

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В РАЙОНАХ ОДЕССКОГО ЗАЛИВА И ДНЕПРО-БУГСКОГО ЛИМАНА

*Д.В. Алексеев, В.А. Иванов, Е.В. Иванча,  
В.В. Фомин, Л.В. Черкесов*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
*E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net*

*Изучается распространение загрязнений от поверхностных мгновенных и постоянно действующих источников, расположенных в Одесском заливе, у северного побережья северо-западного шельфа Черного моря и в Днепро-Бугском лимане. Поля нестационарных течений генерируются циклоном. Анализируются временная эволюция полей концентрации загрязнения, глубина ее проникновения и, в случае мгновенных источников, время рассеивания примеси.*

**Введение.** Математическому моделированию возможных сценариев распространения загрязняющих веществ в Черном море под действием адвекции и турбулентной диффузии посвящен ряд работ [1–3]. В них адвекция происходила вследствие гидродинамических процессов как климатического, так и синоптического масштабов. При этом существовали проблемы, связанные с разрешением особенностей береговой линии типа заливов, лиманов и эстуариев рек. Трудности обусловлены либо высокими вычислительными затратами при проведении расчетов для всего морского бассейна, либо необходимостью задания условий на открытых границах при расчетах для локальных акваторий. В решении подобных проблем перспективным является подход, связанный с использованием вложенных сеток [4]. В данной работе такой подход реализован при изучении временной эволюции полей концентрации загрязнений, возникших в результате действия мгновенных и постоянно действующих источников в Одесском заливе, у северного побережья северо-западного шельфа Черного моря и в Днепро-Бугском лимане. При этом перенос загрязняющей примеси определялся нестационарными течениями, генерируемыми движущимся циклоном.

**Математическая модель.** Будем исходить из нелинейных уравнений движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики и уравнения адвекции-диффузии пассивной примеси [5]

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right), \\ \frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right), \\ p &= p_a + g\rho(\eta - z), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \\ \frac{dC}{dt} &= A_H \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + K_H \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

В (1)  $u, v, w$  – компоненты скорости по осям  $x, y, z$ , направленным соответственно на восток, север и вертикально вверх;  $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$ ;  $f$  – параметр Кориолиса;  $p$  – давление;  $p_a$  – атмосферное давление;  $\rho$  – плотность воды;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\eta$  – уровень моря;  $\tau_{ij}$  – горизонтальные компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса, определяемые через компоненты скорости по формулам

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

$A_M$  и  $K_M$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости, вычисляемые, соответственно, по формуле Смагоринского и с использованием теории Мейлора-Ямады;  $C$  – концентрация примеси;  $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$  и  $K_H = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии. Считая радиус циклонического образования равным  $R$ , представим  $p_a$  в виде осесимметричной области пониженного давления

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2 \left( \frac{\pi r}{2R} \right) + \bar{p}_a, & r \leq R; \\ \bar{p}_a, & r > R, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\bar{p}_a$  – фоновое значение давления,  $p_0$  – максимальное отклонение от  $\bar{p}_a$  в атмосферном возмущении,  $r$  – расстояние от точки  $\{x, y\}$  до центра циклона.

На свободной поверхности ( $z = \eta(x, y, t)$ ) для скоростей задаются кинематическое и динамические условия [5]

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad (4)$$

$$\rho K_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = \{ \tau_{0x}, \tau_{0y} \}.$$

Составляющие тангенциального напряжения ветра  $\{ \tau_{0x}, \tau_{0y} \}$  выражаются через плотность воздуха и скорость приводного ветра, соответствующего заданному полю давления (3). На дне ( $z = -H(x, y)$ ) равна нулю нормальная составляющая скорости, а касательные напряжения  $\{ \tau_{bx}, \tau_{by} \}$  определяются через компоненты скорости жидкости [5]

$$w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

$$\rho K_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = \{ \tau_{bx}, \tau_{by} \}.$$

На твердых боковых границах выполняется условие прилипания.

Для двух типов источников загрязнения на свободной поверхности используются разные граничные условия. В случае мгновенных поверхностных источников задается нулевой поток примеси, а в случае постоянно действующих источников – постоянный поток  $Q$ . На дне и боковых границах бассейна в обоих случаях предполагается отсутствие потоков загрязняющих веществ.

Циклон пересекает северо-западный шельф Черного моря с запада на восток в широтном направлении. В начальный момент времени он находится за пределами акватории и возмущения жидкости отсутствуют. Параметры циклона выбирались характерными для черноморского региона: радиус 500 км, скорость перемещения 5 м/с, перепад давления между центром и периферией 15 гПа. Загрязнения от мгновенных источников, представляющие собой круговые области радиусом 2 км с концентрацией равной 1, появляются на свободной поверхности, когда скорости нестационарных

течений в месте выброса достигают значений 1 см/с. Постоянно действующие источники функционируют только во время перемещения циклона над акваторией северо-западного шельфа. Мощность  $Q$  каждого из них составляет  $10^{-7}$  кг/м<sup>2</sup>.

Уравнения (1) с граничными условиями (4), (5) после перехода к  $\sigma$ -координатной системе по формуле  $\sigma = (z - \eta)/(H + \eta)$  решались численно [4].

#### Результаты численных экспериментов.

Вначале рассмотрим траектории смещения, глубины проникновения и время рассеивания загрязнений от трех мгновенных источников. Начальные положения пятен отмечены на рис. 1 серым цветом. Границами областей загрязнения считаем изолинию концентрации 0,005.

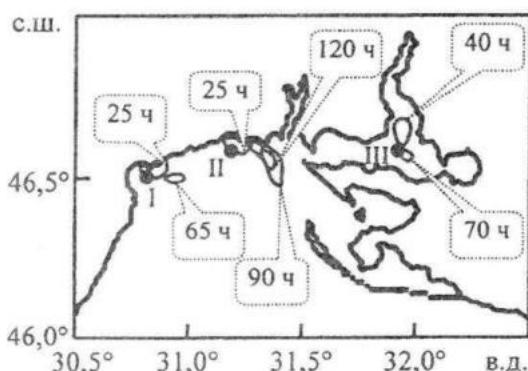


Рис. 1 – Трансформация с течением времени изолиний концентрации 0,005 на поверхности моря при экспериментах с мгновенными поверхностными источниками

Сначала под влиянием юго-западных ветров передней части циклона поверхностные течения увлекают все три области загрязнения в северо-восточном направлении. Выбросы I и II приближаются вплотную к берегу, и после 36 ч (отсчет времени производится от начала движения циклона) примесь уходит вглубь, исчезая с поверхности моря. На этом этапе перемещения циклона на северо-западном шельфе устанавливается циклоническая циркуляция. Область III, сместившись к северу, останавливается и начинает движение в противоположном направлении. Далее воздействие северо-западных ветров, связанных с тыловой частью циклона, приводит к формированию на шельфе полей течений с преобладающими юго-восточным и восточным направлениями. Области I и II в 50 ч подни-

маются возле берега к поверхности и начинают смещаться на восток или юго-восток, а область III в мелководном Днепро-Бугском лимане продолжает движение на юг. Там максимальная глубина проникновения примеси составляет 2-3 м, время рассеивания загрязнения равно 55 ч, что меньше, чем в двух других случаях. Глубже всего (до 12 м) примесь проникает в Одесском заливе, а для ее рассеивания необходимо около 80 ч. На несколько меньшую глубину проникает примесь у северного побережья (до 11 м), зато рассеивается она за значительно большее время (порядка 120 ч).

Перейдем к исследованию временной эволюции полей концентрации загрязняющих веществ, поступающих от расположенных у берега постоянно действующих поверхностных источников (I-III на рис.2). Как и ранее, направления адвекции примеси обусловлены тремя последовательно сменяющими друг друга направлениями нестационарных течений, генерируемых, соответственно, передней, центральной и тыловой частями циклона. Вначале, вследствие переноса на север и северо-восток, загрязняющие вещества от источников I и II накапливаются у берега. И только в Днепро-Бугском лимане их заметно относит на север. После установления циклонической циркуляции примесь из Одесского залива начинает выноситься вдоль берега на юго-запад, а от северного побережья и из Днепро-Бугского лимана – на запад (затемненные области на рис. 2). При выходе циклона с акватории шельфа образуется циркуляция антициклонической направленности, характеризующаяся наибольшими скоростями течений за все время исследования. Следствием этого является значительное увеличение площадей областей загрязнения и удаление их границ на максимальное расстояние от места выброса на юго-восток (I и II) и на север (III) (незатемненные области на рис. 2).

Имеющая место общая закономерность уменьшения глубины проникновения примеси по мере удаления от источника и при приближении к периферии загрязненного района нарушается в Днепро-Бугском лимане. Его относительная изолированность приводит к возникновению локальных колебаний, которые существенно усложняют пространственно-временное распределение глубин проникновения примеси.

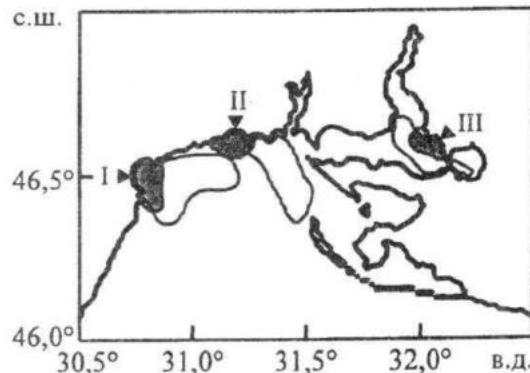


Рис. 2 – Области с концентрацией примеси более  $10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup> на поверхности моря в 55 ч (затемненные области) и в 80 ч (незатемненные области) при экспериментах с постоянно действующими поверхностными источниками

Итак, во всех численных экспериментах направления переноса выбросов загрязнения отражают особенности сложившейся синоптической ситуации. В дальнейшем представляет интерес рассмотрение совместного влияния на распространение примеси динамических процессов синоптического и климатического масштабов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К.А. Коротенко, Д.Е. Дитрих, М.Дж. Боуман Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Черном море. Океанология, т.43, №4, 2003. – С. 504–515.
2. Р.А. Ибраев, В.И. Кукса, А.Ю. Скирта Моделирование переноса пассивной примеси вихревыми течениями в восточной части Черного моря. Океанология, т.40, №1, 2000. – С. 18–25.
3. С.Г. Демышев, А.С. Запевалов, Т.В. Чудиновских, Д.У. Ментц Моделирование возможных последствий захоронения токсичных веществ в глубоководной зоне Черного моря. Метеорология и гидрология, №3, 2003. – С. 64–74.
4. Д.В. Алексеев, Е.В. Иванча, В.А. Иванов, В.В. Фомин, Л.В. Черкесов Моделирование эволюции волновых полей в районе северо-западного шельфа Черного моря при прохождении циклона. Морской гидрофизический журнал, №1, 2005. – С.42–54.
5. 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, vol. 4, 1987. – P. 1–16.