

ДИФФУЗИЯ ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ В ПОЛЕ БАРОТРОПНЫХ ДЛИННЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ЮЖНЫМИ ЦИКЛОНАМИ

Д. В. Алексеев, Е. В. Иванча,
Л. В. Черкесов

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

В работе изучается распространение загрязняющих веществ под действием длинноволновых движений в северо-западной части Черного моря. Генераторами баротропных длинных волн являются перемещающиеся барические возмущения типа циклонов, параметры которых присущи Черноморскому региону. Исследуются изменения характеристик области примеси в зависимости от траекторий движения циклонического образования.

Целью данной работы является математическое моделирование процесса трансформации пятна примеси в северо-западной части Черного моря при наличии баротропных волн, которые генерируются перемещающимися барическими возмущениями типа южных циклонов. В основе разработанного алгоритма лежит гидродинамическая модель, с помощью которой рассчитываются нестационарные поля волновых скоростей, создаваемые циклонами. Полученные волновые поля используются затем в блоке расчета распространения примеси.

1. Гидродинамическая модель основывается на уравнениях теории мелкой воды в полных потоках [1] для однородной несжимаемой жидкости

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

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

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

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 жид-

кости; ρ – ее плотность; g – ускорение свободного падения; f – параметр Кориолиса; $p(x,y,t)$ – возмущение атмосферного давления; τ_1^w, τ_2^w и τ_1^h, τ_2^h – проекции векторов касательного напряжения ветра и напряжения придонного трения на оси x, y соответственно. Индексы x, y и t означают дифференцирование по пространственным переменным и времени.

Барическое возмущение типа циклона моделируется перемещающейся с постоянной скоростью c областью пониженного атмосферного давления радиуса R

$$p(x,y,t) = \begin{cases} -p_0 \cos^2 \left[\frac{\pi r}{2R} \right], & r \leq R; \\ 0, & r > R. \end{cases} \quad (4)$$

Распределение давления в циклоне предполагается зависящим только от расстояния r до его центра. Вектор касательных напряжений ветра определяется через горизонтальную скорость ветра в приводном слое и плотность воздуха [2]. В свою очередь скорость ветра в приводном слое складывается из скорости ветра в неподвижном циклоне и скорости циклона c [3]. Для компонентов вектора напряжения донного трения используется стандартная аппроксимация нелинейными функциями составляющих полного потока [1].

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

$$p(x,y,0) = 0, \quad (5)$$

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

В качестве граничных условий принимается равенство нулю проекции полного потока \mathbf{U} на внешнюю нормаль \mathbf{n} к береговой линии Γ

$$(\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) = 0. \quad (6)$$

2. В основе блока расчета диффузии примеси лежит двумерное уравнение турбулентной диффузии [4]

$$\phi_t + u\phi_x + v\phi_y = K(\phi_{xx} + \phi_{yy}). \quad (7)$$

Здесь φ – концентрация вещества, $u(x,y,t)=U(x,y,t)/H(x,y)$, $v(x,y,t)=V(x,y,t)/H(x,y)$ – горизонтальные составляющие вектора скорости, K – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии.

В начальный момент времени поле примеси задается в виде

$$\varphi_0(x,y) = 10^{-(d/R_0)^2}, \quad (8)$$

где d – расстояние от центра пятна до точки с координатами (x,y) . В качестве внешней границы, представляющей окружность радиуса R_0 , принимается изолиния 0,1 от максимального значения концентрации. Поскольку начальное положение пятна выбирается таким образом, чтобы в процессе дальнейшей трансформации оно не приближалось достаточно близко к берегу, то на границах бассейна концентрация примеси считается равной нулю [5]

$$\varphi(x,y,t)|_{\Gamma} = 0. \quad (9)$$

3. Для решения поставленных задач в условиях Черноморского бассейна была сформирована соответствующая расчетная область и выполнена аппроксимация береговой черты моря на равномерной сетке с шагами 5 км по пространственным переменным [6]. 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 и траектории движения циклонов

Пятно загрязнения в начальный момент времени находится в северо-западной части

Черного моря вблизи Каркинитского залива (рис. 1), его радиус составляет 25 км. Исследования проводятся для южных циклонов, проходящих по трем параллельным траекториям. В первом случае (траектория 1) над пятном проходит восточная часть барического возмущения, во втором (траектория 2) – центральная и в третьем (траектория 3) – западная. Все циклоны имеют одинаковые параметры характерные для Черноморского региона [7]: радиус $R = 300$ км, скорость перемещения $c = 5$ м/с, перепад давления между центром и периферией $p_0 = 20$ гПа.

В силу изотропности коэффициента турбулентной диффузии при отсутствии волновых движений с течением времени форма пятна сохраняется, а изменяется занимаемая им площадь. При наличии неоднородного волнового поля диффундирующее пятно смещается как целое и меняет свою геометрию.

При движении по каждой из трех траекторий циклон находится над морем 67,5 ч. Большую часть этого времени имеет место симметричное увеличение площади загрязнения по всем направлениям. То есть волновые возмущения в исследуемой области еще не оказывают заметного влияния на процесс диффузии. И лишь при приближении заднего фронта циклона к северной границе Черного моря ($t \sim 50$ ч) форма пятна начинает существенно трансформироваться.

На рис. 2 изображено пятно примеси в различные моменты времени при движении циклона по первой траектории, когда циклон частично (а) или полностью (б-г) покинул пределы Черного моря. Приведенные изолинии соответствуют значениям концентрации 0,1 (внешняя), 0,3 (средняя) и 0,5 (внутренняя). Для сравнения серым цветом показано положение в начальный момент времени области загрязнения, ограниченной изолинией 0,1.

При $t = 67$ ч (рис. 2,а) пятно заметно вытягивается в северо-западном направлении. Его площадь, по сравнению с начальной, увеличивается примерно в 1,5 раза. Отметим, что наибольшее значение концентрации уменьшается от 1,0 при $t = 0$ до 0,54, а точка максимума концентрации смещается от своего первоначального положения также в северо-западном направлении на 14 км.

После ухода циклона с территории моря движение жидкости становится затухающими. Уменьшение волновых скоростей приводит к тому, что с течением времени трансформация области загрязнения начинает определяться преимущественно турбулентной диффузией. При этом площадь, охватываемая изолинией 0,1, продолжает увеличиваться и достигает максимального значения при $t \sim 167$ ч (рис. 2,б). Самые интенсивные диффузионные процессы происходят в местах наибольших градиентов концентрации примеси, в результате чего со временем контуры пятна становятся более гладкими, приобретая форму почти правильного эллипса (рис. 2,в). Наряду с этим площадь пятна уменьшается, убывая к концу расчетов до нуля при $t \sim 800$ ч (рис. 2,г).

При прохождении циклонов по второй и третьей траекториям процесс трансформации пятна примеси имеет качественно сходный характер. Однако в этих случаях пятно несколько меньше смещается на северо-запад. Менее оказывается и область подверженная загрязнению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. – Л.: Гидрометеоздат, 1968. – 300 с.
2. Краус Е. Взаимодействие атмосферы и океана. – Л.: Гидрометеоздат, 1956. – 295 с.
3. Григоркина Р.Г., Фукс В.Р. Воздействие тайфунов на океан. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 244 с.
4. Озмидов Р.В. Диффузия примеси в океане. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 280 с.
5. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
6. Еремеев В.Н., Коновалов А.В., Черкесов Л.В. Моделирование длинных баротропных волн в Черном море, вызываемых движущимися барическими возмущениями // Океанология, 1996, №2, С.191–196.
7. Леонов А.К. Региональная океанография. Часть 1. – Л.: Гидрометеоздат, 1960, – 765 с.

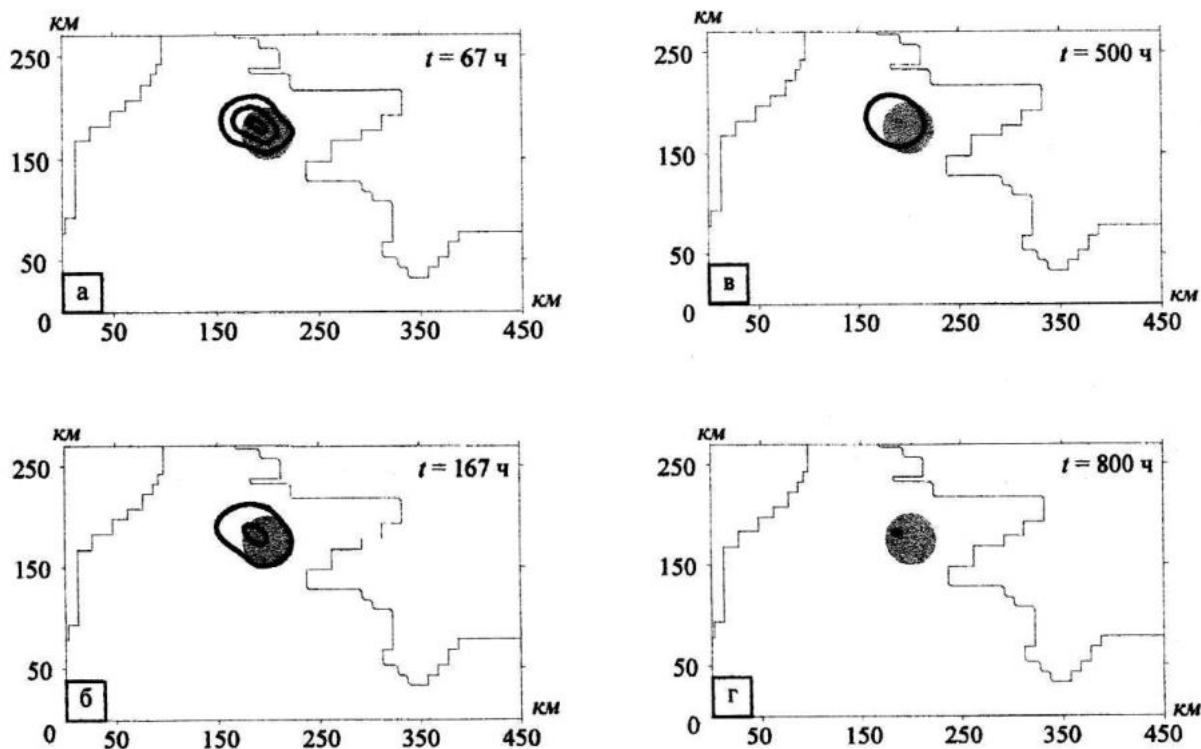


Рис. 2. Трансформация пятна примеси под воздействием длинных волн, генерируемых южным циклоном, проходящим по первой траектории.