

# ВЛИЯНИЕ ДЛИННЫХ ВОЛН НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ

Ю.В. Манилюк, Д.В. Алексеев,  
Е.В. Иванча

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

*В работе изучается трансформация пятен загрязнений в поле баротропных длинных волн, генерируемых циклоном, движущимся над Черным морем. Выбрано несколько точек возможного выброса загрязняющих веществ. Исследуются изменения формы и смещения образовавшихся при этом локальных полей примеси в зависимости от сложившейся гидродинамической ситуации.*

**Введение.** Известно, что для Черноморского региона характерна достаточно высокая циклоническая активность [1]. Воздействие касательных напряжений ветра и переменного давления на поверхность моря при прохождении атмосферного возмущения может вызывать интенсивные волновые течения [2], влияя, тем самым, на такие процессы в водной среде, как трансформация локальных выбросов загрязнения. Однако, в большинстве работ, посвященных распространению примеси в акватории Черного моря, в качестве источника энергии движений жидкости рассматривался либо постоянный, либо усредненный на определенных промежутках времени ветер [3, 4]. Попытка исследовать влияние параметров атмосферного возмущения на форму и смещение области загрязнения в районе северо-западного шельфа предпринята в [5]. В данной работе изучается влияние морфометрии дна и профиля береговой линии на процесс трансформации локальных выбросов примеси при прохождении барического образования типа циклона над Черным морем.

**Математическая модель.** Будем исходить из уравнений теории мелкой воды в полных потоках [6] и уравнения переноса-диффузии пассивной примеси [5]:

$$U_t + gH\zeta_x - fV = -\frac{1}{\rho} \left( H p_x - \tau_1^w + \tau_1^h \right), \quad (1)$$

$$V_t + gH\zeta_y + fU = -\frac{1}{\rho} \left( H p_y - \tau_2^w + \tau_2^h \right), \quad (2)$$

$$\zeta_t = -U_x - V_y, \quad (3)$$

$$\varphi_t + u\varphi_x + v\varphi_y = K(\varphi_{xx} + \varphi_{yy}). \quad (4)$$

Здесь  $U(x,y,t)$  и  $V(x,y,t)$  – компоненты вектора полного потока  $\mathbf{U}$  вдоль горизонтальных осей  $x$  и  $y$ ;  $\zeta(x,y,t)$  – возвышение свободной поверхности;  $H(x,y)$  – глубина жидкости;  $\rho$  – ее плотность;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f$  – параметр Кориолиса;  $p(x,y,t)$  – возмущение атмосферного давления;  $\tau_1^w$ ,  $\tau_2^w$  и  $\tau_1^h$ ,  $\tau_2^h$  – проекции векторов касательного напряжения ветра и напряжения придонного трения на оси  $x$ ,  $y$  соответственно;  $\varphi(x,y,t)$  – концентрация вещества,  $u(x,y,t) = U(x,y,t)/[H(x,y)+\zeta(x,y,t)]$ ,  $v(x,y,t) = V(x,y,t)/[H(x,y)+\zeta(x,y,t)]$  – горизонтальные составляющие вектора скорости,  $K$  – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии. Индексы  $x$ ,  $y$  и  $t$  означают дифференцирование по пространственным переменным и времени.

Барическое возмущение типа циклона имеет радиус  $R$  и перемещается с постоянной скоростью  $c$

$$p(x,y,t) = \begin{cases} -p_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R}\right), & r \leq R; \\ 0, & r > R. \end{cases} \quad (5)$$

Отклонение атмосферного давления от фонового значения достигает максимума  $p_0$  в центре циклонического образования и убывает с увеличением расстояния  $r$  от него. Вектор касательных напряжений ветра определяется через горизонтальную скорость ветра в приводном слое и плотность воздуха [1]. В свою очередь скорость ветра в приводном слое складывается из скорости ветра в неподвижном циклоне и скорости циклона. Для компонентов вектора напряжения донного трения используется аппроксимация нелинейными функциями составляющих полного потока [6].

В качестве граничных условий принимается равенство нулю проекции полного потока  $\mathbf{U}$  на внешнюю нормаль  $\mathbf{n}$  к береговой линии  $\Gamma$  и отсутствие примеси  $\varphi$  на  $\Gamma$ , поскольку предполагается, что область загрязнения в процессе адвекции и турбулентной диффузии не достигает берега

$$(\mathbf{U} \cdot \mathbf{n})|_{\Gamma} = 0, \quad \varphi(x, y, t)|_{\Gamma} = 0. \quad (6)$$

В начальный момент времени циклон находится за пределами моря, волновые возмущения отсутствуют

$$U(x, y, 0) = 0, \quad V(x, y, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, 0) = 0, \quad (7)$$

поле загрязнения задается в виде

$$\varphi(x, y, 0) = 10^{-(d/D)^2}, \quad (8)$$

где  $d$  – расстояние от центра пятна до точки с координатами  $(x, y)$ , а на расстоянии  $D$  концентрация примеси составляет 0,1 от максимального значения, равного 1.

Результаты численных экспериментов. Для решения поставленной задачи была сформирована расчетная область, соответствующая Черноморскому бассейну (рис. 1), и выполнена аппроксимация береговой черты моря на равномерной сетке с шагами 5 км по пространственным переменным [5]. Во внутренних узлах расчетной области задавались реальные значения глубины, а в граничных точках она принималась равной 2 м. Вычисления выполнялись с временным шагом 2 мин.



Рис. 1 – Расчетная область, траектория движения центра циклона и расположения выбросов загрязнения

Циклон радиуса  $R = 500$  км пересекает расчетную область с запада на восток со скоростью  $c = 5$  м/с. Перепад давления  $p_0$  между его центром и периферией составляет 15 гПа. При этом максимальная скорость ветра достигает 20 м/с. Траектория движения центра атмосферного образования показана на рис. 1 штриховой линией. Гипотетические выбросы загрязнения происхо-

дят в районе Севастополя (№1), Констанцы (№2), Эргли (№3) и Сочи (№4). В каждом случае  $D = 10$  км, так что изолинии концентрации 0,05, принимаемые в качестве границ областей загрязнения, имеют в начальный момент времени радиус 11,4 км. Коэффициент турбулентной диффузии для выбранного  $D$  равен  $100 \text{ м}^2/\text{с}$ .

При прохождении передней части циклона преобладают юго-западные и южные ветры. Вначале их влиянию подвергается западное побережье, вдоль которого водные массы увлекаются на север. Следуя за изгибами береговой линии, волновые течения обходят по часовой стрелке часть акватории до южной оконечности Крымского полуострова. Продвижение атмосферного возмущения приводит к усилению данной циркуляции и распространению ее на все море. Прохождение тыловой части циклона сопровождается изменением направления ветра на северо-западное и северное. При этом глобальная циркуляция распадается на ряд локальных, в значительной части которых движение морской воды по часовой стрелке сохраняется.

На рис. 2, а–г представлены стадии трансформации пятен №1–4. Серым цветом выделено положение в начальный момент времени области загрязнения. Сплошная линия показывает деформацию ее границы к 150 ч – времени наиболее заметных изменений. Черным цветом отмечено пространство, охваченное загрязнением в 500 ч, когда пятно практически исчезает. Различное протекание процессов трансформации областей загрязнения обусловлено зависимостью скоростей адвекции от особенностей рельефа дна в месте выброса. Диффузионные же процессы, в силу предположения об изотропности коэффициента  $K$ , в любой точке моря происходят одинаково. Поэтому, пока волновые скорости не станут достаточно большими, имеет место симметричное по всем направлениям увеличение пятен примеси вне зависимости от места их расположения. И лишь при  $t \sim 50$  ч становятся заметными смещения областей загрязнения, а также изменения их формы.

Выбросы №1 и 2 (рис. 2, а, б) происходят в относительно мелководных зонах с глубинами порядка 200 и 60 м соответственно. В таких зонах скорости адвекции наиболее интенсивны. В соответствии с локальным направлением волновых течений в

первом случае область загрязнения при  $t = 150$  ч смещается на 18 км к юго-востоку от первоначального положения, а во втором – на 25 км к северо-востоку. При этом площади пятен увеличиваются более чем в 1,5 раза, а форма границы существенно отличается от круговой, какой она была бы при отсутствии волновых движений. Максимумы концентрации падают с 1,0 до 0,17 и 0,15 соответственно.

В районах с глубинами порядка 1–2 км, где происходят выбросы №3 и 4 (рис. 2, в, г), адвективный перенос приводит к небольшому смещению областей загрязнения на северо-запад (15 км) и юго-восток (14 км). При  $t = 150$  ч максимумы концентрации уменьшаются до 0,17, хотя форма пятен мало отличается от круговой. Следовательно, для данных районов моря при трансформации выбросов доминирующим остается процесс турбулентной диффузии, как и при отсутствии волн.

Таким образом, в горизонтальной плоскости все пятна смещаются со временем по часовой стрелке. Для ответа на вопрос о вертикальной структуре области загрязнения требуется использование трехмерных уравнений гидродинамики.

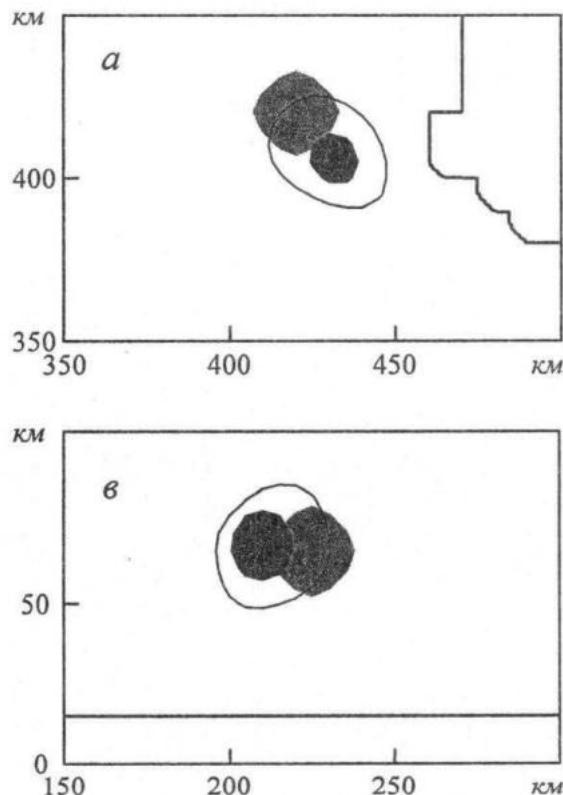


Рис. 2 – Трансформация областей загрязнения №1 (а), №2 (б), №3 (в) и №4 (г) в Черном море

## ЛИТЕРАТУРА

- Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. / Под редакцией Б.А. Нелепо. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984, – 240 с.
- Фомичева Л.А. Сгоны-нагоны, суточные колебания уровня и сейши Черного моря. Труды ГОИН, вып. 125, 1975, – С. 48–59.
- Коротенко К.А., Дитрих Д.Е., Бонуман М. Дж. Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Черном море. Океанология, т.43, №4, 2003, – С. 504–515.
- Ибраев Р.А., Кукса В.И., Скирта А.Ю. Моделирование переноса пассивной примеси вихревыми течениями в восточной части Черного моря. Океанология, т.40, №1, 2000, – С. 18–25.
- Алексеев Д.В., Иванов В.А., Иванча Е.В., Черкесов Л.В. Влияние циклонов, движущихся в северном направлении, на деформацию пятна примеси в Черном море. Доповіді Національної Академії наук України, №10, 2003, – С. 112–117.
- Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1968, – 300 с.

