



УДК 561.46:551.585.1

© 2007

Д. В. Алексеев, Е. В. Иванча, В. В. Фомин, член-корреспондент НАН
України **Л. В. Черкесов**

Моделирование распространения примеси от придонных источников в северо-западной части Черного моря

The admixture transport from sources located on the bottom of the Black-Sea north-western shelf in the places of exploited gas fields is studied by using a σ -coordinate numerical model. The fields of currents are formed due to the effect of seasonal winds and the joint action of a seasonal wind and the wind related to the cyclonic formation passage. Transient currents caused by a moving atmospheric disturbance influence determinatively the admixture spreading. The estimations of the magnitude and direction of displacements of the pollution areas on different horizons in the presence and in the absence of a cyclone are given.

Практика морского природопользования требует привлечения современных математических моделей, с помощью которых можно прогнозировать изменение состояния морской среды при проведении в акватории моря работ, связанных с разведкой и добычей минеральных ресурсов. В настоящее время в пределах северо-западного шельфа Черного моря открыто восемь газовых и газоконденсатных месторождений: Архангельское, Безымянное, Голицынское, Крымское, Одесское, Шмидта, Штормовое, Южно-Голицынское [<http://blackseagas.com>]. Из них в разработке находятся три: Архангельское, Голицынское и Штормовое. С лета 2006 г. начато обустройство Одесского месторождения. Установка буровых платформ, а также непосредственно сам процесс бурения приносят в водную среду мелкодисперсные донные осадки, измельченную породу, слагающую морское дно, и сопутствующие углеводородам вещества. Поэтому представляет интерес моделирование последствий возможных выбросов примеси, не содержащей углеводородов, со дна в районах разрабатываемых месторождений при различных синоптических ситуациях.

Наиболее часто в задачах о распространении примеси используются климатические поля ветра [1, 2], в которых сглажены различные атмосферные аномалии. В данном сообщении дается оценка влияния возмущений, вносимых циклонической деятельностью в поле сезонного ветра, на характеристики динамических процессов, генерируемых на северо-западном шельфе Черного моря. Под воздействием этих динамических процессов рассматривается

транспорт примеси от придонных источников, располагающихся в районах Голицынского и Одесского месторождений и имеющих постоянную мощность.

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

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$p = p_a + g\rho(\eta - z), \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Здесь $\{u, v, w\}$ — компоненты скорости жидкости 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; $\rho = 1015 \text{ кг/м}^3$ — плотность воды; A_M — коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, зависящий от горизонтального разрешения модели и вычисляемый по формуле Смагоринского [3]; K_M — коэффициент вертикальной турбулентной вязкости, который, в соответствии с теорией Меллора-Ямады [3], является функцией кинетической энергии турбулентности и макромасштаба турбулентности; p_a — атмосферное давление; g — ускорение силы тяжести; $\eta(x, y, t)$ — отклонение свободной поверхности от невозмущенного состояния. Атмосферное давление складывается из фонового значения \tilde{p}_a и возмущения, вносимого циклоническим образованием радиуса R :

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2 \left(\frac{\pi r}{2R} \right) + \tilde{p}_a, & r \leq R; \\ \tilde{p}_a, & r > R, \end{cases} \quad (5)$$

где p_0 — максимальное вносимое возмущение; 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]:

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad \rho K_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = \rho_a C_A (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} \{W_x, W_y\}. \quad (6)$$

Здесь $\rho_a = 1,2 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха; $\{W_x, W_y\}$ — компоненты вектора скорости приводного ветра \mathbf{W} ; $C_A = k^2 \{14,56 - \ln[(W_x^2 + W_y^2)/W_0^2]\}^{-2}$ — коэффициент поверхностного трения, рассчитываемый на основе соотношения, предложенного в статье [4], где $W_0 = 1 \text{ м/с}$, $k = 0,4$ — постоянная Кармана. Приводный ветер в общем случае представляет собой суперпозицию сезонной составляющей \mathbf{W}_s и составляющей, обусловленной прохождением циклона [5]:

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mathbf{W}_s + 0,7 W_g \hat{T}(90^\circ + \gamma) \frac{\mathbf{r}}{r} + \mathbf{c}, & r \leq R; \\ \mathbf{W}_s, & r > R, \end{cases} \quad (7)$$

где $W_g = -fr/2 + [(fr/2)^2 + (p_a)_r r / \rho_a]^{1/2}$ — геоциклострофическая скорость; $(p_a)_r$ — радиальный градиент атмосферного давления (5); $\hat{T}(\alpha)$ — матрица поворота на угол α ; $\gamma = 20^\circ$ — угол втока; вектор \mathbf{r} направлен от центра циклона к точке, в которой вычисляется \mathbf{W} ; \mathbf{c} — скорость поступательного движения циклона.

На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная компонента скорости, касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [3]:

$$w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} = 0, \quad \rho K_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = \rho C_D (u^2 + v^2)^{1/2} \{u, v\}. \quad (8)$$

Для расчета коэффициента донного трения C_D на расстоянии z_b от дна используется аппроксимация $C_D = k^2 [\ln(z_b/z_0)]^{-2}$, где $z_0 = 0,001$ м — масштаб шероховатости донной поверхности.

На твердых боковых границах выполняются условия прилипания:

$$\{u, v, w\} = 0. \quad (9)$$

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

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (10)$$

где C — концентрация примеси; $A_H = 10$ м²/с и $K_H = 10^{-5}$ м²/с — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии.

На свободной поверхности поток примеси отсутствует:

$$-K_H \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (11)$$

На дне поток примеси отличен от нуля только в местах расположения источников:

$$-K_H \frac{\partial C}{\partial z} = \begin{cases} Q, & \{x, y\} = \{x_j, y_j\}; \\ 0, & \{x, y\} \neq \{x_j, y_j\}, \end{cases} \quad (12)$$

где Q — мощность источника; $\{x_j, y_j\}$ — координаты j -го источника.

На боковых границах выполняется условие равенства нулю потока примеси в направлении внешней нормали \mathbf{n} :

$$A_H \frac{\partial C}{\partial n} = 0. \quad (13)$$

Уравнения (1)–(4), (10) с граничными условиями (6), (8), (9), (11)–(13) после перехода к σ -координатной системе по формуле $\sigma = (z - \eta)/(H + \eta)$ решаются численно [6]. Для лучшего описания мезомасштабных движений на северо-западном шельфе в модели используется процедура вложенных сеток, которая позволила проводить расчеты с шагами $\Delta x = 1,6$ км, $\Delta y = 1,4$ км по горизонтали. Количество уровней по вертикали равно 25. Для лучшего разрешения вблизи дна и свободной поверхности эти уровни сгущаются.

Анализ результатов численных экспериментов. Согласно результатам исследований атмосферных процессов над северо-западным шельфом Черного моря [7], среднее

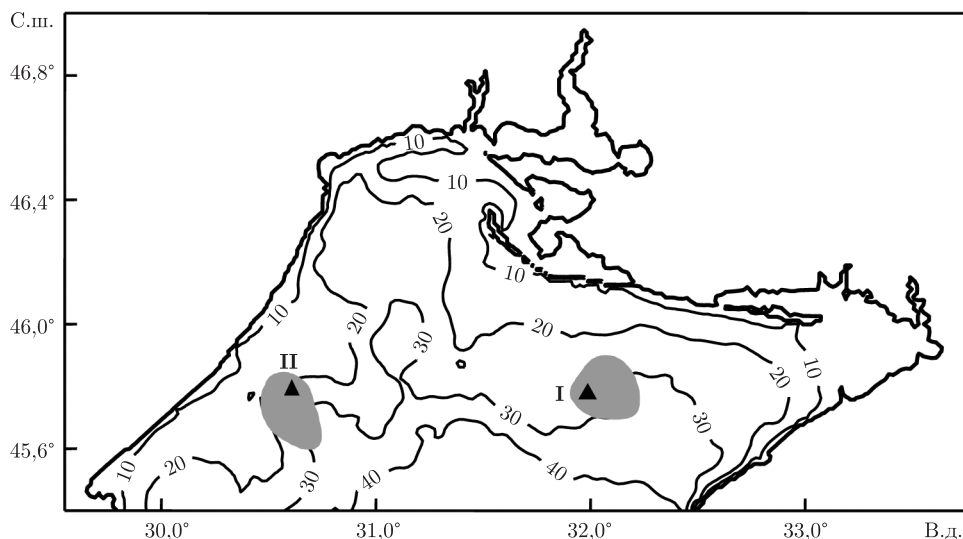


Рис. 1. Батиметрия дна (m), локализация донных источников примеси в районах Голицынского (I) и Одесского (II) месторождений, а также области загрязнения концентрацией свыше 10^{-6} $кг/м^3$ на расстоянии 1 м от дна в поле стационарных течений после 200 ч действия источников

направление ветра здесь близко к северо-восточному. Поэтому в численных экспериментах в качестве сезонной составляющей W_s принимался северо-восточный ветер со скоростью 5 м/с. Его продолжительное воздействие на поверхность моря приводит к установлению в поверхностном слое системы западных и юго-западных стационарных течений со скоростями 10–20 см/с. Вблизи дна структура течений существенно иная. Направления течений заметно отклоняются от направления ветра, становясь противоположными ему в центральной части акватории, а скорости не превышают нескольких сантиметров в секунду.

Пусть в поле установившихся течений начинают действовать два придонных источника, расположенных в районах Голицынского (I, рис. 1) и Одесского (II, рис. 1) месторождений. Мощность Q каждого из них постоянна и равна 10^{-7} $кг/(м^2с)$. При такой мощности за час в водную среду поступает примерно 800 кг примеси. Глубина моря в местах расположения источников I и II составляет 23 м, а скорости стационарных течений на расстоянии 1 м от дна направлены соответственно на северо-восток и юго-восток, где и наблюдается перенос примеси. По мере распространения загрязняющих веществ в более глубоководные районы акватории, помимо подъема, становится возможным их опускание на горизонты, лежащие ниже глубины, на которой происходят выбросы. На рис. 1 серым цветом обозначены области, концентрация примеси которых более 10^{-6} $кг/м^3$ на расстоянии 1 м от дна после 200 ч действия источников. В соответствии с локальными направлениями стационарных течений эти области вытянуты на северо-восток у Голицынского месторождения и на юго-восток у Одесского. По вертикали примесь поднимается выше 15-метрового горизонта и опускается до 30-метрового. Дальнейший транспорт загрязняющих веществ от источников при наличии только сезонного ветра сводится к продолжению их переноса в указанных направлениях и к диффузионному рассеиванию.

Перейдем теперь к рассмотрению ситуации, складывающейся при возмущении поля сезонного ветра проходящим циклоническим образованием. Циклон пересекает северо-западный шельф Черного моря с запада на восток. Траектория его центра показана на рис. 2 штриховой линией, отсчет времени ведется от момента начала движения циклона над аква-

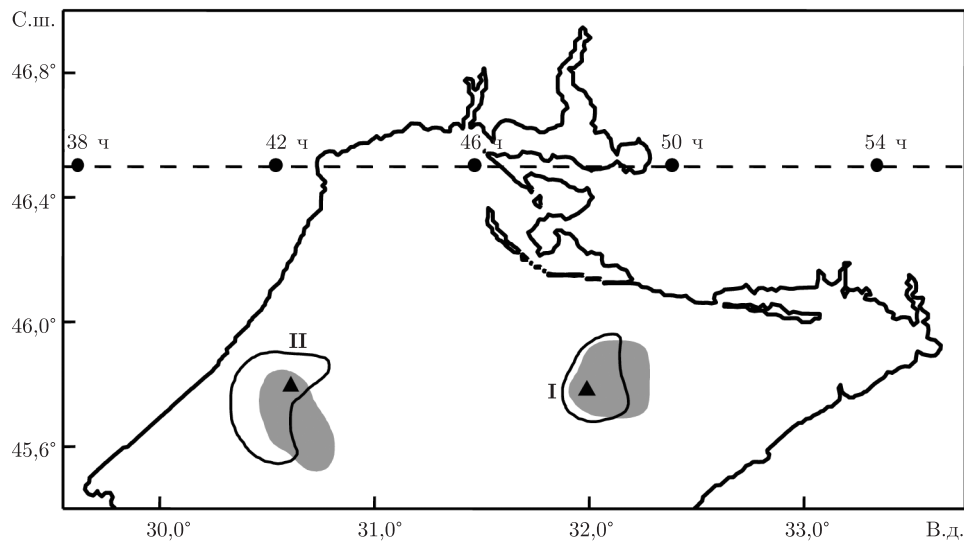


Рис. 2. Траектория движения центра циклона, области загрязнения концентрацией свыше 10^{-6} $\text{кг}/\text{м}^3$ на расстоянии 1 м от дна в поле стационарных течений (серые области) и в поле нестационарных течений (области, ограниченные линией) после 100 ч с момента начала движения циклона

торией. Параметры атмосферного возмущения выбирались характерными для черноморского региона: радиус 500 км, скорость перемещения 5 м/с, перепад давления между центром и периферией 15 гПа. К моменту вхождения циклона на акваторию моря источники действуют в поле стационарных течений, созданных сезонным ветром, 200 ч.

Прохождение атмосферного возмущения над северо-западным шельфом Черного моря нарушает установившийся характер движений. Поскольку максимальная скорость ветра в циклоне достигает 20 м/с, то генерируемые им нестационарные течения в отдельные моменты времени по интенсивности могут в 2–3 раза превышать стационарные течения, определяя тем самым гидродинамику в исследуемом регионе. Вследствие этого, поле суммарных скоростей жидкости меняется в соответствии с изменениями ветровой ситуации, обусловленными прохождением передней, центральной и тыловой частей атмосферного возмущения. Так, в районе Голицынского месторождения течения сначала направлены на юго-восток, затем — на северо-запад и вновь — на юго-восток. Для течений в районе Одесского месторождения характерны другие направления: сначала северо-восточное, далее — юго-западное и снова северо-восточное. На расстоянии 1 м от дна, следуя за особенностями батиметрии, примесь переносится в указанных направлениях, образуя вытянутые области с высоким ее содержанием. При этом в районе Одесского месторождения площадь такой области больше, чем в районе Голицынского месторождения (см. рис. 2). Отметим, что направления переноса примеси в рассматриваемых районах перпендикулярны направлениям стационарных течений.

Трансформация областей загрязнения на фиксированных горизонтах существенно отличается от того, что имеет место на расстоянии 1 м от дна. Действительно, ниже глубины расположения источников примесь может проникнуть только на некотором удалении от них в соответствии с особенностями батиметрии. В районе Одесского месторождения глубины увеличиваются к юго-востоку, т. е. в направлении стационарных течений, тогда как около Голицынского месторождения увеличение глубин прослеживается преимущественно

к югу, а в направлении стационарных течений (северо-восток) существует только локальное опускание дна. Уклон донной поверхности ограничивает распространение примеси на фиксированных горизонтах. Нестационарные течения, перпендикулярные в рассматриваемых районах стационарным, наиболее интенсивны при прохождении центральной и тыловой частей циклона. Их влияние на этих временных этапах сводится к сокращению площадей областей с высоким содержанием загрязнения на глубинах, больших, чем глубина расположения источников, вследствие переноса примеси вдоль дна на более высокие горизонты. В результате данные области представляют собой узкие полосы, вытянутые вдоль изобат перпендикулярно локальным направлениям нестационарных течений.

На горизонтах, лежащих выше источников на 2–3 м, процессы переноса и диффузии ограничены особенностями батиметрии дна в несколько меньшей степени. На этих глубинах в районе Голицынского месторождения примесь концентрацией свыше 10^{-6} кг/м³ приближается к изобатам, ограничивающим соответствующие горизонты, только после ухода циклона. Поэтому трансформация области загрязнения здесь качественно происходит так же, как и на расстоянии 1 м от дна, хотя и с несколько меньшей интенсивностью. В районе Одесского месторождения примесь достигает указанных изобат еще на этапе формирования начального поля концентрации, когда существуют только стационарные течения. Поэтому здесь сохраняются основные черты трансформации области загрязнения, характерные для глубин, больших, чем глубины расположения источников.

Чем выше поднимается примесь, тем позднее по времени она достигает границ соответствующих горизонтов, и тем в большей степени форма областей загрязнения отражает локальные особенности процессов переноса и диффузии. Сами же эти области оказываются заметно смещенными по горизонтали относительно мест расположения источников. Направление и величина смещения тоже обусловлены локальными характеристиками суммарных течений. Так, на горизонте 15 м большая часть загрязненной области находится северо-восточнее места расположения источника **I**, а относительно источника **II** загрязнение концентрацией свыше 10^{-6} кг/м³ сосредоточено частично северо-восточнее и частично юго-западнее (рис. 3).

На глубине 10 м примесь, поступающая от источника **I**, обнаруживается практически над местом его расположения только после ухода циклонического образования с акватории северо-западного шельфа Черного моря. Область загрязнения, образовавшаяся в результате действия источника **II**, прослеживается на горизонте 10 м уже при прохождении над акваторией моря центральной части атмосферного возмущения. При этом она смещена на юго-запад от места расположения источника и вытянута с северо-запада на юго-восток. Продвижение над акваторией тыловой части циклона приводит к тому, что данная область загрязнения, увеличиваясь, еще больше вытягивается в тех же направлениях. Отметим, что при наличии только сезонного ветра, т. е. в поле стационарных течений, примесь концентрацией 10^{-6} кг/м³ не поднимается на глубину 10 м.

Таким образом, нестационарные течения, вызванные движущимся циклоном, существенно превосходят по интенсивности стационарные течения, вызванные действием сезонного ветра, а потому определяют гидродинамику исследуемого района и перенос примеси от придонных источников; области загрязнения на фиксированных горизонтах оказываются смещенными относительно мест расположения источников, величины и направления смещений зависят от локальных особенностей поля течений. Кроме того, по мере удаления от дна увеличиваются площади областей, охваченных загрязнением, вследствие более интенсивного адвективного переноса на верхних горизонтах; под действием атмосферного возмущения

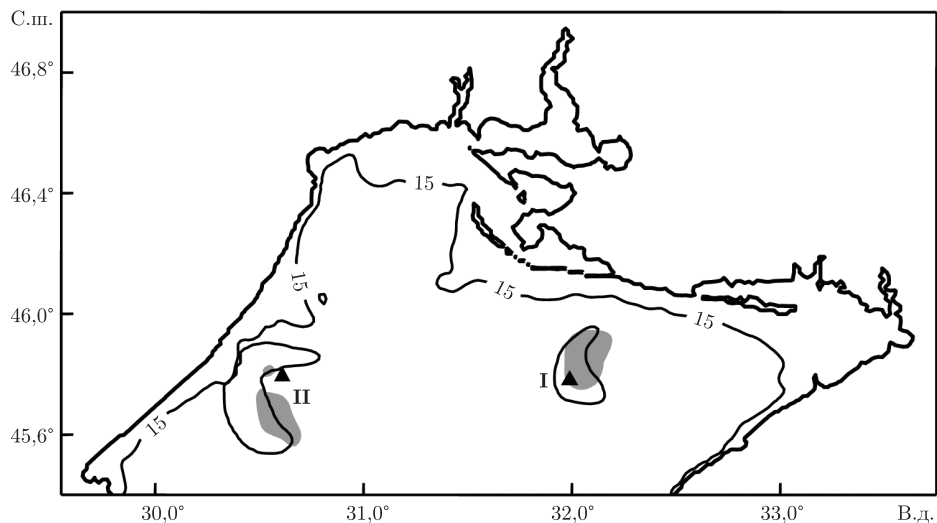


Рис. 3. Области загрязнения концентрацией свыше 10^{-6} кг/м³ на горизонте 15 м в поле стационарных течений (серые области) и в поле нестационарных течений (области, ограниченные линией) после 100 ч с момента начала движения циклона

примесь поднимается на более высокие горизонты, чем в случае наличия только сезонного ветра.

1. *Коротенко К. А., Дмитрих Д. Е., Боуман М. Дж.* Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Черном море // *Океанология*. – 2003. – **43**, № 4. – С. 504–515.
2. *Ибраев Р. А., Кукса В. И., Скурта А. Ю.* Моделирование переноса пассивной примеси вихревыми течениями в восточной части Черного моря // Там же. – 2000. – **40**, № 1. – С. 18–25.
3. *Blumberg A. F., Mellor G. L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model, in *Three-Dimensional Coast Ocean Models* // *Coastal and Estuarine Sci.* – 1987. – **4**. – P. 1–16.
4. *Hsu S. A.* A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: A parametric model // *J. Phys. Oceanogr.* – 1986. – **16**. – P. 144–150.
5. *Григоркина Р. Г., Фукс В. Р.* Воздействие тайфунов на океан. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1986. – 244 с.
6. *Алексеев Д. В., Иванча Е. В., Иванов В. А. и др.* Моделирование эволюции волновых полей в районе северо-западного шельфа Черного моря при прохождении циклона // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2005. – № 1. – С. 42–54.
7. *Проект “Моря СССР”.* Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические исследования. – Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1991. – 200 с.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь
Морское отделение УкрНИГМИ, Севастополь*

Поступило в редакцию 22.02.2007