

Т. Я. Шульга

## Влияние неоднородного начального распределения концентрации примеси на ее трансформацию в Азовском море при прохождении циклона

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Л. В. Черкесовым)

*С использованием трехмерной нелинейной математической модели найдены количественные характеристики распространения загрязнений в Азовском море при наличии циклонического возмущения. Выполнено сравнение времени рассеяния и максимального объема проникновения примеси с постоянными и переменными начальными распределениями концентрации. Показано, что рассеяние примеси замедляется с увеличением градиента начальной концентрации.*

Акватория Азовского моря и особенно его прибрежные зоны представляют собой единый территориальный регион, который требует организации рационального природопользования и обеспечения экологической безопасности. 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. При этом анализ возможных последствий аварийных ситуаций, возникающих под действием типовых полей ветра в Азовском море, представляет возможность принятия аргументированных решений, касающихся безопасности и эффективного использования побережья морей.

В научных публикациях [1, 2] предложена трехмерная нелинейная сигма-координатная модель, используемая для численного моделирования динамических процессов в морских бассейнах. На ее основе в [3] изучены основные характеристики ветровых течений в Азовском море и их влияние на эволюцию примеси, начальная концентрация которой постоянна.

В настоящем сообщении изложены результаты исследования влияния 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 увеличения площади области загрязнения на различных горизонтах от изменения градиента начальной концентрации примеси.

1. В качестве исходных принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды и уравнение переноса диффузии для концентрации примеси ( $C$ ) нейтральной плавучести [1, 2]. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости вычисляется с помощью формулы Смагоринского [4]. Для параметризации коэффициента вертикальной турбулентной вязкости используется теория Меллора–Ямады [5]. На свободной поверхности выполняются кинематическое и динамические условия, а также условие отсутствия потока примеси. На дне ( $z = -H(x, y)$ ) поток примеси и нормальная составляющая скорости равны нулю. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [1, 2], на боковых границах

выполняются условия прилипания. В начальный момент времени ( $t = t_0$ ) движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

При  $t = t_0$  над Азовским морем возникает переменный по пространству и времени ветер, вызванный перемещением циклона по траектории, пересекающей его центральную часть. В это же время происходит выброс загрязнения в поверхностном слое моря в виде цилиндрической области радиуса  $R$  и глубиной 1 м. При указанных ветровых условиях исследованы параметры эволюции примеси [3], начальное значение концентрации которой постоянно во всей области и равно единице ( $C_{01}(x, y, z, 0) = 1$ ).

Моделирование транспорта загрязнений проведем при условии, что ее концентрация в момент времени  $t = t_0$  убывает с удалением от центра области. Изменение поля концентрации от максимального значения (в центре выброса) до нуля (на границе области) происходит по линейному закону:

$$C_{02}(x, y, z, 0) = \begin{cases} \frac{C_{\max}(R - r_1)}{R}, & r \leq R, \quad 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, \quad z \leq 0, \quad r \leq R, \quad z < -z_1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $r_1 = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}$  — 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 были выбраны: время рассеяния  $t_d$ , коэффициент максимальной площади распространения  $K_{\max}$  и коэффициент максимального объема проникновения  $K_{\max}$  загрязнения. При этом условием рассеивания 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  $z = 0$ ,  $z = -H/2$ ,  $z = -H$ , вычисляется по формуле:

$$K_{\max} = \frac{S_{\max}}{S_0}, \quad (2)$$

где  $S_{\max}$  — максимальная площадь, ограниченная изолинией  $C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$  в момент времени  $t = t_{\max}$ ;  $S_0$  — площадь области первоначального загрязнения при  $t = t_0$ .

Соотношение для вычисления коэффициента максимального объема проникновения загрязнения имеет вид

$$K_{\max} = \frac{V_{\max}}{V_0}, \quad (3)$$

где  $V_{\max}$  — максимальный объем, охваченный поверхностью с концентрацией примеси  $C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$  в момент времени  $t = t_{\max}$ ;  $V_0$  — объем области первоначального загрязнения при  $t = t_0$ .

Преобладающим типом волнения в Азовском море [6] является ветровое, которое быстро развивается после начала действия ветра и также быстро затухает после его прекращения. Изменчивость течений является следствием неустойчивости ветрового режима, мелководности моря и его сравнительно небольшой площади. Наиболее опасной есть ветровая

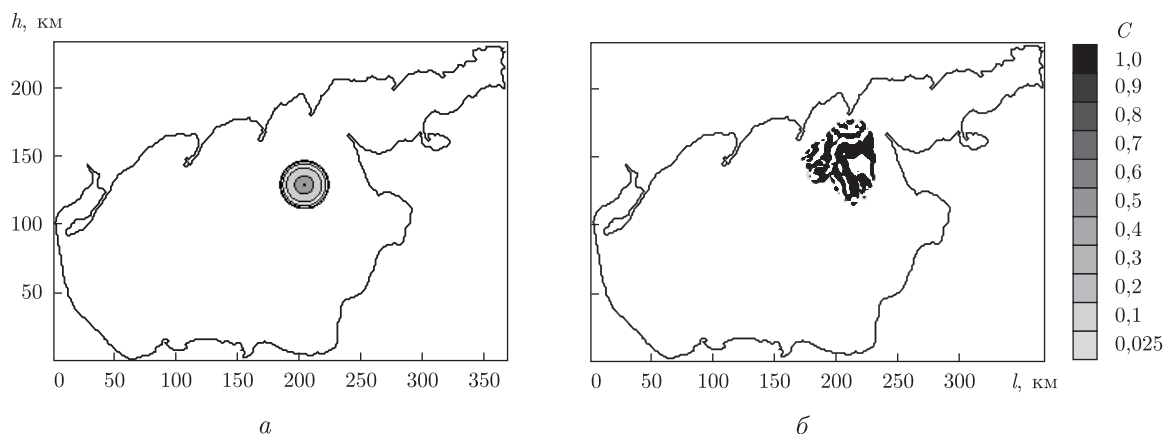


Рис. 1. Трансформация области загрязнения ( $C_{\max} = 1$ ) при перемещении циклона с основанием диаметра 200 км на запад со скоростью 10 м/с: *a* — циклон вошел в акваторию ( $t = 1$  ч); *б* — через 30 ч после ухода циклона с акватории моря ( $t = 45$  ч)

ситуация, возникающая при прохождении над Азово-Черноморским регионом средиземноморских циклонов и циклонов, развивающихся в атмосферных фронтах севернее параллели  $50^\circ$  с. ш. Для этого типа погоды характерны ветры со скоростью 6–14 м/с западных направлений.

С учетом данных наблюдений [6, 7], моделирование эволюции примеси в Азовском море проводилось для атмосферных возмущений, вызванных сезонными циклонами. При этом скорость перемещения циклона принималась равной 10 м/с, радиус его основания 100 км, перепад давления между центром и периферией 15 гПа, направление движения — на запад (совпадает с осью  $x$ ). При проведении расчетов поля атмосферного давления и скорости ветра использовали данные [8].

В исходных уравнениях, граничных и начальных условиях осуществляется переход от координаты  $z$  к координате  $\sigma$  [1, 2]. Численный алгоритм решения по времени базируется на применении двухслойных разностных схем. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [9].

**2.** В серии численных экспериментов исследуется влияние различных значений начального распределения концентрации примеси на процесс ее эволюции под действием указанного циклона. Поступившие в море загрязняющие вещества трансформируются под действием турбулентной диффузии и переноса течениями, генерируемыми переменным ветром при наличии циклона. Место выброса загрязнения расположено в открытой части моря в самом глубоководном районе (рис. 1, *a*). Для расчета эволюции областей загрязнения вследствие процессов адвекции и диффузии выбраны следующие значения коэффициентов турбулентной диффузии [3]:  $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $K_H = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Изменение со временем области загрязнения переменной начальной концентрации  $C_{\max} = 1$  под действием циклона радиуса 100 км, движущегося со скоростью 10 м/с на запад, иллюстрирует рис. 1. В процессе распространения атмосферного образования меняется направление приводного ветра и, как следствие, направление генерируемых им течений. В результате области загрязнения вначале перемещаются на запад (в направлении движения циклона), а затем распадаются на несколько небольших областей, которые переносятся от центра выброса в различных направлениях. Полное рассеяние происходит через

135 ч, что меньше времени рассеяния такой же области загрязнения постоянной начальной концентрации.

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

Из анализа данных, представленных в этой таблице, следует, что приведенные значения параметров распространения примеси постоянной начальной концентрации ( $C_{01}(x, y, z, 0)$ ) превышают значения соответствующих параметров, полученных для линейного начального распределения ее концентрации (1). 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.

**3.** В следующей серии численных экспериментов оценим влияние максимального значения линейной концентрации примеси на размеры области ее проникновения и время полного рассеяния пассивной примеси, возникающей от мгновенного источника. Исследование переноса и распространения примеси выполнено для  $C_{\max} = 1$ ,  $C_{\max} = 2$  и  $C_{\max} = 3$ .

В табл. 2 приведены значения коэффициентов загрязнения  $K_{\max}$  и  $V_{\max}$ , время их достижения ( $t_{\max}$ , ч), а также время полного рассеяния примеси ( $t_d$ , ч) на различных горизонтах под действием циклона, перемещающегося на запад со скоростью 10 м/с радиусом 100 км в зависимости от максимального значения переменной начальной концентрации. Из данных таблицы видно, что с ростом  $C_{\max}$  наибольшее отношение площади загрязнения к ее первоначальному значению  $K_{\max}$  увеличивается и в поверхностном слое составляет 1,9 ( $C_{\max} = 1$ ), 2,2 ( $C_{\max} = 2$ ) и 2,5 ( $C_{\max} = 3$ ), на глубине 5 м — 1,3, 1,5 и 1,8, в придонном слое — 0,7, 0,9 и 1,1 соответственно. Из анализа приведенных результатов следует, что на рассматриваемых горизонтах двух- и трехкратное увеличение начальной концентрации примеси приводит к росту площади области загрязнения в 1,3 и 1,6 раза соответственно.

Время рассеяния примеси  $t_d$  зависит от максимума начальной концентрации и становится тем больше, чем больше значение  $C_{\max}$ . При этом время рассеяния составляет 135 ч

Таблица 1

Горизонт	Параметры загрязнения	$C_{01}(x, y, z, 0)$	$C_{02}(x, y, z, 0)$
$z = 0$	$K_{\max}$	2,7	1,9
	$t_{\max}$	42	35
	$t_d$	149	110
$z = h_1$	$K_{\max}$	1,8	1,3
	$t_{\max}$	51	43
	$t_d$	152	131
$z = h_2$	$K_{\max}$	1,1	0,7
	$t_{\max}$	56	47
	$t_d$	155	135
$0 \geq z \geq h_2$	$V_{\max}$	7,3	3,5
	$t_{\max}$	55	35
	$t_d$	155	135

Таблица 2

Горизонт	Параметры загрязнения	$C_{\max} = 1$	$C_{\max} = 2$	$C_{\max} = 3$
$z = 0$	$K_{\max}$	1,9	2,2	2,5
	$t_{\max}$	35	39	41
	$t_d$	110	122	140
$z = h_1$	$K_{\max}$	1,3	1,5	1,8
	$t_{\max}$	43	48	51
	$t_d$	131	139	140
$z = h_2$	$K_{\max}$	0,7	0,9	1,1
	$t_{\max}$	47	52	56
	$t_d$	135	141	155
$0 \geq z \geq h_2$	$V_{\max}$	3,5	5,0	6,8
	$t_{\max}$	35	42	45
	$t_d$	135	141	155

( $C_{\max} = 1$ ), 141 ч ( $C_{\max} = 2$ ), 155 ч ( $C_{\max} = 3$ ), которое с возрастанием значения начальной концентрации увеличивается на 4 и 15% соответственно.

Результаты моделирования, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что вертикальное распространение примеси замедляется с увеличением максимального значения ее начальной концентрации. В этом случае наибольший объем области загрязнения ( $V_{\max}$ ) при  $C_{\max} = 2$  и  $C_{\max} = 3$  больше соответственно в 1,4 и 1,9 раза, чем для  $C_{\max} = 1$ .

Таким образом, наличие стационарного движения жидкости при перемещении циклона способствует существенному увеличению вертикального распространения загрязнения. Распространение примеси с неоднородной начальной концентрацией приводит к более чем двукратному увеличению размеров области проникновения загрязнения, по сравнению со случаем постоянной начальной концентрации.

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.: Amer. Geophys. Union. – 1987. – 4. – 208 p.
2. *Фомин В. В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Науч. тр. УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246–255.
3. *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. 115–120.
4. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, 1. The basic experiment // Mon. Weath. Rev. – 1963. – 91. – P. 99–164.
5. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – 20. – P. 851–875.
6. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3. Азовское море.* – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. – 218 с.
7. *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.
8. *Григоркина Р. Г., Фукс В. Р.* Воздействие тайфунов на океан. – Ленинград: Гидрометеоиздат, – 1986. – 244 с.
9. *Courant R., Friedrichs K. O., Lewy H.* On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967. – No 3. – P. 215–234.

**Т. Я. Шульга**

**Вплив неоднорідного початкового розподілу концентрації домішки на її трансформацію в Азовському морі при проходженні циклону**

*З використанням тривимірної нелінійної математичної моделі знайдено чисельні характеристики поширення домішки в Азовському морі при наявності циклонічного збурення. Виконано порівняння часу розсіяння та максимального об'єму проникнення домішки з постійним і змінними початковими розподілами концентрації. Показано, що розсіяння домішки уповільнюється із зростанням градієнта початкової концентрації.*

**T. Ya. Shul'ga**

**The influence of the inhomogeneous initial distribution of the impurity concentration on its transformation into the Sea of Azov during the cyclone transit**

*In the framework of a three-dimensional nonlinear mathematical model, the quantitative characteristics of a pollutant spread in the Sea of Azov in the presence of a cyclonic disturbance in the atmosphere are found. The comparison of the time dispersion and the maximum amount of penetrating impurities with constant and variable initial distributions of concentrations is carried out. It is shown that the impurity spreading decelerates, as the initial concentration gradient increases.*