеличение скорости течений с глубиной, наибольшее увеличение отмечается в придонном слое. Максимальные скорости течений, вызванные прохождением циклонов, заметно зависят от скоростей стационарных течений.

В серии численных экспериментов оценивается влияние параметров атмосферных возмущений на распространение и время полного рассеяния пассивной примеси, возникшей от мгновенного источника, расположенного над самой глубоководной частью Азовского моря. Радиус пятна примеси принимается равным 9 км. На горизонтах $z = 0$, $z = -H/2$ и $z = -H$ анализируются значения коэффициентов $K_{\max}$ Они представляют собой отношения максимальных площадей, ограниченных изолинией концентрации примеси равной 2,5 %, к первоначальной площади загрязнения при $t = t_0$.

Оценим параметры проникновения примеси под действием только стационарного ветра со скоростью 15 м/с. Стационарные течения на поверхности направлены в сторону действующего ветра, куда наблюдается перенос примеси. Эти области с течением времени все больше вытягиваются в западном направлении. В рассматриваемом поле установившихся течений коэффициент $K_{\max}$ 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 примеси происходит через 53 ч с момента выброса, при этом с течением времени направление перемещения примеси существенно не меняется.

Эволюция той же области загрязнения исследована под действием атмосферного образования радиусом 100 км, движущегося на запад со скоростью 5 м/с и $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$ м/с. В процессе перемещения атмосферного образования меняется направление приводного ветра и, как следствие этого, направление генерируемых им течений. При этом область загрязнения первые 2 ч перемещается на запад в направлении стационарных течений, а затем постепенно распадается на несколько небольших фрагментов (рисунок 1). Эти области переносятся от центра выброса в различных направлениях на значительные расстояния и, спустя 30 ч, достигают северного побережья Азовского моря в районах Бердянска и Мариуполя. 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 течений.

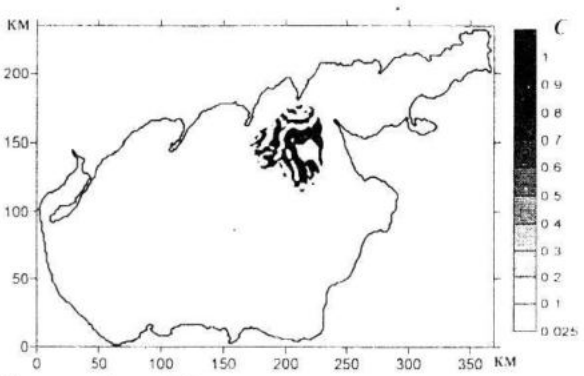

Рисунок 1 – Область загрязнения в момент пересечения циклоном центральной части моря ($t = t_0$+10 ч)

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. Вертикальное распространение примеси под действием циклона замедляется по сравнению со стационарным случаем в 7,5 раза ($z = -H/2$) и в 2,2 раза ($z = -H$).

Литература

1. В. Н. Еремеев, А. В. Коновалов, Ю. В. Манилюк, Л. В. Черкесов. Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов // Океанология. – 2000. – 40, № 5. – С. 658 – 665.

2. A. F. Blumberg, G. L. Mellor. A description of three dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models. Coastal and Estuarine Science, 4, 1987. – P. 1–16.

3. Д. В. Алексеев, В. А. Иванов, Е. В. Иванча, В. В. Фомин, Л. В. Черкесов. Моделирование эволюции волновых полей в районе северо-западного шельфа Черного моря при прохождении циклона // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – №1. – С. 42 – 54.

4. В. В. Фомин. Численная модель циркуляции вод Азовского моря. Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – вып. 249. – С. 246 – 255.