

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ АКВАТОРИИ СЕВЕРО-
ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ
ПРИМЕСЬЮ, ПОСТУПАЮЩЕЙ ОТ
ПРИДОННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

*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

Методом математического моделирования исследуется распространение примеси от придонных источников, расположенных в районах Голицынского и Одесского газовых месторождений на шельфе Черного моря. Поля скоростей жидкости формируются в результате совместного воздействия сезонного ветра и ветра, связанного с прохождением циклона. Получены оценки величины и направления переноса примеси на различных горизонтах.

Введение. Сегодня в практике морского природопользования крайне необходима система гидроэкологического мониторинга, которая позволила бы с помощью математических моделей прогнозировать изменения состояния морской среды при проведении в акватории моря работ, связанных, например, с разведкой и добычей минеральных ресурсов.

На сегодняшний день в пределах северо-западного шельфа Черного моря открыто 8 газовых и газоконденсатных месторождений: Архангельское, Безымянное, Голицынское, Крымское, Одесское, Шмидта, Штормовое, Южно-Голицынское. Из них в разработке находятся три: Архангельское, Голицынское и Штормовое. С лета 2006 года начато обустройство Одесского месторождения. Поэтому представляет безусловный интерес моделирование последствий аварийных выбросов примеси со дна в местах расположения буровых платформ при различных синоптических ситуациях.

Вопросу распространения загрязняющих веществ в Черном море посвящен ряд статей [1,2]. В данной работе рассматривается влияние гидродинамических процессов, создаваемых сезонным ветром и совместным воздействием сезонного ветра и ветра, связанного с проходящим над морем циклоном, на транспорт пассивной приме-

си. Примесь поступает от придонных источников, расположенных в районах Голицынского и Одесского месторождений.

Математическая модель. Гидродинамический блок модели базируется на нелинейных уравнениях движения для однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики [3]

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

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; ρ – плотность воды; g – ускорение силы тяжести; η – уровень моря; τ_{ij} – горизонтальные компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса, определяемые 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 порядка 2,5.

Циклоническое образование представим в виде осесимметричной области пониженного давления с радиусом равным R

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

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 [3]

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

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

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 [3]

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

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

На твердых боковых границах выполняются условия прилипания.

В основе блока расчета распространения пассивной примеси лежит уравнение переноса-диффузии

$$\frac{dC}{dt} = A_H \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + K_H \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}, \quad (6)$$

где 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. На свободной поверхности поток примеси отсутствует

$$-K_H \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

На дне в качестве источника задается постоянный поток примеси мощностью $Q = 10^{-7} \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$, вследствие чего в море каждый час поступает примерно 800 кг загрязняющих веществ

$$-K_H \frac{\partial C}{\partial z} = Q. \quad (8)$$

Уравнения (1), (6) с граничными условиями (4), (5), (7), (8) после перехода к σ -координатной системе по формуле $\sigma = (z - \eta)/(H + \eta)$ решаются численно [4]. Для лучшего описания мезомасштабных движений на северо-западном шельфе в модели используется процедура вложенных сеток.

Результаты численных экспериментов.

Вначале рассмотрим гидродинамические процессы, установившиеся под воздействием северо-восточного ветра со скоростью 5 м/с (сезонный ветер). На свободной поверхности моря, следуя за направлением ветра, образуются стационарные течения со скоростями 10–20 см/с, направленные на запад и юго-запад. Вблизи дна скорости стационарных течений не превышают нескольких сантиметров в секунду и их направление отличается от направления ветра. Там, где влияние локальных особенностей морфометрии дна не оказывает определяющего влияния, течения принимают восточное и северо-восточное направления.

Придонные источники примеси (черные треугольники на рисунке 1) начинают функционировать в поле установившихся стационарных течений, вызванных сезонным ветром. Возникающие области загрязнения (серые области на рисунке 1) у Голицынского месторождения (I) с течением временем вытягиваются на северо-восток, у Одесского (II) – на юго-восток.

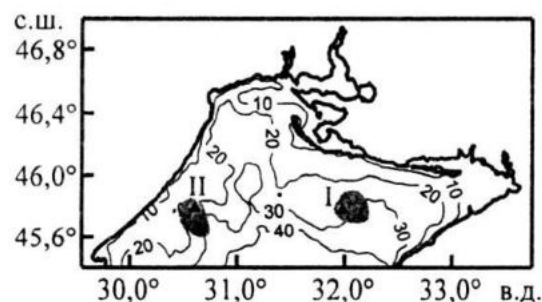


Рисунок 1 – Батиметрия дна (м), локализация донных источников примеси и области загрязнения с концентрацией более $10^{-6} \text{ кг}/\text{м}^3$ на расстоянии 1 м от дна в поле стационарных течений после 200 ч действия источников

Дальнейший транспорт примеси при наличии только сезонного ветра сводится к продолжению переноса загрязняющих веществ в указанных направлениях и к изотропному диффузионному расширению областей загрязнения.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда после сезонного ветра после 200 ч действия источников возмущается циклоническим образованием. Циклон пересекает северо-западный шельф Черного моря с запада на восток. Траектория его центра показана на рисунке 2 пунктирной линией, отсчет времени ведется от момента начала движения циклона. Параметры атмосферного возмущения выбирались характерными для черноморского региона: радиус 500 км, скорость перемещения 5 м/с, перепад давления между центром и периферией 15 гПа.

Создаваемые циклоном на северо-западном шельфе Черного моря нестационарные течения трижды меняют направление: при прохождении его передней, центральной и тыловой частей. Так, в месте расположения донного источника в районе Голицынского месторождения (I) на первом этапе движения циклона течения направлены на юго-восток, затем – на северо-запад и вновь – на юго-восток. Для течений в районе Одесского месторождения (II) характерны другие направления: сначала северо-восточное, далее – юго-западное и снова северо-восточное. Скорости нестационарных течений в определенные моменты времени могут в 2–3 раза превышать скорости стационарных течений, определяя тем самым гидродинамику в исследуемом регионе. Поэтому влияние циклона сводится к последовательному переносу примеси (вытягиванию областей загрязнения) в указанных направлениях, то есть в направлениях, перпендикулярных направлению стационарных течений (рисунок 2).

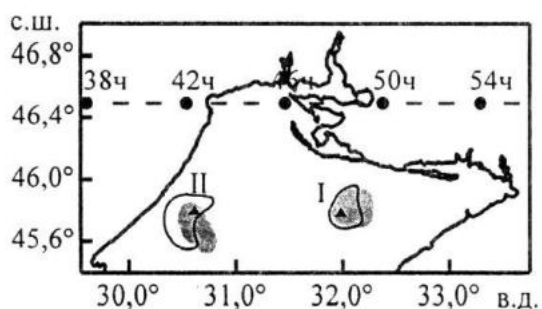


Рисунок 2 – Траектория движения центра циклона, области загрязнения с концентрацией более 10^{-6} кг/м³ на расстоянии 1 м от дна в поле стационарных течений (серые области) и в поле нестационарных течений (области, ограниченные линией) после 100 ч с момента начала движения циклона

Распространение загрязняющей примеси на различных горизонтах имеет свои отличия вследствие меняющейся интенсивности течений и особенностей батиметрии дна. Поскольку увеличение глубин имеет место в южном направлении, то перенос примеси в придонном слое в этом направлении происходит так же, как и на более высоких горизонтах. А вот при переносе вещества на северо-запад или северо-восток, в сторону уменьшения глубин, примесь распространяется вдоль изобат, вследствие чего границы областей загрязнения приобретают сложную конфигурацию. Таким образом, после прохождения циклона области загрязнения на верхних горизонтах оказываются вытянутыми на северо-запад и юго-восток (источник в районе Голицынского месторождения) или на северо-восток и юго-запад (район Одесского месторождения), а на нижних горизонтах их формы повторяют контуры изобат. Кроме того, по мере удаления от дна увеличиваются площади областей, охваченных загрязнением, вследствие более интенсивного адвективного переноса на верхних горизонтах.

В дальнейшем представляет интерес рассмотрение совместного влияния динамических процессов синоптического и климатического масштабов на распространение примеси с учетом эффектов, связанных с неоднородностью морской воды.

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. 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.
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.