

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ВЕТРОВЫХ ТЕЧЕНИЙ НА
ЭВОЛЮЦИЮ ОБЛАСТЕЙ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ В АЗОВСКОМ МОРЕ**

В.В. Фомин*, Т.Я. Шульга**

*Украинский научно-исследовательский
гидрометеорологический институт

**Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь ул. Капитанская, 2

E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net

В результате численного моделирования с использованием трехмерной нелинейной σ -координатной модели получены оценки влияния западного ветра на трансформацию областей загрязнения в Азовском море. Выполнен анализ времени полного рассеивания примеси, максимальной площади загрязнения и трансформации пятен примеси от скорости ветра и глубины моря в месте выброса.

Введение. Экологическое состояние морских бассейнов и их биологическая продуктивность непосредственно связаны с поступлением в морскую среду загрязняющих органических и неорганических веществ, включая антропогенные загрязнения. Существует ряд работ по исследованию эволюции примеси в Черном море. В [1] изучаются процессы переноса и диффузии загрязняющих веществ, вызванных прохождением циклонов над Черным морем.

В качестве исходных используем нелинейные уравнения движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [2, 3] и уравнение переноса диффузии [4]:

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

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

Здесь u, v, w – компоненты скорости по осям x, y, z соответственно; p – давление; ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; K_M – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости; f – параметр Кориолиса, A_H и K_H – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии, C – концентрация частиц области загрязнения. Компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса τ_{ij} в (1) определяются через компоненты скоростей по формулам: $\tau_{11} = 2A_M \frac{\partial u}{\partial x}$, $\tau_{22} = 2A_M \frac{\partial v}{\partial y}$,

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

где A_M – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, вычисляемый по формуле Смагоринского. Граничные условия на свободной поверхности имеют вид:

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad (2)$$

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

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.

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

$$\left(w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0, \quad (3)$$

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

Здесь $\tau_{1x} = c_b u \sqrt{u^2 + v^2}$, $\tau_{1y} = c_b v \sqrt{u^2 + v^2}$, $c_b = k^2 / (\ln^2 z_2 / z_0)$ – коэффициент донного трения, z_2 – шаг по вертикали в придонном слое, а $z_0 = 0,003$ м – параметр шероховатости, $k = 0,4$ постоянная Кармана. Область загрязнения при $t=0$ расположена на поверхности и имеет вид пятна радиуса R толщиной z_1 :

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

при этом $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ — расстояние от центра (x_0, y_0) возмущения до точки, в которой вычисляется концентрация, z_1 — толщина верхнего расчетного слоя. В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна, концентрация примеси задана:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \\ w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0, \\ C(x, y, z, 0) = C_0(x, y, z). \end{aligned} \quad (4)$$

В исходных уравнениях (1), граничных условиях (2), (3), и начальных условиях (4) осуществляется переход от координаты z к σ -координате [1, 2]: $x^* = x, y^* = y, t^* = t, \sigma = (z - \zeta)/(H + \zeta), \sigma \in [-1; 0]$.

Модельный рельеф дна Азовского моря представлен на рисунке 1. В узлах сетки он

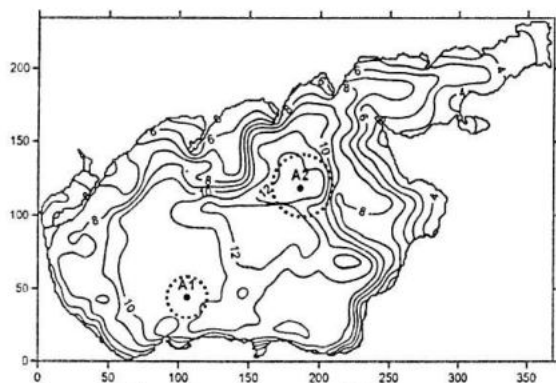


Рисунок 1 — Рельеф дна (м) Азовского моря и положение источников загрязнения

снимался с навигационной карты. Количество расчетных уровней σ_m по вертикали равно 11. Уравнения интегрировались с шагом $\Delta t = 18$ с для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря и $10\Delta t$ для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компоненты скорости. Для параметризации вертикального турбулентного обмена использовалась теория Меллора-Ямады.

Для расчета были выбраны следующие значения коэффициентов турбулентной диффузии: $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}, K_H = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Выброс загрязнения происходит в виде пятна, занимающего площадь S_0 , где концентрацией примеси равна 1. Места выброса загрязнений показаны на рисунке 1: A_1 — в районе мыса Казантип и A_2 — над самой глубоководной ($H = 12 \text{ м}$) частью моря.

В качестве действующего ветра выбран западный ветер, скорость которого изменяется по следующему закону. При $t > 0$ на водную поверхность начинает действовать ветер заданного (постоянного) направления, скорость которого нарастает со временем ($0 < t \leq t_1$) по линейному закону. Далее ($t_1 < t \leq t_2$) скорость ветра в каждой точке акватории достигает своего максимального значения 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, изменение во времени составляющей скорости ветра ($W_x = U$) задается следующим соотношением:

$$U_i(t) = \begin{cases} a_i t, & 0 < t \leq t_1 \\ a_i t_1, & t_1 < t \leq t_2 \\ a_i t_1 - a_i(t - t_2), & t_2 < t \leq t_3 \\ 0, & t_3 < t \leq t_4 \end{cases} \quad (5)$$

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

В первой серии численных экспериментов оценим влияние максимума скорости западного ветра на изменение области загрязнения в районе A_1 , где осваиваются газовые месторождения и глубина моря составляет 10 м. Радиус пятна примеси принимаем равным 6 км и считаем загрязнение рассеявшимся, когда максимум концентрации станет равным C_d .

Проанализируем, как изменяется площадь загрязнения с течением времени на горизонтах: $z=0, z=-H/2=h_1, z=-H+z_2=h_2$. Для этого введем безразмерную 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 таблицах 1, 2 приведены значения коэффициента K_{\max} и соответствующие им моменты времени на различных глубинах моря для четырех значений максимальной скорости ветра. Также даны моменты времени, при которых максимум концентрации на тех же глубинах становится равным C_d .

Таблица 1 — Значения K_{\max} , время их достижения и время полного рассеяния примеси в A_1 на различных глубинах моря для четырех значений максимальной скорости ветра

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

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, следует, что при отсутствии ветра для каждого из рассматриваемых значений максимальной скорости ветра наибольший коэффициент загрязнения наблюдается на горизонте $z=h_1$, а наименьший у дна. Также с глубиной увеличивается время полного рассеяния загрязнения. При увеличении максимальной скорости ветра в 2 раза на различных глубинах моря площадь загрязнения увеличивается в 1,1 — 1,2 раза. Период времени, за который область загрязнения становится максимальной, с ростом U^0 уменьшается (от 2 ч 02 мин до 1 мин), время полного рассеяния загрязнения на различных глубинах возрастает (от 1 ч 21 мин до 5 ч 04 мин).

Таблица 2 — Значения K_{\max} , время их достижения и время полного рассеяния примеси в A_2 на различных глубинах моря для четырех значений максимальной скорости ветра

U^0 (м/с)	z (м)	t_{\max}	K_{\max}	t_d
0	0	6ч 05мин	1,11	23ч 12мин
	-5	19ч 10мин	1,19	43ч 06мин
	-10	32ч 01мин	1,07	62ч 07мин
10	0	8ч 03мин	1,24	24ч 02мин
	-5	21ч 02мин	1,32	44ч 13мин
	-10	36ч 15мин	1,18	65ч 04мин
15	0	7ч 07мин	1,30	24ч 33мин
	-5	18ч 05мин	1,35	46ч 07мин
	-10	34ч 12мин	1,21	68ч 15мин
20	0	6ч 13мин	1,36	25ч 04мин
	-5	17ч 01мин	1,39	47ч 07мин
	-10	31ч 07мин	1,25	70ч 09мин

Второй численный эксперимент выполнен для загрязнения, центром которого 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 принимается равным 9 км.

Из таблицы 2 следует, что при увеличении скорости ветра в 2 раза максимум площади загрязнения возрастает на 6%. Время достижения максимума при этом уменьшается (от 4 ч 01 мин до 2 ч 57 мин). На рассматриваемых глубинах моря, с ростом максимальной скорости ветра период полного рассеяния загрязнения увеличивается (от 31 мин до 5 ч 05 мин). Наибольшее значение K_{\max} имеет место при $z=h_1$, а наименьшее в придонном слое.

Заключение. В результате численного моделирования выявлены особенности изменений областей загрязнений от мгновенных источников в Азовском море. Расчеты проведены при условии отсутствия ветра и действия переменного западного ветра. Анализ результатов показал, что увеличение максимальной скорости ветра приводит к росту площади загрязнения, наименьшая площадь загрязнения имеет место при отсутствии ветра. Время достижения максимума загрязнения уменьшается, а время полного рассеяния увеличивается при больших скоростях ветра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Д.В., Иванов В.А., Иванча Е.В., Фомин В.В., Черкесов Л.В. Исследование эволюции трехмерной структуры поля примеси на северо-западном шельфе Черного моря при прохождении циклонов. Метеорология и гидрология № 1, 2006. — С. 86 — 94.
2. Blumberg A.F., Mellor G.L. 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. Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М. Введение в гидродинамику и теорию волн. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 264 с.
4. Yang Zh, Hamrick I.M. Variational inverse parameter estimation in a cohesive sediment transport model: An adjoint approach. Journal of Geophysical Research, 108, C2, 2003. — P. 37-1 — 37-10.