



УДК 532.59

© 2007

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

Исследование влияния течений, вызванных западным ветром, на эволюцию областей загрязнения в Азовском море

Estimations of the effect of western winds on the evolution of the pollution areas in the Sea of Azov are obtained as a result of the numerical simulation by using a three-dimensional nonlinear mathematical model. The analysis of the dependences of the admixture full dissipation time, maximum area of the pollution, and the transformation of admixture spots on the wind velocity and depth is executed.

Экологическое состояние морских бассейнов и их биологическая продуктивность непосредственно связаны с поступлением в водную среду загрязняющих органических и неорганических веществ, включая антропогенные загрязнения. Существует ряд работ по исследованию эволюции примеси в Черном море. Так, в статье [1] генератором движения жидкости принимается постоянный и усредненный на определенных промежутках времени ветер; в [2] — исследуются процессы переноса и диффузии загрязняющих веществ, вызванные прохождением циклонов над Черным морем. В настоящем сообщении методом математического моделирования изучается влияние однородного по пространству и меняющегося по времени ветра на трансформацию локальных областей загрязнения в Азовском море, а также анализируется эволюция полей концентрации примеси, вызываемая ветровыми течениями.

1. Введем декартову систему координат. Ось x направим на восток, y — на север и z — вертикально вверх. В качестве исходных используем нелинейные уравнения движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [3, 4]:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{11}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{12}) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{21}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{22}) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

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

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

Здесь u, v, w — компоненты скорости по осям x, y, z соответственно; t — время; $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$; p — давление; ρ — плотность; g — ускорение свободного падения; K_M — коэффициент вертикальной турбулентной вязкости; f — параметр Кориолиса.

Компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса τ_{ij} определяются по формулам, согласно статье [3],

$$\tau_{11} = 2A_M \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{12} = \tau_{21} = A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad \tau_{22} = 2A_M \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (5)$$

где A_M — коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости.

Полагая, что области загрязнения состоят из частиц одного типа, запишем для их концентрации (C) уравнение переноса диффузии:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (6)$$

Здесь A_H и K_H — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии.

Граничные условия на свободной поверхности следующие:

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad (7)$$

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

При этом $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$ и $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$ — проекции касательных напряжений ветра; $\mathbf{W} = (W_x; W_y)$ — вектор скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря; C_a — коэффициент поверхностного трения, определяемый по соотношению, предложенному авторами статьи [5].

Область загрязнения в момент выброса ($t = 0$) имеет вид пятна радиусом R и толщиной z_1 :

$$C_0(x, y, z) = \begin{cases} 1, & r \leq R, \quad 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, \quad z \leq 0; \quad r \leq R, \quad z < -z_1, \end{cases} \quad (8)$$

где $C_0(x, y, z) = C(x, y, z, 0)$, $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ — расстояние от центра возмущения (x_0, y_0) до точки, в которой вычисляется концентрация; z_1 — толщина верхнего расчетного слоя.

На боковых границах выполняются условия прилипания для скоростей [4] и отсутствие потока в направлении внешней нормали. На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости, касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [3], поток примеси отсутствует:

$$\left(w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0, \quad (9)$$

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

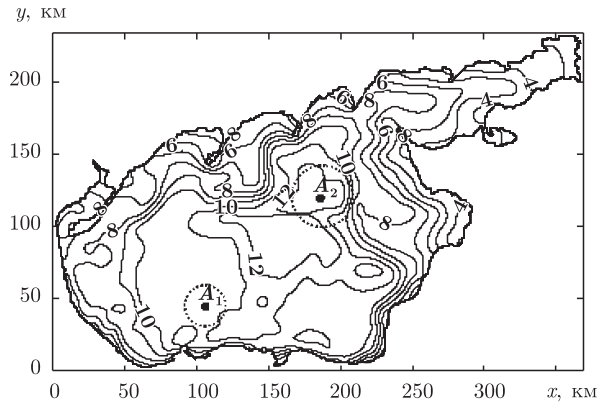


Рис. 1. Рельеф дна (м) Азовского моря и положение источников загрязнения в начальный момент времени. Пункт выброса загрязнений: A_1 — в районе мыса Казантип, A_2 — над самой глубоководной ($H = 12$ м) частью моря

Здесь $\tau_{1x} = C_b u \sqrt{u^2 + v^2}$, $\tau_{1y} = C_b v \sqrt{u^2 + v^2}$, C_b — коэффициент донного трения, который находим по известной формуле [3]: $C_b = k^2 / \ln^2(z_2/z_0)$, где z_2 — шаг по вертикали в придонном слое, $z_0 = 0,003$ м — параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности, $k = 0,4$ — постоянная Кармана.

В начальный момент времени $t = 0$ движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна, концентрация примеси задана:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \\ \zeta(x, y, z, 0) = 0, \quad C(x, y, z, 0) = C_0(x, y, z). \end{aligned} \quad (10)$$

2. В исходных уравнениях (1)–(4), (6), в граничных (7), (9) и начальных (10) условиях осуществляется переход от координаты z к координате σ [2, 3]:

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = \frac{z - \zeta}{H + \zeta}, \quad t^* = t, \quad \sigma \in [0, -1]. \quad (11)$$

Поле горизонтальных скоростей представляется в виде суммы двух составляющих: средней по глубине компоненты и отклонения от нее. Согласно этому уравнению, движения расщепляются на две системы [3]: из первой — определяются осредненные горизонтальные скорости и уровень моря; из второй — отклонения горизонтальных скоростей от их средних значений и вертикальная скорость. Операторы переноса аппроксимируются с помощью TVD-схемы [6], пространственная дискретизация уравнений выполняется на сетке с равномерными шагами $\Delta x = 1,4$ км, $\Delta y = 1,3$ км по горизонтальным координатам и с переменным шагом по σ -координате. Количество расчетных уровней σ_m по вертикали равно 11. Уравнения для нахождения осредненных горизонтальных скоростей и уровня моря интегрируются с шагом $\Delta t = 18$ с, для вертикальной скорости — с шагом $10\Delta t$. Для параметризации вертикального турбулентного обмена используется теория Меллора–Ямады [7]. Модельный рельеф дна Азовского моря иллюстрирует рис. 1.

3. Для расчета областей загрязнений вследствие процессов адвекции и диффузии были выбраны следующие значения коэффициентов турбулентной диффузии: $A_H = 10$ м²/с, $K_H = 10^{-4}$ м²/с [2, 8]. Выброс загрязнения происходит при $t = 0$ в виде пятна (8), занимающего площадь S_0 , где концентрация примеси равна 1.

Скорость и направление переноса примеси определяются течениями в районе выброса, вызываемыми различными гидрометеорологическими условиями. Трансформация области загрязнения изучается при условии отсутствия ветра над Азовским морем и при наличии переменного ветра.

В качестве действующего ветра выбран западный ветер ($W_x \neq 0, W_y = 0$), скорость которого изменяется по такому закону: в начальный момент времени вода находится в состоянии покоя, уровень горизонтален, а скорость ветра нулевая. При $t > 0$ начинает действовать однородный по пространству ветер заданного (постоянного) направления, скорость которого нарастает со временем ($0 < t \leq t_1$) по линейному закону. В дальнейшем скорость ветра сохраняет постоянное значение ($t_1 < t \leq t_2$), при $t_2 < t \leq t_3$ убывает по линейному закону до нуля и далее ($t_3 < t \leq t_4$) не меняется.

Таким образом, составляющая скорости ветра ($W_x = U$) задается соотношением

$$U_i(t) = \begin{cases} a_i t, & 0 < t \leq t_1, \\ a_i t_1, & t_1 < t \leq t_2, \\ a_i t_1 - a_i(t - t_2), & t_2 < t \leq t_3, \\ 0, & t_3 < t \leq t_4. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь $t_1 = 3$ ч, $t_2 = t_1 + 12$ ч, $t_3 = t_2 + 3$ ч, $t_4 = t_d$ — время, когда максимальная концентрация примеси становится равной $2,5 \cdot 10^{-2}$; $a_i t_1 = \max U_i = U_i^0$ ($i = \overline{0, 3}$) — максимальная скорость ветра: $U_0^0 = 0$, $U_1^0 = 10$ м/с, $U_2^0 = 15$ м/с, $U_3^0 = 20$ м/с.

В первой серии численных экспериментов оценим влияние максимума скорости западного ветра на трансформацию области загрязнения в районе пункта **A**₁, где осваиваются газовые месторождения (см. рис. 1). Глубина моря в этом районе 10 м; центр выброса находится в точке с координатами $x_0 = 110$ км, $y_0 = 45$ км; радиус пятна примеси 6 км. Считаем загрязнение рассеявшимся при условии, когда максимум концентрации в пятне C_d равен $2,5 \cdot 10^{-2}$.

Проанализируем изменение площади загрязнения с течением времени на горизонтах: $z = 0$, $z = -H/2 = h_1$ и $z = -H + z_2 = h_2$. Для этого введем величину K_{\max} , равную отношению площади, охватываемой изолинией концентрации примеси C_d , в момент времени $t = t_{\max}$ к площади первоначального загрязнения ($K_{\max} = S_{\max}/S_0$). В табл. 1 приведены значения коэффициента (K_{\max}) и соответствующие им моменты времени (t_{\max}) на различных глубинах моря для четырех значений максимальной скорости ветра. Также даны моменты времени (где t_d — время полного рассеяния примеси в пункте **A**₁), при которых максимум концентрации на тех же глубинах равен C_d .

Из анализа данных, приведенных в верхней части табл. 1, следует, что при отсутствии ветра ($U_0^0 = 0$) наибольшая площадь загрязнения имеет место для $z = h_1$, а наименьшая — у дна моря. Период времени, за который отношение $S(t)/S_0$ становится максимальным, возрастает с глубиной. Также с глубиной увеличивается время полного рассеяния загрязнения. В нижней части таблицы представлены результаты численного моделирования изменения областей загрязнения при условии, что над морем действует ветер, заданный соотношением (12). Видно, что с увеличением максимальной скорости ветра в 2 раза (от $U_1^0 = 10$ до $U_3^0 = 20$ м/с) на различных глубинах моря площадь распространения загрязнения увеличивается в 1,1–1,2 раза. Период времени, за который область загрязнения становится максимальной, с увеличением U_i^0 уменьшается (от 2 ч 02 мин до 1 мин). С увеличением

максимальных скоростей ветра период полного рассеяния загрязнения на различных глубинах возрастает от 1 ч 21 мин до 5 ч 04 мин.

Для каждой из рассматриваемых значений максимальной скорости ветра отметим следующее: с глубиной наибольший коэффициент загрязнения имеет место на горизонте $z = -5$ м, а наименьший — в придонном слое ($z = -9,8$ м). Также с глубиной возрастают период времени, за который область загрязнения становится максимальной, и период полного рассеяния загрязнения.

Второй численный эксперимент выполнен для области загрязнения, центром которой является пункт A_2 ($x_0 = 180$ км, $y_0 = 120$ км). Глубина моря в этом районе максимальна для Азовского моря и составляет 12 м. Радиус пятна примеси равен 9 км.

Аналогично первому численному эксперименту нами определено (табл. 2), что при отсутствии ветра периоды времени, в течение которых площадь загрязнения достигает максимума, и период полного ее рассеяния возрастают с глубиной. Наибольшая площадь области загрязнения имеет место на горизонте 6 м, а наименьшая у дна моря.

При увеличении максимума скорости ветра в 2 раза наибольшая площадь концентрации примеси возрастает до 6%. Периоды времени, за которые площадь загрязнения достигает максимума, возрастают (от 4 ч 01 мин до 2 ч 57 мин) с увеличением U_i^0 . На различных

Таблица 1

U_i^0 , м/с	Глубина, м	t_{\max}	K_{\max}	t_d
0	$z = 0$	6 ч 31 мин	1,11	21 ч 10 мин
	$z = -5$	15 ч 08 мин	1,30	42 ч 07 мин
	$z = -9,8$	27 ч 11 мин	1,03	57 ч 01 мин
10	$z = 0$	7 ч 41 мин	1,32	21 ч 40 мин
	$z = -5$	17 ч 13 мин	1,36	43 ч 08 мин
	$z = -9,8$	33 ч 05 мин	1,26	58 ч 11 мин
15	$z = 0$	7 ч 15 мин	1,36	22 ч 01 мин
	$z = -5$	17 ч 12 мин	1,46	43 ч 45 мин
	$z = -9,8$	32 ч 06 мин	1,29	61 ч 15 мин
20	$z = 0$	6 ч 00 мин	1,43	23 ч 01 мин
	$z = -5$	16 ч 58 мин	1,58	44 ч 10 мин
	$z = -9,8$	31 ч 03 мин	1,36	63 ч 15 мин

Таблица 2

U_i^0 , м/с	Глубина, м	t_{\max}	K_{\max}	t_d
0	$z = 0$	6 ч 05 мин	1,12	23 ч 12 мин
	$z = -6$	19 ч 10 мин	1,19	43 ч 06 мин
	$z = -11,8$	32 ч 01 мин	1,07	62 ч 07 мин
10	$z = 0$	8 ч 03 мин	1,24	24 ч 02 мин
	$z = -6$	21 ч 02 мин	1,32	44 ч 13 мин
	$z = -11,8$	36 ч 15 мин	1,18	65 ч 04 мин
15	$z = 0$	7 ч 07 мин	1,30	24 ч 33 мин
	$z = -6$	18 ч 05 мин	1,35	46 ч 07 мин
	$z = -11,8$	34 ч 12 мин	1,21	68 ч 15 мин
20	$z = 0$	6 ч 13 мин	1,36	25 ч 04 мин
	$z = -6$	17 ч 01 мин	1,39	47 ч 07 мин
	$z = -11,8$	31 ч 07 мин	1,25	70 ч 09 мин

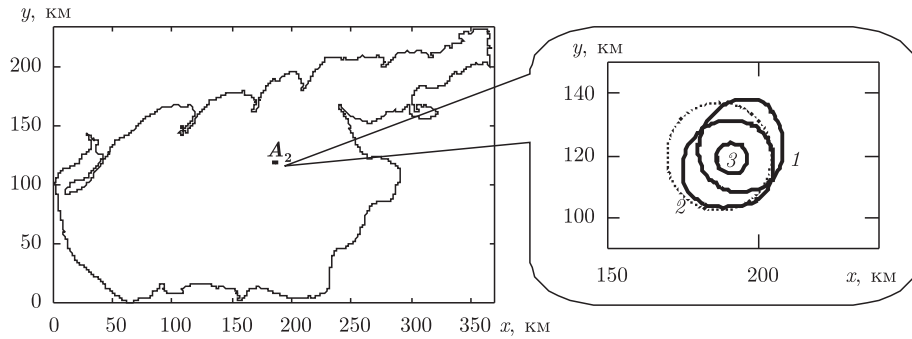


Рис. 2. Смещение пятна примеси на поверхности моря при западном ветре:
1 — через 16 ч; 2 — через 36 ч; 3 — через 61 ч

глубинах моря период полного рассеяния загрязнения возрастает (от 0 ч 31 мин до 5 ч 05 мин) с ростом максимальной скорости ветра. При рассматриваемых значениях U_i^0 наибольший коэффициент отношения площадей загрязнения наблюдается на горизонте 6 м, а наименьший — в придонном слое.

Трансформацию пятна примеси на поверхности моря в пункте A_2 при западном ветре максимальной скорости 15 м/с иллюстрирует рис. 2. Точечной линией показана область первоначального загрязнения. Граница области загрязнения при $t = 16$ ч, когда имеют место наиболее интенсивные течения, — линия 1. На свободной поверхности области с концентрацией $C \geq C_d$ становятся вытянутыми в направлении течений. Области загрязнения при этом перемещаются на восток. Над акваторией моря к 32 ч (линия 2) ветра уже нет. На данном этапе происходит сокращение площадей загрязнения и уменьшение концентрации примеси. Граница области загрязнения при $t = 61$ ч — линия 3, далее максимальная концентрация примеси на свободной поверхности становится меньше C_d , что соответствует полному рассеянию загрязнения.

1. Коротенко К. А., Дмитрих Д. Е., Боуман М. Дж. Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Черном море // *Океанология*. — 2003. — **43**, № 4. — С. 504–515.
2. Алексеев Д. В., Иванов В. А., Иванча Е. В. и др. Исследование эволюции трехмерной структуры поля примеси на северо-западном шельфе Черного моря при прохождении циклонов // *Метеорология и гидрология*. — 2006. — № 1. — С. 86–94.
3. Blumberg A. F., Mellor G. L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models // *Coast. and Estuar. Sci.* — 1987. — No 4. — P. 1–16.
4. Черкесов Л. В., Иванов В. А., Хартиев С. М. Введение в гидродинамику и теорию волн. — Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. — 264 с.
5. Large W. G., Pond S. Open ocean momentum fluxes in moderate to strong winds // *J. Phys. Oceanogr.* — 1981. — No 11. — P. 324–326.
6. Фомин В. В. Применение схем TVD для численного моделирования фронтальных зон солености в мелком море // *Метеорология и гидрология*. — 2006. — № 2. — С. 59–68.
7. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* — 1982. — No 20. — P. 851–875.
8. Демьяшев С. Г., Кныш В. В., Коротаев Г. К. Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря // *Мор. гидрофиз. журн.* — 2002. — № 3. — С. 12–26.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 02.10.2006