

7. Даниленко В. А., Скурлатівський С. І. Хаотичні інваріантні розв'язки нелінійних нелокальних моделей багатокомпонентних середовищ з внутрішніми осциляторами // Там само. – 2006. – № 9. – С. 111–115.
8. Слепян Л. И. Волна деформаций в стержне с амортизированными массами // Механика тв. тела. – 1967. – № 5. – С. 34–40.
9. Пальмов В. А. Об одной модели среды сложной структуры // Прикл. мат. и мех. – 1969. – Вып. 4. – С. 768–773.
10. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – Москва: Наука, 1974. – 504 с.
11. Писаренко Г. С. Колебания механических систем с учетом несовершенной упругости материала. – Киев: Наук. думка, 1970. – 357 с.
12. Johnson P. A., Rasolofosaon P. N. J. Manifestation of nonlinear elasticity in rock: convincing evidence over large frequency and strain intervals from laboratory studies // Nonlin. Processes in Geophys. – 1996. – No 3. – P. 77–88.

Відділення геодинаміки вибуху Інституту
геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ

Надійшло до редакції 06.03.2008

УДК 532.59

© 2008

Член-корреспондент НАН України В. А. Иванов, В. В. Фомин,
член-корреспондент НАН України Л. В. Черкесов, Т. Я. Шульга

Исследование влияния стационарных течений на динамические процессы и трансформацию примеси в Азовском море, вызываемые прохождением циклонов

The comparative analysis of the diffusion processes of a contaminating admixture in the Sea of Azov in the presence of hydrodynamical processes generated by a seasonal wind and disturbed by cyclonic formations is carried out by using a 3D nonlinear σ -coordinate model. The comparison of the results of numerical experiments with data on cyclones moving along different trajectories in the field of the seasonal wind is performed. The character of the disturbances induced by a moving cyclone into the stationary currents is studied.

Одной из задач современной океанологии является изучение механизмов изменчивости динамических процессов, возникающих в морях и океанах, и предсказание будущих изменений, связанных с потеплением климата и растущим антропогенным воздействием. Особая роль в исследованиях отведена анализу наиболее вероятных сценариев распространения загрязнений, на эволюцию которых заметно влияет перенос течениями. В Азовском море, сравнительно небольшом и мелководном бассейне, течения определяются прежде всего прямым воздействием ветра и рельефом дна. На основании результатов численного моделирования в работах [1, 2] показано, что прохождение циклонов над Азовским морем существенно влияет на динамику вод. Поэтому представляет интерес анализ влияния атмосферных аномалий типа циклонов на циркуляцию вод и распространение загрязнений в этом бассейне. В статье [3] с использованием трехмерной нелинейной σ -координатной модели [4] исследуются течения и изменения уровня, вызываемые движущимися циклонами при отсутствии

стационарных течений. В сообщении [5] выполнен анализ трансформации примеси в Азовском море при наличии только стационарных течений.

В данном сообщении изучаются динамические процессы и эволюция примеси в Азовском море, возникающие под действием возмущений, вносимых в поле стационарных течений перемещающимся циклоном. Исследовано влияние поля стационарных скоростей и различных направлений движения циклонических образований на трансформацию примеси.

1. В качестве исходных принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [4]. На свободной поверхности удовлетворяются кинематическое и динамические условия. На дне ($z = -H(x, y)$) нормальная составляющая скорости равна нулю. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [4], на боковых границах выполняются условия прилипания. В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

В качестве фактора, выводящего течения на установившийся режим, выбран однородный по пространству сезонный ветер [6], скорость которого (\mathbf{W}_{st}) первые 3 ч нарастает со временем по линейному закону и далее не меняется. Степень приближения к установившемуся режиму течений оценивается по относительным изменениям полной энергии [5]. Момент времени выхода движений жидкости на стационарный режим принимается за начало отсчета выброса загрязнения и действия барических возмущений. Область загрязнения при $t = t_0$ расположена в поверхностном слое и имеет вид пятна радиусом 9 км и определяется формулой, приведенной в [5]. На боковых границах, свободной поверхности и дне выполняется условие отсутствия потока примеси в направлении внешней нормали \mathbf{n} . Считая радиус циклонического образования, равным R_c , представим атмосферное давление p_a в виде

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R_c}\right) + \tilde{p}_a, & r \leq R_c, \\ \tilde{p}_a, & r > R_c, \end{cases} \quad (1)$$

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 работе [7], в неподвижном циклоне ветер рассчитываем, умножая модуль вектора гециклострофической 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. Считая, что барическое образование движется поступательно со скоростью \mathbf{c} и возникает при наличии поля стационарного ветра, получаем выражение для скорости приводного ветра

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mathbf{W}_{st} + \mu W_g \hat{T}(90^\circ + \gamma) \frac{\mathbf{r}}{R} + \mathbf{c}, & r \leq R_c, \\ \mathbf{W}_{st}, & r > R_c. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $W_g = -fr/2 + [(fr^2/2) + ((p_a)_r r / \rho_a)]^{1/2}$ — гециклострофическая скорость; $(p_a)_r$ — радиальный градиент атмосферного давления; вектор \mathbf{r} направлен от центра циклона к точке, в которой вычисляется \mathbf{W} ; $\hat{T}(\alpha)$ — матрица поворота на угол α ($\alpha = 90^\circ + \gamma$).

В исходных уравнениях, граничных и начальных условиях осуществляется переход от координаты z к координате σ [4]. Численный алгоритм решения по времени базируется

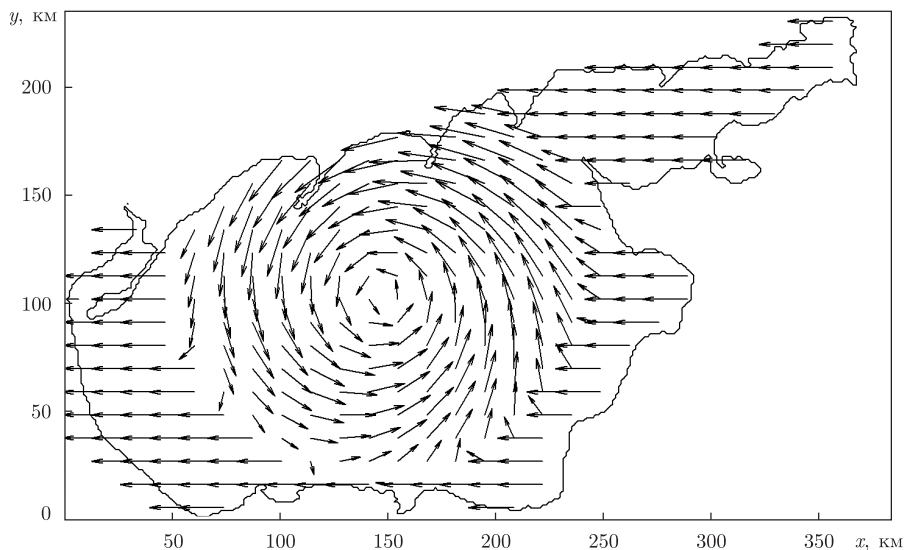


Рис. 1. Поле скоростей приводного ветра, соответствующее моменту времени пересечения циклоном, движущимся на запад со скоростью 5 м/с, центральной части моря ($t = t_1 = t_0 + 10$ ч)

на применении двухслойных разностных схем. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости Куранта для баротропных волн [4].

2. Наибольшую повторяемость в осенний период имеют ветры северо-восточного и восточного направлений со скоростями 5–15 м/с [6]. В летний период наибольшая продолжительность (до 2,5 сут) характерна ветрам юго-восточного направления. В серии численных расчетов стационарные течения генерируются постоянным восточным ветром, скорость которого изменяется от 5 до 15 м/с ($\mathbf{W}_{st}^1 = 5$; $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$; $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$ м/с). Моделирование циркуляции вод и эволюции примеси проводится с учетом того, что циклонические атмосферные возмущения имеют направления и скорости перемещения, не совпадающие с направлением и скоростью сезонного ветра, создающего установившийся режим течений. Предполагается, что по мере своего перемещения центр циклона пересекает Азовское море в заданном направлении и проходит через его центральную часть. Загрязнение считается рассеявшимся при условии, что максимум концентрации ($C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$) становится менее 2,5% от начального.

3. В первой серии численных экспериментов исследуется влияние различных направлений перемещения циклонов на отклонения уровня и поля скоростей течений. Исходя из характерных циклонов, наблюдаемых над Азовским морем [6], полагаем, что циклон перемещается со скоростью 5 м/с, имеет $R_c = 100$ км, перепад давления между центром и периферией — $p_0 = 15$ ГПа. Расчеты проведены для различных направлений передвижения циклона: на юго-запад, запад и северо-запад (ЮЗ, З, СЗ), которые составляют с осью x углы 135° , 180° и 225° соответственно.

На рис. 1 представлено поле ветра на высоте 10 м над Азовским морем, соответствующее моменту времени, когда циклон, движущийся на запад со скоростью 5 м/с, пересекает центральную часть моря ($t = t_1 = t_0 + 10$ ч). Для того же момента времени приведены поля скоростей поверхностных течений (рис. 2) и отклонений уровня (рис. 3). Из анализа пространственного распределения полей течений следует, что до начала действия циклона

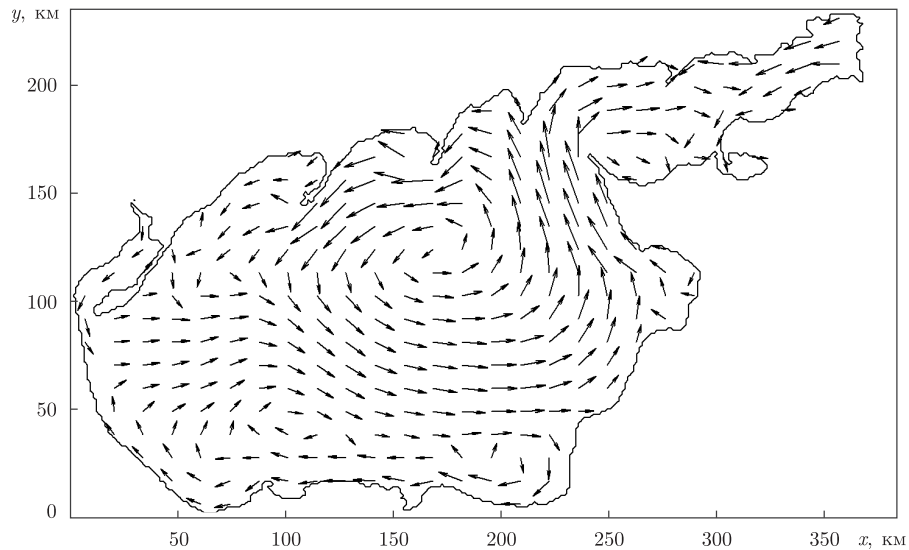


Рис. 2. Поле скоростей поверхностных течений в Азовском море, генерируемых циклоном, перемещающимся на запад со скоростью 5 м/с, в момент времени $t = t_1$

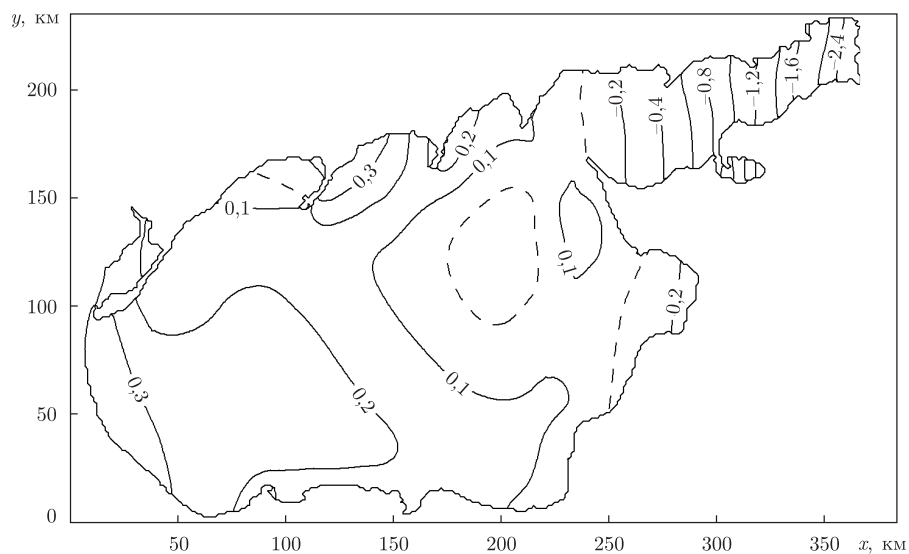


Рис. 3. Поле уровня Азовского моря, вызванное прохождением циклона в западном направлении со скоростью 5 м/с в момент времени $t = t_1$

стационарные течения направлены в сторону действующего ветра. При вхождении циклона в акваторию моря структура установившихся течений изменяется. Их направление при $t = t_1$ (см. рис. 2) в отдельных районах моря меняется на противоположное к направлению перемещения циклона, в других районах — становится перпендикулярным к этому направлению. После ухода циклона с поверхности моря в Таганрогском заливе и северной части моря преобладают направления течений в сторону атмосферных возмущений, в центральной части — под углом 90° к ним.

Анализируя особенности пространственного распределения полей уровня, отметим, что в стационарном режиме имеет место его понижение вдоль западного побережья (сгоны),

у восточного берега происходит повышение уровня (нагоны). Узловая линия пересекает центральную часть моря и ориентирована перпендикулярно направлению ветра. При прохождении циклона через центральный район моря (см. рис. 3) изолиния нулевых амплитуд имеет эллиптическую форму и смещена западнее центральной области моря. Большая ось этого эллипса ориентирована в меридиональном направлении, а малая — в зональном. Центр эллипса находится на узловой линии установившегося режима, разделяющей море на зоны сгона и нагона. С удалением от центрального района моря на восток амплитуда колебаний возрастает и достигает наибольших значений вблизи Мариуполя. У Таганрогского залива и к западу от центра эллипса колебания уровня не превышают 3 см. После ухода циклона с акватории моря одна из узловых линий проходит через центральную часть моря и ориентирована так, как и в установившемся режиме. В восточной части моря при этом отмечается подъем уровня, в западной части — понижение.

Из сравнения результатов численных экспериментов следует, что с увеличением скорости стационарного ветра скорости генерируемых им течений возрастают. В поверхностном слое при увеличении \mathbf{W}_{st} от 5 до 15 м/с максимальные скорости стационарных течений возрастают в 4,4 раза (14 см/с (\mathbf{W}_{st}^1); 34 см/с (\mathbf{W}_{st}^2); 62 см/с (\mathbf{W}_{st}^3)). С прохождением циклонов над акваторией моря скорости течений на всех горизонтах значительно увеличиваются (до 80%). При этом наибольшие значения они имеют при движении атмосферных возмущений на запад, наименьшие — при движении на северо-запад. Максимальная разница между экстремальными значениями скоростей, генерируемых З и СЗ циклонами составляет 5%.

Величины скоростей течений, вызванных движением циклонов, слабо зависят от скоростей стационарных течений. Прохождение циклонов с одинаковыми параметрами при наличии течений, генерируемых стационарным ветром различной интенсивности (5, 10, 15 м/с), приводит к разнице максимальных скоростей течений, не превышающей 5%.

Во второй серии численных экспериментов оцениваем влияние параметров атмосферных возмущений на размеры области проникновения и время полного рассеяния пассивной примеси, возникающей от мгновенного источника. Поступившие в море загрязняющие вещества распространяются под действием турбулентной диффузии и переносятся течениями, генерируемыми системой, состоящей из постоянного ветра и переменного, вызванного прохождением циклонов. Место выброса загрязнения расположено в открытой части моря над самой глубоководной областью [5]. Для расчета трансформации областей загрязнений вследствие процессов адвекции и диффузии выбраны следующие значения коэффициентов турбулентной диффузии: $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$, $K_H = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [8].

Вначале исследуется перенос примеси в установившемся режиме течений, вызванных действием постоянного ветра со скоростями от 5 до 15 м/с. Площадь области загрязнения и время его полного рассеяния (t_d) при скорости ветра 15 м/с — наибольшие. В месте выброса загрязняющих веществ скорости стационарных течений на поверхности составляют 62 см/с и направлены в сторону действующего ветра. С течением времени в поверхностном слое область загрязнения вытягивается в западном направлении. Опускание примеси после выброса происходит на горизонт $z = -H/2$ через 2 ч, в придонный слой — через 9 ч. На этих глубинах границы областей загрязнения имеют форму эллипса, вытянутого в западном направлении.

В рассматриваемом поле установившихся течений максимальное отношение площади загрязнения к ее первоначальному значению (K_{\max}) при $z = 0$ составляет 1,22 ($t_{\max} = 3$ ч); на глубине 5 м — 1,23 ($t_{\max} = 10$ ч); в придонном слое — 1,22 ($t_{\max} = 25$ ч). Полное рассеяние примеси ($C = C_d$) отмечено через 53 ч после выброса.

Рассмотрим теперь эволюцию такой же области загрязнения под действием циклона радиусом 100 км, перемещающегося со скоростью 5 м/с на запад. Его движение происходит в поле установившихся течений, вызванных ветром с наименьшей из рассматриваемых скоростей (5 м/с). В районе выброса скорости установившихся течений в поверхностном слое равны 14 см/с; при $z = -H/2$ составляют 9 см/с; в придонном слое — 6 см/с. При прохождении циклона скорости течений увеличиваются и достигают максимальных значений: в поверхностном слое 86 см/с (через 15 ч), при $z = -H/2$ (через 18 ч) 75 см/с; у дна 52 см/с (через 20 ч).

В табл. 1 приведены максимальные значения K_{\max} , время их достижения (t_{\max} , ч), а также время полного рассеяния примеси (t_d , ч) на различных глубинах моря в установившемся режиме течений, а также под действием циклонов, перемещающихся со скоростью 5 м/с в трех различных направлениях.

Из анализа данных, приведенных в табл. 1, следует, что прохождение циклонов оказывает существенное влияние на параметры распространения примеси. Среди рассматриваемых направлений перемещения атмосферных возмущений западному направлению соответствуют наибольшие значения K_{\max} , t_{\max} и t_d . Сравнивая значения K_{\max} для этого направления циклона с полученным при наличии только стационарных течений (СТ), имеем их более чем восьмикратное увеличение на различных горизонтах.

Площадь распространения загрязнения зависит от скорости ветра, генерирующего установившийся режим течений, и от направления перемещения циклона. Согласно данным, приведенным в табл. 1, отметим следующее: с ростом скорости стационарных течений увеличивается область проникновения примеси и время ее полного рассеяния; максимальное время полного рассеяния при \mathbf{W}_{st}^3 в 1,2 раза больше (176 ч), чем при \mathbf{W}_{st}^1 (151 ч).

В процессе перемещения атмосферного образования меняется направление приводного ветра и, как следствие этого, направление генерируемых им течений. В результате этого области загрязнения первые 2 ч перемещаются на запад (в направлении стационарных течений), а затем (через 10 ч) распадаются на несколько небольших по размеру областей. Часть их переносится от центра выброса в различных направлениях на значительные расстояния и, спустя 30 ч, достигает северного побережья Азовского моря в районе Бердянска и Мариуполя. С течением времени участки загрязняющих веществ перемещаются на за-

Таблица 1

Горизонты и параметры областей загрязнения	\mathbf{W}_{st}^1				\mathbf{W}_{st}^2				\mathbf{W}_{st}^3				
	СТ	Направление циклона			СТ	Направление циклона			СТ	Направление циклона			
		ЮЗ	З	СЗ		ЮЗ	З	СЗ		ЮЗ	З	СЗ	
$z = 0$	K_{\max}	1,1	7,5	7,8	7,2	1,2	8,6	8,7	8,7	1,2	8,9	9,2	8,8
	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
$z = h_1$	K_{\max}	1,2	7,7	7,9	7,4	1,2	8,6	8,6	8,6	1,2	9,1	9,2	8,9
	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
$z = h_2$	K_{\max}	1,1	7,3	7,7	7,0	1,2	8,5	8,5	8,5	1,2	8,9	9,1	8,7
	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

пад. Полное рассеяние происходит через 149 ч, что превышает время рассеяния такой же области загрязнения в установившемся режиме (без циклона).

Проведено исследование влияния направления перемещения (ЮЗ, З, СЗ) атмосферных образований радиуса 100 км со скоростью 5 м/с на эволюцию области загрязнения с теми же параметрами, которые рассматривались в установившемся режиме. Для циклонов различных направлений время проникновения примеси на глубину 5 м длится значительно дольше (15 ч), чем в установившемся режиме. Более продолжительным (до 20 ч) становится и время опускания загрязняющих веществ в придонный слой. Таким образом, вертикальное распространение примеси под действием циклона замедляется по сравнению со стационарным случаем в 7 раз на глубине 5 м и в 2 раза у дна.

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 стонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // *Доп. НАН України*. – 2006. – № 11. – С. 109–113.
4. *Фомин В. В., Черкесов Л. В.* Моделирование дрейфовых течений в мелководном бассейне с учетом изменения касательных напряжений, вызванных ветровыми волнами // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана*. – 2006. – **42**, № 3. – С. 362–370.
5. *Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование эволюции поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений // *Доп. НАН України*. – 2007. – № 7. – С. 160–165.
6. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3. Азовское море*. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. – 218 с.
7. *Григоркина Р. Г., Фукс В. Р.* Воздействие тайфунов на океан. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. – 244 с.
8. *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*

Поступило в редакцию 11.03.2008