

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

Исследование трансформации локальных областей загрязнения в северо-западном районе Черного моря при движении циклона

Методом математического моделирования изучается эволюция локальных выбросов загрязнения на северо-западном шельфе Черного моря при прохождении циклона. Используются нелинейные уравнения движения однородной вязкой жидкости в приближении гидростатики и уравнение турбулентной диффузии. Циклоническое образование представляет собой движущуюся осесимметричную область пониженного давления. Выбросы загрязняющих веществ возникают в результате действия мгновенных источников на поверхности моря. Выполнен анализ зависимостей траекторий перемещения областей загрязнения, времени их рассеивания и глубины проникновения примеси от рельефа дна и интенсивности диффузионных процессов.

Введение

Анализ эволюции выбросов загрязняющих веществ мгновенными и постоянно действующими источниками в бассейне Черного моря представляет не только научный, но и прикладной интерес в связи с интенсификацией хозяйственной деятельности в указанном регионе. Изучению этого экологически важного явления посвящены работы [1, 2]. В них основным фактором движения водных масс считается постоянный или усредненный на определенных временных интервалах ветер. Однако для данного района характерна значительная циклоническая активность [3]. Результаты численных экспериментов [4, 5] свидетельствуют о том, что при прохождении над Черным морем циклонических образований в северо-западной области шельфа возникают интенсивные нестационарные баротропные течения, влияние которых на процессы переноса и диффузии загрязняющих веществ недостаточно изучено.

Исследованию воздействия указанных течений на трансформацию локальных областей загрязнения в северо-западном районе Черного моря и посвящена данная работа. В ней также выполнен анализ зависимостей пространственного распределения примеси от рельефа дна и интенсивности диффузионных процессов.

Математическая постановка задачи и метод решения

Будем исходить из нелинейных уравнений движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики и уравнения турбулентной диффузии пассивной примеси [6]:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$



$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0, \quad (3)$$

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

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (5)$$

Здесь 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; ρ — плотность воды; g — ускорение силы тяжести; τ_{ij} — горизонтальные компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса, определяемые через компоненты скорости по формулам

$$\tau_{11} = 2A_M \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{12} = \tau_{21} = A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad \tau_{22} = 2A_M \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (6)$$

A_M и K_M — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости; C — концентрация примеси; A_H и K_H — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии.

Интегрируя уравнение (3) по вертикали от свободной поверхности $\eta(x, y, t)$ до z , находим $p = p_a + g\rho(\eta - z)$. Считая радиус циклонического образования равным R , представим атмосферное давление p_a в виде

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R}\right) + \tilde{p}_a, & r \leq R, \\ \tilde{p}_a, & r > R, \end{cases} \quad (7)$$

где \tilde{p}_a — фоновое значение давления; p_0 — максимальное отклонение от \tilde{p}_a в атмосферном возмущении; r — расстояние до центра движущегося циклона.

На свободной поверхности ($z = \eta(x, y, t)$) должны быть выполнены кинематическое и динамические условия, а также условие отсутствия потока примеси:

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad \rho K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{0x}, \tau_{0y}), \quad K_H \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

Составляющие тангенциального напряжения ветра (τ_{0x}, τ_{0y}) выражаются через плотность воздуха ρ_a и компоненты скорости ветра $\mathbf{W} = (W_x, W_y)$ [3]:

$$(\tau_{0x}, \tau_{0y}) = \rho_a C_A (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} (W_x, W_y). \quad (9)$$

Для нахождения коэффициента поверхностного трения используется соотношение, предложенное в [7]: $C_A = k^2 \left[14,56 - 2 \ln(W_x^2 + W_y^2)^{1/2} \right]^{-2}$, где $k = 0,4$ — постоянная Кармана. Следуя [8], в неподвижном циклоне ветер рассчитываем, умножая модуль вектора геоциклострофической скорости W_g на эмпирический коэффициент $\mu = 0,7$ и учитывая, что направление ветра отклоняется от касательных к изобарам на угол $\gamma = 20^\circ$ (угол втока) против часовой стрелки. Считая, что барическое образование движется поступательно со скоростью \mathbf{c} , получаем выражение для скорости приводного ветра:

$$\mathbf{W} = \mu W_g \hat{T}(90^\circ + \gamma) \frac{\mathbf{r}}{r} + \mathbf{c}, \quad W_g = -\frac{fr}{2} + \left[\left(\frac{fr}{2} \right)^2 + \frac{(p_a)_r r}{\rho_a} \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Здесь $(p_a)_r$ — радиальный градиент атмосферного давления (7); вектор \mathbf{r} направлен от центра циклона к точке, в которой вычисляется \mathbf{W} ; $\hat{T}(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$ — матрица поворота на угол α .

На дне ($z = -H(x, y)$) равны нулю нормальная составляющая скорости и поток примеси:

$$w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} = 0, \quad K_H \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad (11)$$

а касательные напряжения должны удовлетворять [3] равенствам

$$\rho K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}), \quad (\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho C_D (u^2 + v^2)^{1/2} (u, v). \quad (12)$$

В (12) C_D — коэффициент донного трения, который находится [6] по формуле $C_D = k^2 \ln^{-2}(z_b / z_0)$, где z_b — ближайшая к дну точка расчетной сетки; $z_0 = 0,001$ м — масштаб шероховатости донной поверхности.

На боковых границах Γ выполняются условия прилипания для скоростей и условие отсутствия потока примеси в направлении внешней нормали \mathbf{n} :

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

Для описания вертикальной турбулентной вязкости используется теория Меллора — Ямады [6]. Коэффициент A_M является функцией горизонтальных градиентов скорости и вычисляется по формуле Смагоринского [9].

В начальный момент времени циклон находится за пределами акватории, движения жидкости отсутствуют:

$$(u, v, \eta) = 0. \quad (14)$$

Область загрязнения в момент выброса расположена на свободной поверхности и имеет вид пятна радиусом D :

$$C = \begin{cases} 1, & d \leq D, \\ 0, & d > D, \end{cases} \quad (15)$$

где d — расстояние от центра пятна до точки, в которой вычисляется концентрация.

В исходных уравнениях (1), (2), (4), (5) и граничных условиях (8), (11) – (13) осуществляется переход [6] от координаты z к σ -координате: $\sigma = (z - \eta)/(H + \eta)$. Далее поле горизонтальных скоростей представляется в виде суммы двух составляющих: средней по глубине компоненты и отклонения от нее. После этого уравнения движения расщепляются на две системы. Из первой определяются осредненные горизонтальные скорости и уровень моря. Из второй – отклонения горизонтальных скоростей от их средних значений и вертикальная скорость.

Численный алгоритм решения указанных систем по времени базируется на применении двухслойных схем. В начале на интервале времени $\Delta t = 4$ мин решается система для осредненных скоростей и уровня с дробным шагом $\Delta t_1 = \Delta t/n$, где $n = 20$ выбрано в соответствии с критерием устойчивости Куранта для поверхностных волн. Далее на том же интервале времени, но с шагом Δt решаются уравнения для отклонений горизонтальных скоростей от их средних значений, а затем определяется вертикальная скорость из уравнения неразрывности. Операторы переноса аппроксимируются с помощью TVD-схемы [10].

С целью повышения пространственного разрешения в модели реализована процедура вложенных сеток. На первом этапе определяются гидродинамические поля на грубой сетке (разрешение $\Delta x = 7,8$ км, $\Delta y = 7,0$ км) для всего бассейна Черного моря. На втором этапе проводится расчет на более мелкой сетке (разрешение $\Delta x = 1,6$ км, $\Delta y = 1,4$ км) только для северо-западной части моря, имеющей одну жидкую границу, параллельную оси x и проходящую по широте мыса Тарханкут. Начальные условия, условия на свободной поверхности, на дне и твердых боковых границах те же, что и на первом этапе. А в качестве условий на жидкой границе используются интерполированные на мелкую сетку данные расчетов на крупной сетке, полученные для каждого расчетного момента времени и соответствующие широте жидкой границы. При этом количество уровней по вертикали в обоих случаях равнялось 25. Для лучшего разрешения по вертикали вблизи дна и свободной поверхности эти уровни сгущались.

Уравнение турбулентной диффузии примеси решалось методом расщепления с шагом Δt . При расщеплении отдельно выделялась задача трехмерного переноса и горизонтальной диффузии и одномерная задача диффузии по вертикальной координате. Решение последней задачи выполнялось методом прогонки с учетом граничных условий по вертикали.

Анализ результатов расчетов

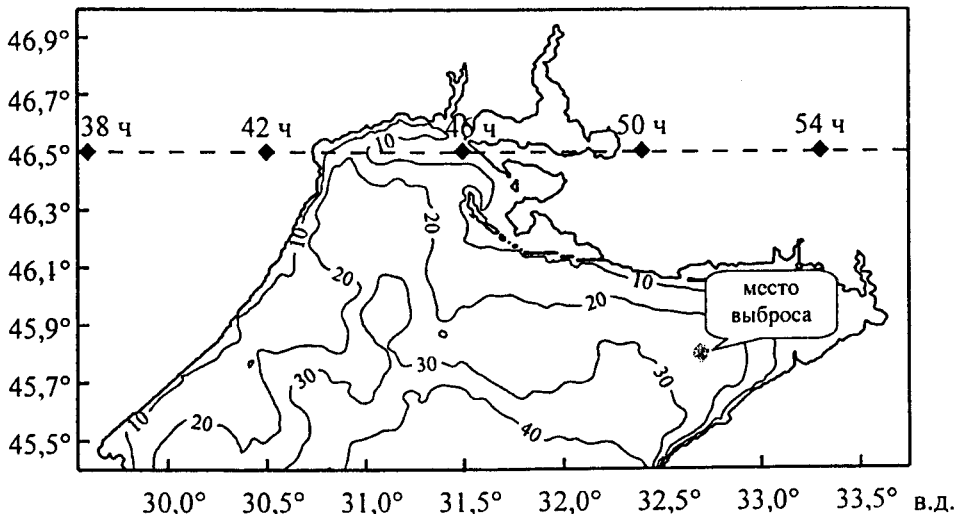
Исследуем трансформацию областей загрязнения с использованием предложенной выше модели, учитывающей процессы адвекции и турбулентной диффузии. При этом скорость и направление адвективного переноса примеси определяются локальными течениями в месте выброса. На их формирование оказывают влияние характеристики циклона, морфометрия дна и профиль береговой линии. Интенсивность диффузионных процессов зависит в первую очередь от масштабов турбулентности.

Приведем сначала результаты анализа особенностей трансформации области загрязнения для ряда коэффициентов диффузии A_H и K_H , соответствующих диффузионным процессам различной интенсивности. Простейшим способом их задания является использование осредненных по горизонтали и по глубине величин. Расчеты проведены для одного значения коэффициента горизонтальной диффузии ($10 \text{ м}^2/\text{с}$) и трех значений коэффициента вертикальной диффузии (10^{-6} , 10^{-5} , $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$). Так же рассматривался тип параметризации, позволяющий учесть наличие приповерхностного перемешанного слоя [11]. При этом K_H уменьшался в верхнем 50-метровом слое от $2,5 \cdot 10^{-4}$ ($z = 0$) до $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ($z = 50 \text{ м}$), после чего оставался неизменным до дна, а A_H брался таким же, как и в предыдущих случаях.

В численных экспериментах циклон радиусом $R = 500 \text{ км}$ пересекает расчетную область с запада на восток со скоростью 5 м/с . Траектория движения центра атмосферного возмущения показана на рис. 1 штриховой линией, на которой отмечены его положения в некоторые моменты времени. Максимальное отклонение атмосферного давления от фонового значения в циклоне составляет 15 гПа , а скорость ветра достигает 20 м/с . Выброс загрязнения в виде пятна радиусом 3 км с концентрацией, равной 1 (рис. 1), происходит на свободной поверхности в узкой части Каркинитского залива, когда скорости течений в месте расположения источника достигают 1 см/с . Как показали численные эксперименты, при меньших значениях скоростей адвективный перенос примеси оказывается несущественным. Загрязнение считается рассеявшимся, когда максимум концентрации становится меньше $0,05$.

При $K_H = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ область загрязнения увлекается течениями, возникающими под воздействием юго-западных ветров передней части циклона, в северном направлении. Максимальное удаление центра пятна от своего первоначального положения составляет 16 км . Изменение направления ветра на северо-западное, связанное с прохождением тыловой части атмосферного возмущения, приводит к перестройке поля скоростей. Область загрязнения теперь смещается на юг примерно к своему начальному положению. При этом площадь, охватываемая изолинией концентрации в $0,05$, постепенно уменьшается до нуля. Численные эксперименты, проведенные с тремя другими коэффициентами вертикальной турбулентной диффузии, показали, что в этих случаях траектории движения пятна по форме различаются незначительно. Однако в силу более интенсивного рассеивания примеси исчезновение изолинии $0,05$ происходит более чем в 3 раза быстрее и область загрязнения проходит меньшее расстояние вдоль траектории.

с.ш.

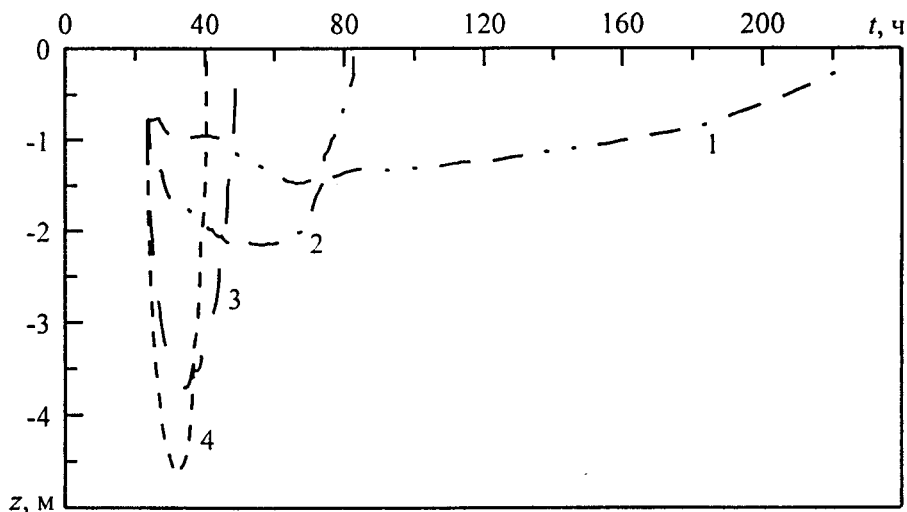


Р и с. 1. Северо-западный шельф Черного моря с изобатами (м) и траектория движения циклона (штриховая линия)

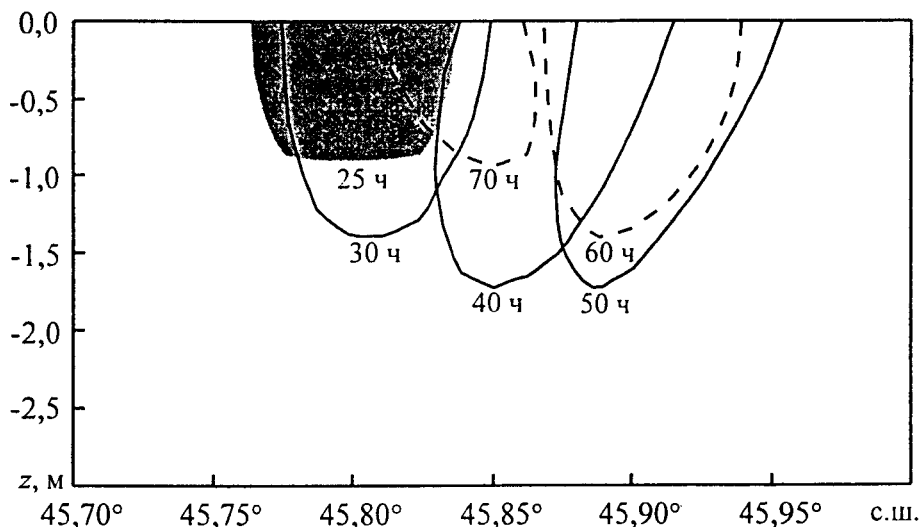
Энергия от атмосферного возмущения поступает в толщу водной среды постепенно, и с глубиной имеет место запаздывание реакции поля скоростей на изменения ветровой ситуации. Это может существенно влиять на вертикальную структуру области загрязнения, которая при отсутствии движений жидкости была бы осесимметричной.

При коэффициенте вертикальной диффузии $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ наличие примеси с концентрацией не менее 0,05 прослеживается до горизонта 1,5 м (кривая 1 на рис. 2, а). На такой глубине скорости жидкости незначительно отличаются от приповерхностных скоростей. Поэтому нарушение осевой симметрии области загрязнения проявляется только после ее существенного смещения от места выброса. С течением времени в приповерхностном слое пятно вытягивается вдоль траектории своего движения. Пока преобладают юго-западные ветры, границы пятна с ростом глубины отклоняются к югу. Действие северо-западных ветров сопровождается изменением указанного отклонения на северное. Полное рассеивание загрязнения в данном случае происходит через 198 ч после момента выброса, когда циклон уже покинул акваторию моря и скорости существенно ослабли.

Увеличение K_H до значения $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ приводит к более быстрому и более глубокому (до 2,2 м) проникновению примеси (кривая 2 на рис. 2, а). Различия полей скорости между верхним и нижним горизонтами, подверженными загрязнению, становятся существеннее. Следствием этого является более сильное отставание заглубленной границы пятна от поверхностной вдоль траектории движения (рис. 2, б). Данное отставание имеет место вплоть до уменьшения концентрации ниже установленного предела в 0,05, которое происходит за 59 ч.



a



б

Р и с. 2. Зависимость от времени глубины проникновения примеси с концентрацией 0,05 при различных коэффициентах вертикальной турбулентной диффузии (а) и положение изолинии 0,05 на вертикальном сечении, проходящем в меридиональном направлении через точку с максимальной концентрацией, при $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$, $K_H = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ для разных моментов времени (б)

При коэффициенте вертикальной диффузии, равном $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, загрязнение рассеивается по времени быстрее (за 25 ч), чем происходит изменение ветровой ситуации, обусловленное уходом передней части циклона и прихо-

дом тыловой. Пятно успевает только сместиться к северу от начального положения. Его растяжение вдоль траектории движения ослабляется быстрым рассеиванием. Проникновение примеси с концентрацией 0,05 прослеживается до глубины 3,7 м (кривая 3 на рис. 2, а). Использование коэффициента вертикальной диффузии, позволяющего разрешить верхний перемешанный слой, дает по сравнению с последним из рассмотренных случаев еще более глубокое проникновение загрязнения (4,6 м) и более быстрое (17 ч) его рассеивание (кривая 4 на рис. 2, а).

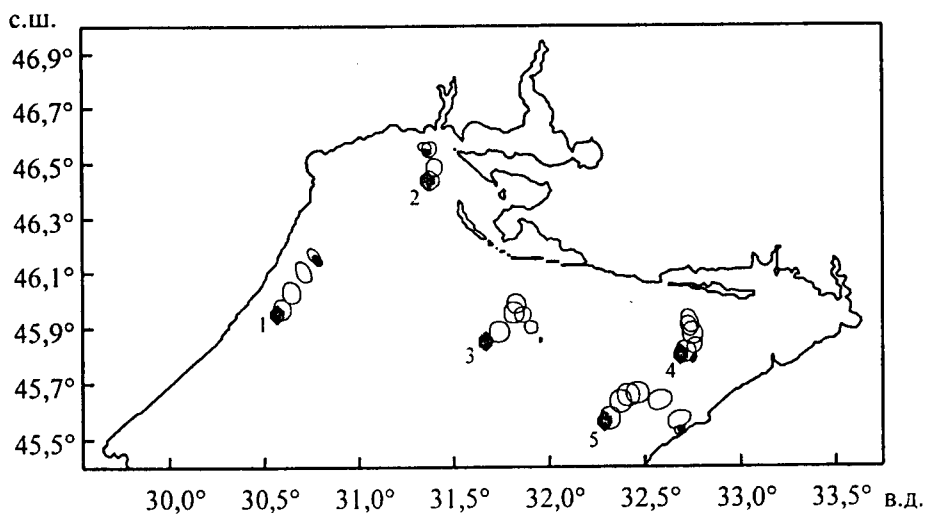
Перейдем к изучению особенностей трансформации областей загрязнения для разных районов северо-западного шельфа Черного моря. Рассмотрим пять вариантов расположения поверхностных мгновенных источников примеси (области, отмеченные серым цветом на рис. 3, а). Сплошными линиями показаны положения изолинии концентрации 0,05 через каждые 10 ч после выброса. Между изобатами 10 – 20 м находятся источники 1 и 2, между изобатами 20 – 30 м — источники 3 и 4, на изобате 35 м — источник 5. Характеристики циклона и начальные параметры образующихся пятен такие же, как и в предыдущей серии численных экспериментов. Каждый из источников включается в момент времени, когда скорость течений в месте выброса достигает 1 см/с. Коэффициенты турбулентной диффузии принимаются постоянными: $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$; $K_H = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Как показал анализ результатов расчетов, особенности трансформации областей загрязнения проявляются в направлении и величине переноса, а также во временной эволюции их трехмерной структуры. Смещение пятен определяется формирующимися при движении циклона полями скоростей жидкости. Пространственная неоднородность этих полей влияет на распределение загрязнения в море как непосредственно, так и через изменение интенсивности диффузии вследствие уменьшения или увеличения градиентов концентрации примеси.

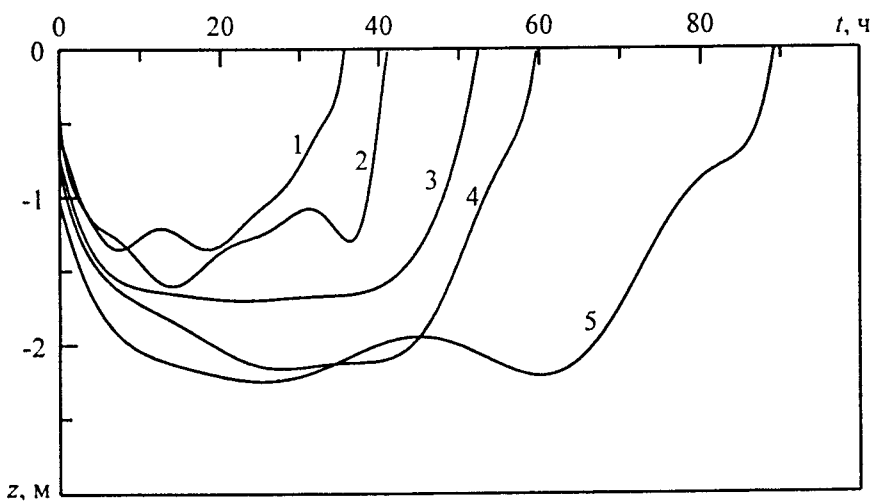
Сначала влиянию юго-западных ветров передней части циклона подвергается западное побережье, вдоль которого поверхностные водные массы увлекаются на северо-восток. В том же направлении перемещается область 1, интенсивно деформируясь и рассеиваясь вследствие возникших градиентов концентрации. При этом максимальная глубина проникновения примеси (как и ранее с концентрацией 0,05) здесь не превышает 1,4 м (кривая 1 на рис. 3, б). Для удобства на рис. 3, б моменты возникновения всех выбросов совмещены. Следуя за конфигурацией береговой черты, вдольбереговые потоки принимают антициклоническую направленность и существенно ослабевают, не приводя к заметному смещению остальных пятен в этом направлении.

По мере продвижения атмосферного возмущения юго-западные ветры достигают восточного побережья, меняя вблизи него направления скоростей на противоположные. Пятна 2 и 4 начинают двигаться на север, а 3 и 5 — на северо-восток, но уже под действием циклонической циркуляции водных масс. Область загрязнения 1 к моменту смены направления циркуляции заметно уменьшается в размерах и, не успев значительно сместиться к югу, рассеивается, просуществовав около 35 ч. Немногим дольше (40 ч) существу-

ет область 2, причем примесь достигает горизонта 1,6 м (кривая 2 на рис. 3, б).



а



б

Р и с. 3. Положение изолинии концентрации 0,05 на поверхности моря (а) и глубина ее проникновения (б) в зависимости от времени для источников 1 – 5 при $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$, $K_H = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

Воздействие северо-западных ветров, связанных с тыловой частью циклона, приводит к нарушению циклонической циркуляции только тогда, когда эти ветры достигают центра акватории и восточного побережья. Поле поверхностных течений перестраивается в соответствии с изменившейся ветровой ситуацией. Пятна 3 и 5 начинают смещаться на юго-восток, а пятно 4 — на юг. За 52 ч область 3, описав незамкнутую траекторию, рассеивается восточнее места выброса, тогда как область 4, просуществовав 59 ч, возвращается к своему первоначальному положению. Максимальная глубина загрязнения в первой из них (1,7 м, кривая 3 на рис. 3, б) на полметра меньше, чем во второй (2,2 м, кривая 4 на рис. 3, б). Дольше всего (~ 89 ч) прослеживаются следы выброса 5, произошедшего в самом глубоком из рассматриваемых районов. Следствием продолжительного существования этого пятна является его наибольшее удаление по горизонтали от начального положения и загрязнение слоя воды толщиной до 2,3 м (кривая 5 на рис. 3, б).

Заключение

Сформулируем кратко основные выводы, следующие из проведенного исследования.

Использование в процессе численных экспериментов постоянных (10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} м²/с) и переменных коэффициентов вертикальной диффузии показало следующее:

— траектории смещения области загрязнения, имеющей при разных коэффициентах диффузии неодинаковую пространственную структуру, отличаются по форме незначительно; существенно изменяется лишь длина траектории;

— увеличение коэффициента вертикальной диффузии от 10^{-6} м²/с до K_H , меняющегося в верхнем 50-метровом слое от $2,5 \cdot 10^{-4}$ ($z = 0$) до $3,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с ($z = 50$ м) [11], приводит к росту глубины проникновения загрязнения в 3 раза и уменьшению времени его рассеивания в 12 раз;

— заглупление пятна примеси сопровождается его вытягиванием в приповерхностном слое вдоль траектории движения, так как с глубиной имеет место запаздывание отклика жидкости на изменения ветровой ситуации.

Особенности трансформации областей загрязнения, связанные с локальными изменениями морфометрии дна в месте выброса, проявляются:

— в различных формах траекторий пятен примеси, обусловленных локальной структурой полей скоростей жидкости;

— во времени рассеивания загрязнения, изменяющемся для рассматриваемых случаев от 35 до 89 ч;

— в максимальных глубинах проникновения примеси, лежащих для данных пятен в диапазоне 1,4 – 2,3 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ибраев Р.А., Кукса В.И., Скирта А.Ю.* Моделирование переноса пассивной примеси вихревыми течениями в восточной части Черного моря // *Океанология*. — 2000. — 40, № 1. — С. 18 – 25.

2. Демьшев С.Г., Запелалов А.С., Чудиновских Т.В., Ментц Д.У. Моделирование возможных последствий захоронения токсичных веществ в глубоководной зоне Черного моря // *Метеорология и гидрология*. — 2003. — № 3. — С. 64 – 74.
3. *Изменчивость гидрофизических полей Черного моря* / Под ред. Б.А. Нелепо. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 240 с.
4. Иванов В.А., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В. Математическое моделирование сгонно-нагонных колебаний в Черном море // *Метеорология и гидрология*. — 1999. — № 1. — С. 56 – 63.
5. Иванов В.А., Коновалов А.В., Черкесов Л.В. Влияние циклонов на изменение уровня поверхности Азовского и Черного морей // Там же. — 2003. — № 4. — С. 73 – 80.
6. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models // *Coast. Estuar. Sci.* — 1987. — 4. — P. 1 – 16.
7. 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.
8. Григоркина Р.Г., Фукс В.Р. Воздействие тайфунов на океан. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 244 с.
9. Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // *Mon. Weather Rev.* — 1963. — 91. — P. 99 – 164.
10. Sweby P. K. High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws // *J. Numer. Analys.* — 1984. — 21. — P. 995 – 1011.
11. Демьшев С.Г., Кныш В.В., Коротяев Г.К. Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. — 2002. — № 3. — С.12 – 26.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
 Севастополь
 Морское отделение
 Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института,
 Севастополь

Материал поступил
 в редакцию 14.09.04

ABSTRACT Evolution of local pollution outbursts on the Black Sea northwestern shelf during a cyclone motion is studied using the mathematical simulation method. Non-linear equations of homogeneous viscid fluid motion in hydrostatic approximation and the turbulent diffusion equation are used. A cyclone formation constitutes a moving axially symmetric area of low pressure. Pollution outbursts result from the action of momentary sources on the sea free surface. Dependencies of trajectories of pollution area motions, time of their dissipation and depth of impurity penetration upon the bottom relief and intensity of diffusion processes are analyzed.