

Численный эксперимент по моделированию климатических полей на северо-западном шельфе Черного моря в зимний и летний сезоны

Анализируются результаты двух экспериментов, в которых исследование циркуляции проводится для января – февраля и июля – августа. Показано, что зимняя циркуляция определяется в основном воздействием ветра, а летом преобладающее влияние на формирование полей течений оказывает градиент плотности.

Наибольшие отклонения уровня моря от невозмущенного состояния для двух сезонов получены при действии северо-восточного ветра. Величины максимальных нагонов составляют 12 см зимой и 9 см летом, величины максимальных сгонов равны –5 см зимой и –4 см летом.

За счет мелкого шага сетки и уточненного рельефа дна описаны распределения течений на мелководье, получены элементы вихревого движения, не воспроизводимые моделью с крупным шагом, отмечено усиление течений вблизи мелководных районов по сравнению с предыдущими расчетами, проведенными на более грубой сетке.

Ключевые слова: численное моделирование, северо-западный шельф, высокое пространственное разрешение, климатические поля, мезомасштабные вихри.

Введение

Исследованию циркуляции вод на северо-западном шельфе Черного моря посвящены работы [1 – 5]. В статье [1] с применением баротропного варианта многоуровневой модели, основанной на примитивных уравнениях и монотонизированной разностной схеме, исследовались ветровые течения и течения, обусловленные стоком рек, для зимне-весеннего сезона с разрешением 6,1 км по оси x и 4,6 км по оси y . Показано, что существенную роль в формировании циркуляции играют рельеф дна и динамический эффект речного стока. В работах [2, 3] с использованием многослойной квазиизопикнической модели изучалась сезонная изменчивость термогидродинамических полей в северо-западной части Черного моря и Каламитском заливе с разрешением 9,35 км по оси x и 9,27 км по оси y . Представлены результаты адаптационных расчетов скорости течений для 12 мес, выполненных по среднемесячным климатическим данным. В статье [4] описана численная гидродинамическая модель прибрежной циркуляции вод, адаптированная к условиям Одесского и Приднепровско-Бугского районов. Приведены результаты расчетов термохалинной структуры и циркуляции вод с заданными из наблюдений температурой воздуха, скоростью и направлением ветра для марта – августа 1986 г. В работе [5] с применением σ -координатной модели исследовались волновые поля, генерируемые атмосферными возмущениями типа циклонов на северо-западном шельфе.

Данное исследование является продолжением работ [6 – 8] по адаптации гидродинамической модели [9] для расчета течений на шельфе Черного моря. Реализованную модель прибрежной циркуляции предполагается использо-

вать в качестве гидродинамического блока при обработке данных натуральных полигонных съемок.

В работе моделируются течения, возникающие под действием климатического ветра, стока рек, потоков тепла, осадков и испарения. Поля уровня, течений, температуры и солености рассчитываются и анализируются для наиболее характерных месяцев зимнего и летнего сезонов: января – февраля и июля – августа. Используется высокое пространственное разрешение $\sim 1,6$ км по горизонтали, а также проводится сопоставление полученных результатов с результатами модели с шагом 5 км.

Уравнения модели и краевые условия

Система уравнений модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды имеет вид (ось z направлена вертикально вниз) [9]:

$$u_t - (\xi + f)v + wu_z = -g\zeta_x - (P' + E)_x / \rho_0 + (v_v u_z)_z + v_H \nabla^2 u, \quad (1)$$

$$v_t + (\xi + f)u + wv_z = -g\zeta_y - (P' + E)_y / \rho_0 + (v_v v_z)_z + v_H \nabla^2 v, \quad (2)$$

$$u_x + v_y + w_z = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d\zeta}{dt} + \int_0^H (u_x + v_y) dz = (Pr - Ev), \quad (4)$$

$$P = g\rho_0\zeta + g \int_0^z \rho d\mu = g\rho_0\zeta + P', \quad (5)$$

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = \kappa_H \nabla^2 T + (\kappa^T T_z)_z, \quad (6)$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = \kappa_H \nabla^2 S + (\kappa^S S_z)_z, \quad (7)$$

$$\rho = \rho_0 + \alpha_1^T T + \alpha_1^S S + \alpha_2^T T^2 + \alpha^{ST} ST, \quad (8)$$

где $E = \rho_0 (u^2 + v^2) / 2$, $\xi = v_x - u_y$, Pr – скорость выпадения осадков, Ev – скорость испарения воды с поверхности моря, v_H, κ_H – коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали, v_v, κ^T, κ^S – коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии тепла и соли по вертикали. Остальные обозначения в уравнениях (1) – (8) — общепринятые [9].

Уравнение (4), применяемое для расчета уровня моря, получено интегрированием уравнения (3) с использованием граничных условий $w = -\frac{d\zeta}{dt} + Pr - Ev$ при $z = 0$ и $w = 0$ при $z = H$.

Дополним систему уравнений (1) – (8) краевыми и начальными условиями.

Краевые условия на поверхности (при $z = 0$) имеют вид:

$$v_v u_z = -\tau^x, v_v v_z = -\tau^y, \kappa^v T_z = Q^T, \kappa^v S_z = (Pr - Ev)S_0 + \beta(S^{cl} - S_0),$$

где τ^x, τ^y – составляющие компоненты напряжения трения ветра, S^{cl} – климатическая соленость, S_0 – соленость на поверхности моря, Q^T – потоки тепла, $\beta = 2/1728$ – заданный параметр.

На дне выполняются условия $u = v = w = 0, T_z = 0, S_z = 0$.

На твердых боковых стенках используются следующие условия:

для меридиональных участков $u = 0, v_x = 0, T_x = 0, S_x = 0$;

для зональных участков границы $v = 0, u_y = 0, T_y = 0, S_y = 0$.

Для участков границы, где втекают реки, задаются условия:

для меридиональных участков границы $u = u^p, v_x = 0, T = T^p, S = S^p$;

для зональных участков границы $v = v^p, u_y = 0, T = T^p, S = S^p$,

где u^p, v^p – скорости в устьях рек, T^p, S^p – температура и соленость в реках.

Отметим, что уровень моря рассчитывается из дискретного аналога уравнения (4) в соответствии с работами [10, 11].

Для задания граничных условий на открытой границе области использовались полученные в статье [12] поля течений, температуры, солености, рассчитанные по модели для всего моря. Расчет в [12] был проведен на горизонтальной сетке 5×5 км; по вертикали использовано 45 горизонтов с глубинами 2,5; 5; 10; ...; 30; 40; ...; 62,5; 75; ...; 125; 150; 175; 200; 250; ...; 700; 800; ...; 2000; 2050; 2075; 2085; 2095; 2100 м. Шаг по времени равнялся 5 мин. В отличие от работы [12] в расчетах учитывался уточненный рельеф дна.

Была произведена выборка данных для 8 горизонтов: 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40 м. Значения для u, v, T и S , соответствующие широте жидкой границы, были линейно проинтерполированы на выбранную сетку для каждого момента времени. С учетом знаков величин v ставились следующие граничные условия: для участков открытой границы, где вода втекает ($v > 0$), задаются компоненты скорости, температура, соленость: $u|_r = u^g, v|_r = v^g, T|_r = T^g,$

$S|_r = S^g$; где вода вытекает ($v < 0$), для u, v ставятся условия свободного протекания: $\partial u / \partial n = 0, \partial v / \partial n = 0$; для определения температуры и солености на открытой границе решается уравнение

$$\partial \varphi / \partial t + C \partial \varphi / \partial y = 0, \quad (9)$$

где φ – некоторая переменная (T или S), C – скорость переноса возмущений.

В работе [8] было проведено сопоставление результатов расчетов с использованием условий $\partial T / \partial n = 0, \partial S / \partial n = 0$ и условия (9) для уравнений переноса – диффузии тепла и соли (7) и (8). Показано, что условие (9) обеспечивает более точное воспроизведение температуры и солености вблизи открытой границы.

Рассматриваемая область с реальной топографией дна аппроксимируется боксами, центрам которых соответствуют значения индексов i, j, k , граням –

$i+1/2, j+1/2, k+1/2$. Горизонтальные размеры боксов составляют $\Delta x, \Delta y$, по вертикали используется неравномерная аппроксимация $h_z^k = z_{k+1/2} - z_{k-1/2}$, $h_z^{k+1/2} = z_{k+1} - z_k$. Ось времени аппроксимируется следующим образом: $t_n = n\Delta t$, где Δt – шаг по времени, $n = 0, 1, 2, \dots$. Рассматриваемая область шельфа имеет открытую южную границу, которая совпадает с границей полосы, соответствующей по оси y индексам $j = 1, 2$. Таким образом, численные расчеты начинаются с приграничной области ($j = 3$). Численная схема модели подробно описана в работах [6 – 8] с указанием проведенных преобразований, обеспечивающих учет задания скоростей, температуры и солености на жидкой части границы.

Остановимся на дискретизации уравнения (9). Выражения для определения $T(S)$ на жидкой границе на $n+1$ -м шаге по времени имеют вид [13]:

$$\varphi_2^{n+1} = \frac{[1 - (\Delta t / \Delta y)C]}{[1 + (\Delta t / \Delta y)C]} \varphi_2^{n-1} + \frac{2(\Delta t / \Delta y)C}{[1 + (\Delta t / \Delta y)C]} \varphi_3^n, \quad 0 \leq C < \Delta y / \Delta t,$$

$$\varphi_2^{n+1} = \varphi_3^n, \quad C = \Delta y / \Delta t.$$

Здесь φ_2 – значения температуры (солености) на открытой части границы, φ_3 – значения температуры (солености) в приграничной области. Индексы i, k у переменной φ не приводятся.

Для расчета C используется методика, описанная в статье [13]:

$$C = \Delta y / \Delta t \quad \text{при} \quad -\varphi_t / \varphi_y > \Delta y / \Delta t,$$

$$C = -\varphi_t / \varphi_y \quad \text{при} \quad 0 < -\varphi_t / \varphi_y < \Delta y / \Delta t.$$

Корректный расчет скорости переноса возмущений C важен при использовании условий излучения, поэтому в работе [8] была проведена серия вычислительных экспериментов с целью выбора численной схемы, при использовании которой ошибки при расчете величин T и S у открытой границы будут наименьшими. Среди четырех различных численных схем для расчета C [14] наилучшие результаты показала центральная явная схема:

$$C = -\varphi_t / \varphi_y = -\frac{(\varphi_3^{n+1} - \varphi_3^{n-1}) \Delta y}{(\varphi_2^n - \varphi_4^n) \Delta t}.$$

Для получения начальных полей использовались поля течений, температуры и солености, рассчитанные по модели для всего моря с шагом 5 км в работе [12] (на 15 января для первого расчета и на 15 июля для второго). Эти поля были линейно проинтерполированы на сетку с высоким разрешением, и выбраны значения, попадающие в рассматриваемую область шельфа.

Поскольку интерполяция вносит рассогласования между полем плотности (температура и соленость) и полем течений, то на начальном этапе в обоих вариантах расчетов была проведена процедура геострофического согласования. Она заключалась в том, что уравнения модели (1) – (8) интегрирова-

лись на 5 сут с краевыми условиями, которые не изменялись во времени. Из анализа графиков средней по объему и на горизонтах кинетической энергии, дивергенции горизонтальной скорости течений было установлено, что квази-геострофический баланс достигается через 3 сут. Полученные поля для u , v , ζ , T и S принимались за начальные.

Параметры модели

Рассматривается область Черного моря, ограниченная $45,5^\circ$ с.ш. и расположенная между $29,5$ и $33,5^\circ$ в.д., для которой максимальная глубина не превышает 50 м. Численные эксперименты проводились с разрешением 1,66 км по оси x , 1,56 км по оси y . Шаг по времени 30 с. По вертикали горизонтальные составляющие скорости течений, температура и соленость рассчитывались для 44 горизонтов: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 34; 35; 37; 39; 41; 43; 45; 47; 49 м. Вертикальная компонента скорости вычислялась для промежуточных горизонтов.

Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали рассчитывались с известной аппроксимацией Филандера – Пакановского [15]:

$$v_V = v_0^V (R_0 + Ri)^{-2} + v_1, \quad \kappa^S = \left[v_0^S (R_0 + Ri)^{-2} + v_1 \right] / (R_0 + Ri) + \kappa_1^S,$$

$$\kappa^T = \left[v_0^T (R_0 + Ri)^{-2} + v_1 \right] / (R_0 + Ri) + \kappa_1^T,$$

где $Ri = (\partial\rho/\partial z)g \left[(\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2 \right]^{-1}$ – число Ричардсона, $R_0 = 1$ – выбранный параметр.

Выбор параметров аппроксимации Филандера – Пакановского осуществлялся на основе серии специализированных численных экспериментов. Для зимнего сезона $v_0^V = 10$, $v_0^S = 10$, $v_0^T = 10$, $v_1 = 1$, $\kappa_1^S = 3$, $\kappa_1^T = 3$, для летнего периода времени они принимали следующие значения: $v_0^V = 10$, $v_0^S = 10$, $v_0^T = 5$, $v_1 = 1$, $\kappa_1^S = 1$, $\kappa_1^T = 1,1$.

Для коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали выбраны следующие значения: $\nu_H = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$, $\kappa_H = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$.

Значения потоков влаги и тепла на поверхности моря взяты из статьи [16]. На поверхности моря задаются поля климатического ветра, полученные в работе [17] и линейно проинтерполированные на выбранную сетку. В период времени 15 января – 15 февраля преобладают северные и северо-восточные ветры со средней скоростью 5 – 6 м/с. Сила ветра максимальна 20 – 21 января и 28 – 30 января (7 м/с). После 7 февраля направление ветра изменяется, и скорость ветра уменьшается до 2 – 3 м/с.

В период времени 15 июля – 15 августа наблюдаются северо-восточные ветры со средней скоростью 4 – 5 м/с, северо-западные, юго-западные и за-

падные ветры со средней скоростью 3 м/с. Сила ветра максимальна в период с 4 по 9 августа и составляет 5,5 – 6 м/с.

При расчетах учитывался сток трех рек – Днепра, Днестра и Южного Буга. Для зимнего и летнего сезонов температура в устьях рек задавалась 4,5 и 21°С соответственно. Соленость воды в устьях рек – 0‰.

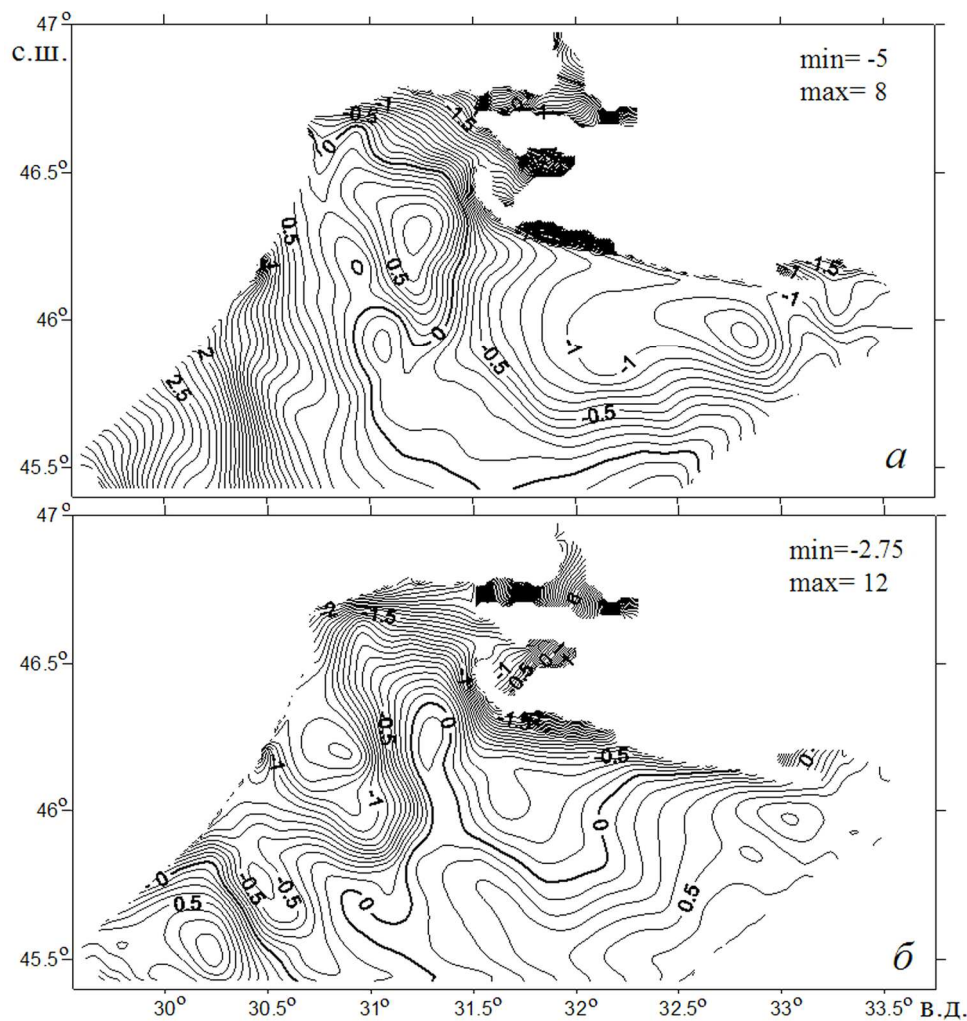
Результаты численного эксперимента в зимний период

Поля приведенного уровня. Рассмотрим пространственную структуру поля уровня. Так как в выбранный период времени преобладают северные и северо-восточные ветры, для анализа были выбраны поля уровня, сформировавшиеся под их действием. С 20 по 26 января направление действия ветра – северо-восточное, скорость ветра составляет 5 – 6 м/с; с 27 января по 6 февраля преобладают северные ветры, скорость ветра изменяется от 3 до 6 м/с. В рассматриваемые периоды времени поля ветра однородны по пространству. На рис. 1 представлены поля уровня, полученные для 26 января под влиянием северо-восточного ветра и для 6 февраля под действием северного ветра, рассчитанные в эксперименте с разрешением ~1,6 км (изолинии проведены через 0,1 см).

Северо-восточный ветер нагоняет воду в юго-западный район области (значения уровня повышаются до 4,7 см). В районе Тендровской Косы уровень понижается до –3 см (рис. 1, а), в Ягорлыцком заливе — до –5 см. Из анализа поля вертикальной скорости следует, что на севере области и вдоль восточного побережья наблюдается подъем вод. Значения уровня под действием ветра и стока рек в Днепровском и Бугском лиманах изменяются от 1 до 8 см.

Северный ветер направляет водные массы на юг к открытой границе (рис. 1, б), формируя сгоны до –2,75 см на севере области в районе Одессы, а также около Тендровской Косы, значения нагонов на юге области составляют не более 1 см. Вдоль всей твердой границы наблюдается подъем вод. Значения уровня в Днепровском и Бугском лиманах изменяются от 1 до 12 см.

Сравнивая поля уровня, полученные по модели с шагами по пространственным переменным ~1,6 и 5 км, отметим, что между ними наблюдается качественное соответствие, однако в полях уровня, рассчитанных с более высоким разрешением (рис. 1), детально воспроизведены изменения уровня в мелководных заливах и лиманах, получены элементы вихревого движения в Каркинитском заливе и центральной части области. При действии северного ветра (рис. 1, б) наблюдаются вихревые образования в западной части области, формируется фронтальная зона, разделяющая область положительных и отрицательных значений уровня.

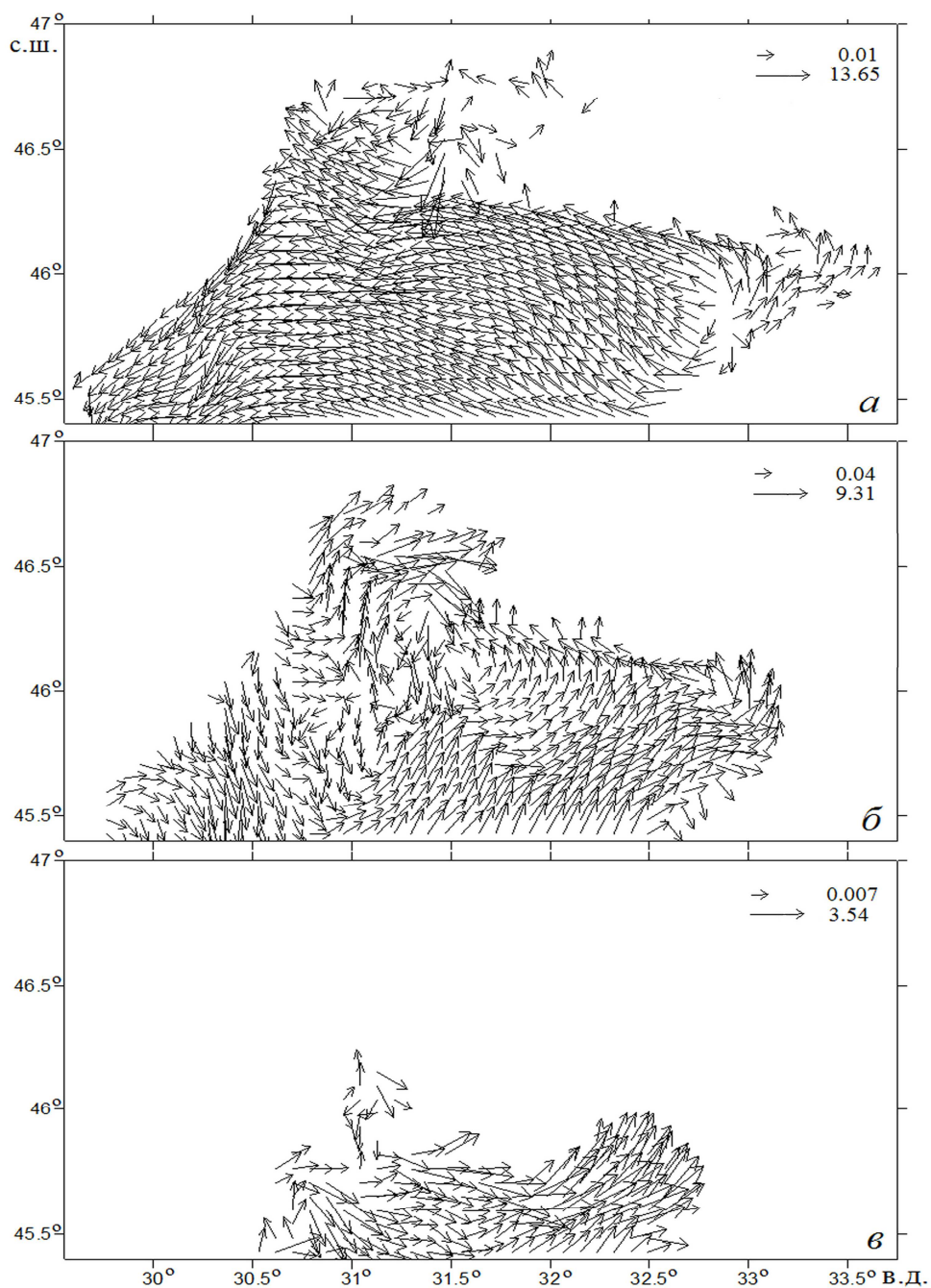


Р и с. 1. Поля уровня (см): *а* – полученное для северо-восточного ветра 26 января, *б* – для северного ветра 6 февраля

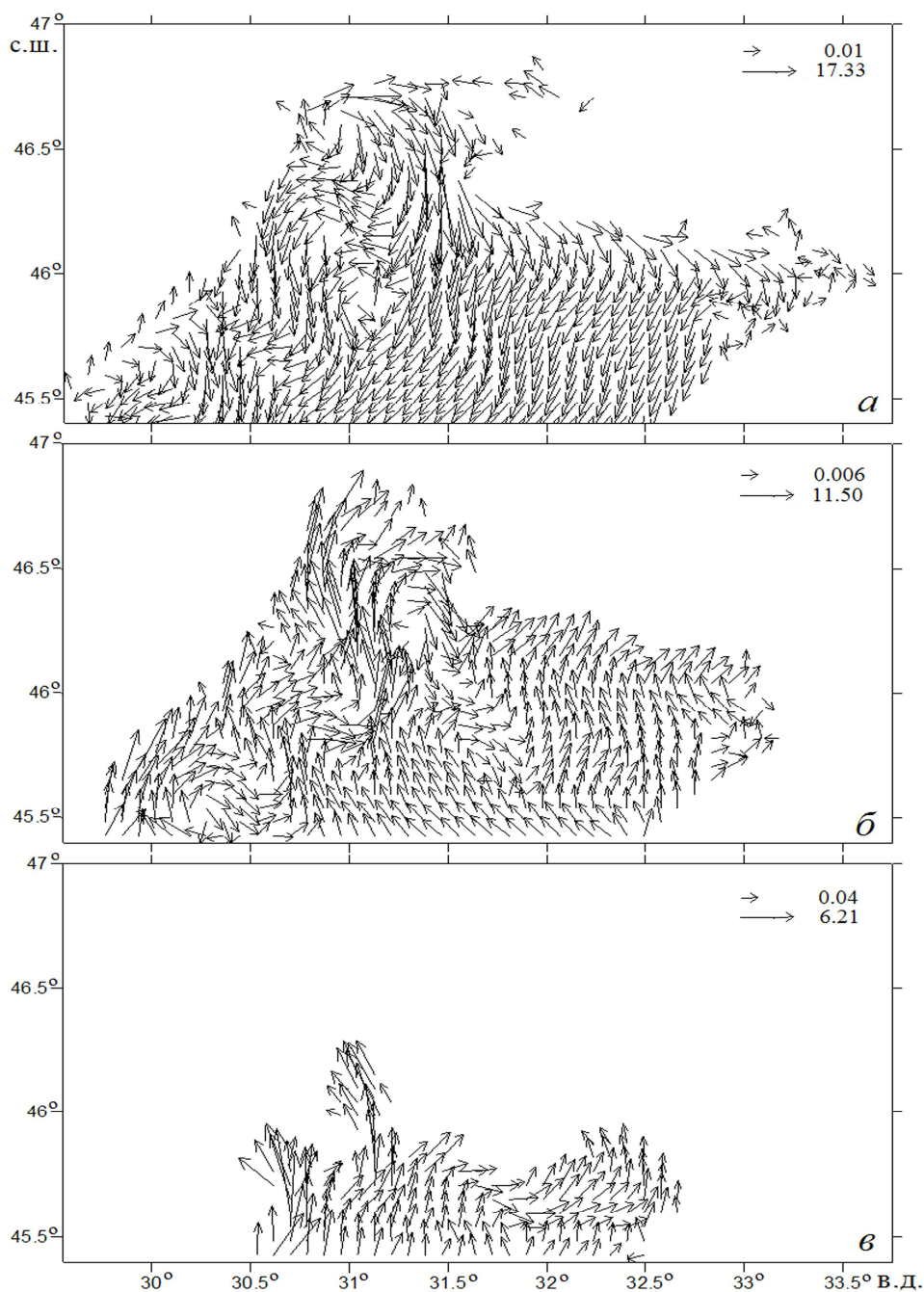
Поля течений. Течения на шельфе наиболее интенсивны зимой. Рассмотрим течения на различных горизонтах, сформировавшиеся под действием северо-восточного ветра 26 января (рис. 2) и под действием северного ветра 6 февраля (рис. 3) в эксперименте с высоким разрешением. На рис. 2 и 3 представлены поля течений, на которых изображается каждая четвертая стрелка для удобства рассмотрения и анализа картины циркуляции вод северо-западного шельфа в целом.

Под действием северо-восточного ветра 20 – 26 января на верхнем горизонте вода направлена к западной части открытой границы, максимальные значения скорости течений изменяются от 18 до 26 см/с в зависимости от скорости ветра (район Тендровской Косы), скорости течений у открытой границы составляют не более 15 см/с. На горизонте 3 м (рис. 2, *а*) скорость поступающей воды через восточную часть открытой границы составляет 6 –

10 см/с, в западной части вода вытекает. На горизонте 10 м (рис. 2, б) направление течений изменяется – вода втекает на шельф через восточную часть открытой границы со средней скоростью 5 см/с. При изменении глубины от 3 до 30 м максимальные значения уменьшаются от 13 до 3 см/с (рис. 2, в).



Р и с. 2. Поля скорости течений (см/с), сформировавшихся под действием северо-восточного ветра 26 января: *а* – на горизонте 3 м, *б* – на горизонте 10 м, *в* – на горизонте 30 м

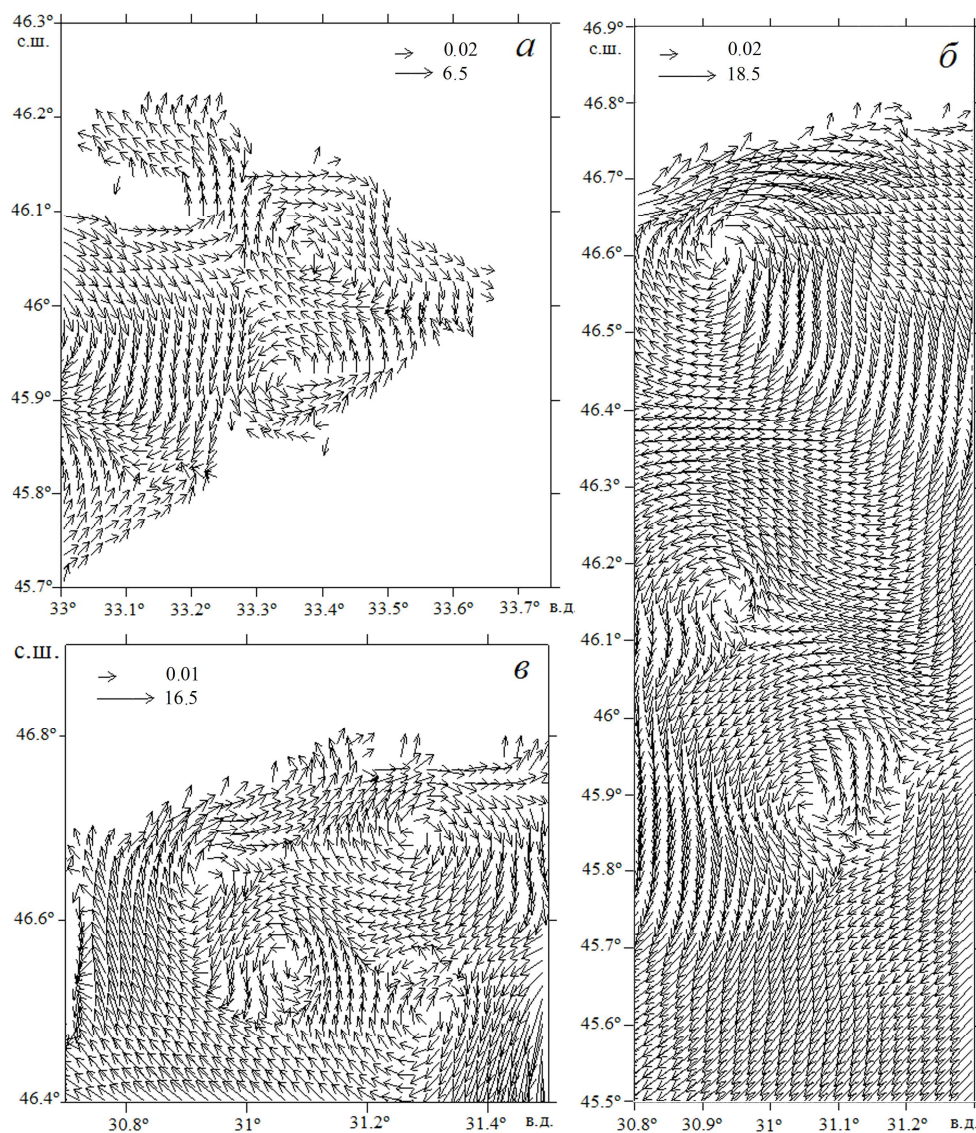


Р и с. 3. Поля скорости течений (см/с), сформировавшихся под действием северного ветра 6 февраля: *а* – на горизонте 3 м, *б* – на горизонте 10 м, *в* – на горизонте 30 м

В период с 27 января по 7 февраля под влиянием северных ветров на верхнем горизонте вода устремляется к открытой границе, максимальные значения меняются от 20 до 33 см/с (наблюдаются в Тендровском заливе) в

зависимости от силы ветра. На горизонте 3 м (рис. 3, *а*) вода вытекает через открытую границу в юго-западном направлении. На горизонте 10 м (рис. 3, *б*) практически через всю открытую границу вода поступает в область, наблюдается интенсивное струйное течение со скоростью 7 – 8 см/с, направленное на север. На горизонте 30 м (рис. 3, *в*) максимум скорости не больше 6 см/с.

В статьях [2] и [12] отмечается, что в феврале холодные воды интенсивно выносятся на верхних горизонтах через южную открытую границу в юго-западном направлении (эксперимент проводился с разрешением 9,35 и 5 км соответственно). В наших вычислительных экспериментах получено соответствие результатам этих работ.



Р и с. 4. Поля скорости течений (см/с) на горизонте 3 м, рассчитанные по модели с шагом ~1,6 км: *а, б* – для северного ветра 6 февраля, *в* – для северо-восточного ветра 8 августа

Расчет с высоким пространственным разрешением позволил детально воспроизвести течения в Джарылгачском, Тендровском, Ягорлыцком заливах и в Днепровском лимане. При действии северного ветра в верхнем слое (рис. 4, *а*) образуются два вихря (циклонический и антициклонический) в Каркинитском заливе, два циклонических вихревых образования в центральной части области и антициклонический вихрь на севере (рис. 4, *б*), которые отсутствуют в экспериментах с более грубым разрешением. На рис. 4 прорисована каждая стрелка для демонстрации особенностей в распределении течений в отдельных частях области. Отметим также усиление течений вблизи мелководья по сравнению с результатами эксперимента с шагом 5 км.

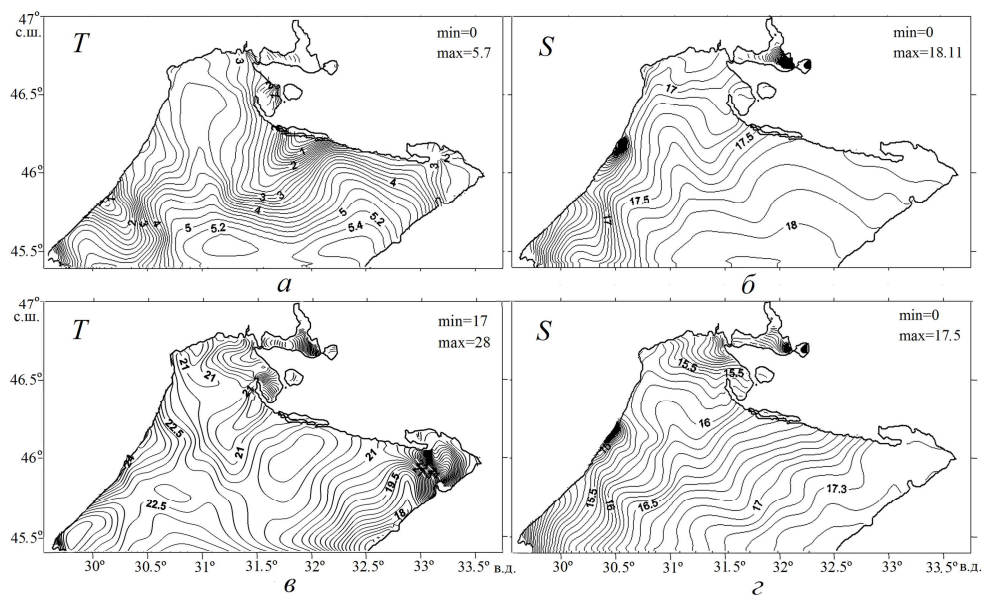
Поля температуры. В январе – феврале по данным наблюдений температура изменяется на шельфе от $-0,5 \dots +1,0^{\circ}\text{C}$ у берегов до $+7^{\circ}\text{C}$ в открытой части. По результатам расчета с шагом $\sim 1,6$ км в период с 15 января по 15 февраля минимальные значения температуры не превышают 0°C , а максимальные – уменьшаются от $7,2$ до $5,6^{\circ}\text{C}$. Так же как и в статье [2], отмечается, что наиболее интенсивное охлаждение вод зимой происходит на верхних горизонтах на севере региона, где наблюдается минимум температуры.

На первый расчетный день (15 января) температура у открытой границы составляет $6 - 7^{\circ}\text{C}$, в мелководных заливах и лиманах температура меняется от $0,3$ до 4°C . Под действием северных ветров и отрицательных потоков тепла происходит интенсивное выхолаживание мелководных районов. В последний расчетный день (15 февраля) температура у открытой границы области не превышает $5,6^{\circ}\text{C}$, в мелководных заливах и лиманах температура воды – нулевая.

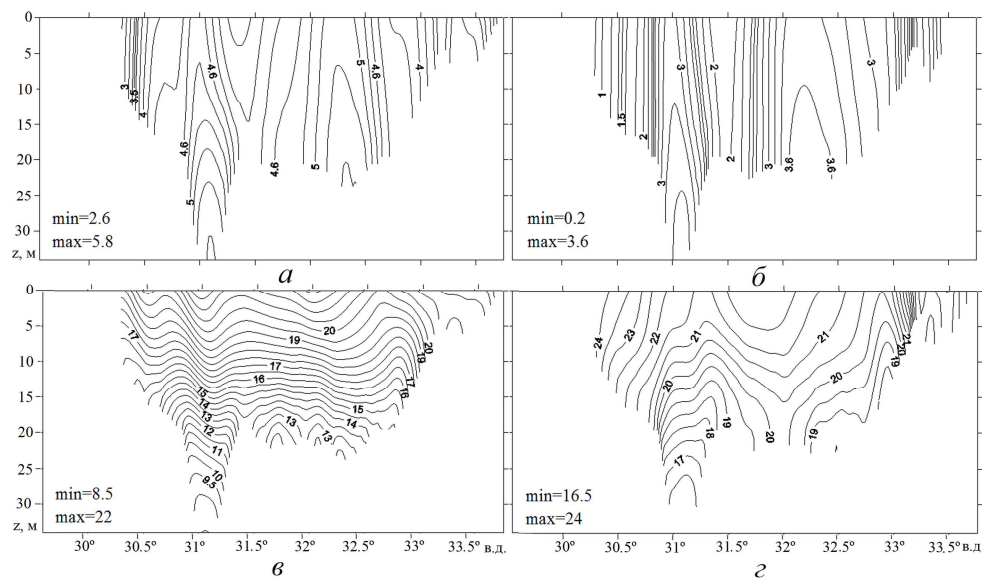
Проанализируем изменения в полях температуры на различных горизонтах в первый и последний расчетные дни. 15 января на горизонте 3 м минимальная температура $1 - 2^{\circ}\text{C}$ наблюдается в Тендровском и Ягорлыцком заливах, в Днепровском лимане температура изменяется от 1 до 4°C , максимальная температура у открытой границы составляет $6,8^{\circ}\text{C}$. На горизонте 10 м температура $2 - 3^{\circ}\text{C}$ наблюдается в районе Днестровского лимана и в Ягорлыцком заливе, максимум температуры – у открытой границы ($6,7^{\circ}\text{C}$). На горизонте 30 м значения температуры изменяются от $5,1$ до $6,9^{\circ}\text{C}$.

15 февраля на горизонте 3 м (рис. 5, *а*) температура в мелководных районах области не превышает $1,5^{\circ}\text{C}$, у восточной части открытой границы располагаются воды с максимальной температурой $5,7^{\circ}\text{C}$. На горизонте 10 м минимальная температура (менее 2°C) наблюдается в Тендровском заливе, через открытую границу в область поступает вода со средней температурой 5°C . На горизонте 30 м значения температуры изменяются от 4 до 6°C . Наблюдается соответствие результатам, полученным в работе [2].

На рис. 6, *а* и *б* представлены вертикальные сечения в поле температуры вдоль 46° с.ш. для первого и последнего расчетного дня соответственно. 15 января минимальная температура $2,6^{\circ}\text{C}$ наблюдается на верхних горизонтах, максимальные значения $5,8^{\circ}\text{C}$ достигаются на глубинах ниже 25 м. За месяц минимальная температура понижается до $0,2^{\circ}\text{C}$, максимальная – до $3,6^{\circ}\text{C}$.



Р и с. 5. Поля температуры ($^{\circ}\text{C}$) и солёности (‰) на горизонте 3 м: *а, б* – для 15 февраля; *в, г* – для 8 августа



Р и с. 6. Вертикальные сечения в полях температуры ($^{\circ}\text{C}$) вдоль 46° с.ш.: *а* – для 15 января, *б* – для 15 февраля, *в* – для 15 июля, *г* – для 15 августа

Сравнивая поля температуры на различных горизонтах, полученные по модели с шагами по пространственным переменным $\sim 1,6$ и 5 км, отметим, что между ними наблюдается качественное соответствие. Поля температуры в слое воды $0 - 10$ м, рассчитанные с высоким разрешением, характеризуются

выхолаживанием вод на мелководье и в прилегающих к нему районах, в особенности вблизи Тендровского залива.

Поля солености. В январе – феврале по данным наблюдений соленость поверхностного слоя моря в северо-западной части составляет 18‰, при приближении к берегам она уменьшается до 16‰; в районе устьев рек соленость понижается до 5‰ и менее. По результатам расчетов максимальная соленость в рассматриваемой области изменяется от 18,09 до 18,15‰, минимальная соленость – 0‰.

Поступление пресной воды из рек обуславливает низкую соленость вблизи устьев рек (0 – 15‰). Максимальные значения поверхностной солености наблюдаются у южной открытой границы, что связано с поступлением более соленых и относительно теплых вод из района свала глубин. Сравнивая поля солености, отметим, что через месяц структура полей осталась практически неизменной, за исключением некоторого уменьшения области распресненных вод на верхних горизонтах вследствие замерзания рек. На рис. 5, б представлено распределение солености на горизонте 3 м в последний расчетный день (15 февраля). По вертикали ниже 5 м соленость в рассматриваемый период изменяется незначительно.

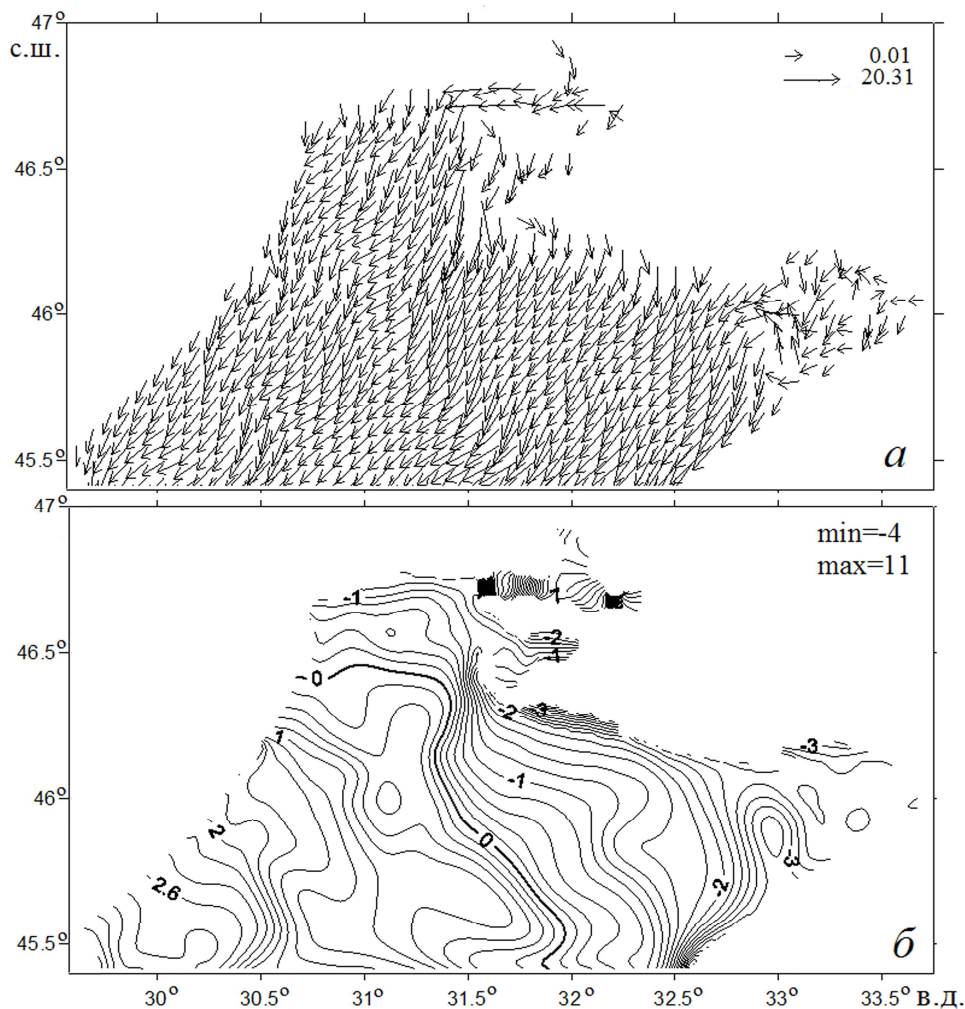
При сравнении полей солености, полученных по модели с шагами по пространственным переменным ~1,6 и 5 км, отметим, что в расчете с высоким разрешением места впадения рек и глубины устьев рек были заданы более точно, что позволило более аккуратно построить поля солености в верхнем слое моря в этих районах.

Результаты численного эксперимента в летний период

Поля течений и приведенного уровня. Рассмотрим поверхностные течения на шельфе в период с 15 июля по 15 августа. Под действием северо-восточного ветра со скоростью 4 – 4,5 м/с 15 – 18 июля течения направлены к западной части открытой границы, максимальные значения скорости течений составляют 18 – 20 см/с (достигаются в центре области и у восточной части открытой границы), на мелководье скорости течений не превышают 8 см/с. С 19 июля по 4 августа над поверхностью моря действуют ветры со скоростями 3 – 4 м/с различных направлений (южный, юго-западный, юго-восточный, западный, северо-западный и северный), но их воздействие не оказывает преобладающего влияния на циркуляцию, и сохраняется структура полей течений, сформировавшихся под действием северо-восточного ветра. С 5 по 8 августа вновь преобладает северо-восточный ветер, его скорость составляет 5,5 – 6 м/с. Поле поверхностных течений, образовавшихся под его действием 8 августа, представлено на рис. 7, а. Максимальная скорость течений составляет 20 см/с (у Тендровской Косы), значения скорости течений в центре бассейна не превышают 15 см/с. С 9 по 15 августа направление ветра – западное, его скорость составляет 3 – 4 м/с, но картина поверхностных течений существенно не меняется.

Опишем течения на различных горизонтах, возникшие под действием северо-восточного ветра 8 августа. На горизонте 3 м вода вытекает из области со скоростью 6 – 10 см/с практически через всю открытую границу, за ис-

ключением западной части, где вода втекает, течения наиболее интенсивны у Тендровской Косы (максимум значений – 18 см /с). На горизонте 10 м вода поступает в область через западную часть открытой границы, наблюдается интенсивное струйное течение со скоростью 7 – 9 см /с, направленное на север. При изменении глубины от 3 до 30 м максимальные значения скорости уменьшаются от 18 до 5 см /с.



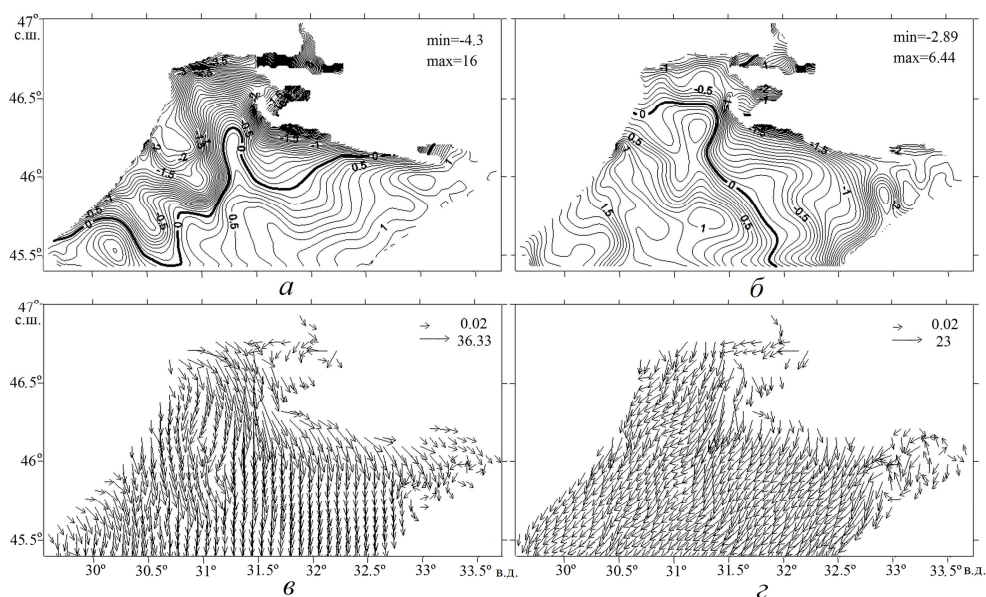
Р и с. 7. Поля скорости поверхностных течений, см/с (а) и уровня, см (б), сформировавшиеся под действием северо-восточного ветра 8 августа

При сравнении полей течений, сформировавшихся под действием северо-восточного ветра на горизонте 3 м, полученных по модели с шагами ~1,6 и 5 км, отметим, что в полях с более высоким разрешением воспроизводятся циклонический вихрь и два антициклонических вихревых образования на севере области (рис. 4, в), наблюдаются более интенсивные вдольбереговые

течения. В верхнем 5-метровом слое в юго-западной части области получены антициклоническое и циклоническое образования, не воспроизводимые моделью с крупным шагом.

На рис. 7, б представлено поле уровня, рассчитанное с учетом действия северо-восточного ветра 8 августа. Ветер нагоняет воду в западный район области (значения уровня повышаются до 3,7 см). В районе Тендровской Косы и восточных берегов области уровень понижается до -4 см, в Ягорлыцком заливе — до -2 см. В полях вертикальной скорости у всего восточного побережья наблюдается подъем вод. Значения уровня под действием ветра и стока рек в Днепровском и Бугском лиманах изменяются от 3 до 11 см.

Исследуем особенности формирования зимней и летней циркуляции при воздействии ветра одинаковой силы и направления. 29 января и 3 августа над поверхностью моря действует северный ветер с максимальной скоростью 5,6 м/с. На рис. 8 представлены поля уровня и поверхностных течений, образовавшихся под его влиянием зимой и летом. Зимой на верхнем горизонте (рис. 8, в) направление течений совпадает с направлением действующего ветра, максимальные значения скорости 30 – 36 см/с достигаются в Тендровском заливе. В летний период времени направление поверхностных течений – северо-западное, максимум скорости составляет 23 см/с (рис. 8, г). Сравнивая структуру полей уровня, полученных с учетом действия северного ветра (рис. 8, а и 8, б), сделаем вывод, что воздействие ветра оказывает преобладающее влияние на формирование зимней циркуляции, а летом поля течений определяются в основном градиентом плотности.



Р и с. 8. Поля уровня, см (а, б) и скорости поверхностных течений, см/с (в, г), сформировавшиеся под действием северного ветра: а, в – 29 января, б, г – 3 августа

Поля температуры. По данным наблюдений в самые теплые месяцы (июль и август) средняя температура воды на шельфе изменяется от 21 до 25°C. По результатам расчета в период с 15 июля по 15 августа минимальные значения температуры по всей области увеличиваются от 7,4 до 8,4°C (эти значения достигаются на нижних горизонтах), а максимальные значения увеличиваются от 23,4 до 29°C (на верхнем горизонте).

Исследуем изменения температуры на верхнем горизонте в период с 15 июля по 15 августа. На первый расчетный день поверхностная температура у открытой границы и в Каркинитском заливе составляет 22 – 23°C (это максимальные значения), в мелководных заливах и лиманах на севере области температура меняется от 18 до 20°C. Поверхностные воды мелководья являются менее прогретыми по сравнению с центральной частью области вследствие подъема вод холодного промежуточного слоя. Минимальные значения 17 – 18°C наблюдаются у восточной части открытой границы, в районе западнее Днепровского лимана и Тендровского залива. Температура в центральной части бассейна составляет 21 – 22°C. За месяц происходит дальнейшее повышение температуры поверхностного слоя воды до 27 – 29°C (эти значения достигаются в Тендровском, Ягорлыцком и Каркинитском заливах, а также в Днепровском лимане). В последний расчетный день температура в центральной части бассейна составляет 23 – 24°C, из района свала глубин продолжает поступать относительно холодная вода 18°C через восточную часть открытой границы.

Проанализируем изменения в полях температуры на различных горизонтах, образовавшихся на 10-е и 24-е расчетные сутки (25 июля и 8 августа).

На горизонте 3 м на 10-е сутки сформировались две зоны с максимальной температурой 24 – 26°C – в Днепровском лимане и Каркинитском заливе, значения температуры в центральной части области не превышают 23°C. На горизонте 10 м практически через всю открытую границу в область поступают теплые воды с температурой 21 – 23°C, однако за 10 расчетных дней водные массы не успели перемешаться с более теплыми поверхностными массами, и средняя температура воды в области составляет 18 – 19°C. На горизонте 30 м через западную часть открытой границы поступает холодная вода с температурой 8 – 9°C, в восточной части области температура изменяется от 10 до 14°C.

На горизонте 3 м на 24-е сутки (рис. 5, в) в мелководных заливах и лиманах температура увеличивается от 24 до 28°C, значения температуры в центральной части бассейна составляют 21 – 23°C, минимумы значений (18 – 19°C) отмечаются у восточной части жидкой границы. На горизонте 10 м через открытую границу в область поступают теплые воды с температурой 21 – 23°C, они хорошо перемешиваются с поверхностными массами, и средняя температура воды в области составляет 20 – 22°C. На горизонте 30 м через западную часть открытой границы продолжает поступать холодная вода с температурой 9 – 10°C, максимальные значения температуры достигаются в восточной части области (15°C).

На рис. 6, в и 6, г представлены вертикальные сечения в полях температуры вдоль 46° с.ш. для первого и последнего расчетного дня соответственно. 15 июля воды с минимальной температурой 8 – 10°C располагаются на глу-

бинах ниже 25 м, на верхних горизонтах значения температуры составляют 21 – 22°C. За месяц интенсивного прогрева поверхностная температура повышается до 23 – 25°C, значения температуры на нижних горизонтах составляют 16 – 17°C.

Поля солености. За рассматриваемый период времени с 15 июля по 15 августа максимальные значения поверхностной солености уменьшаются от 17,7 до 17,5‰ (наблюдаются у восточной части открытой границы). На рис. 5, *г* представлено распределение солености на горизонте 3 м 8 августа. Отметим, что через месяц интегрирования качественная структура полей солености осталась практически неизменной, за исключением некоторого увеличения области распресненных вод на верхних горизонтах за счет речного стока. С увеличением глубины соленость возрастает, и на горизонте 30 м максимальные значения составляют 17,90 – 17,95‰.

Заключение

Трехмерная нелинейная численная модель Черного моря адаптирована к условиям шельфовой зоны. Для зимнего и летнего периодов рассчитаны климатические поля уровня, течений, температуры, солености с высоким пространственным разрешением (1,66×1,56 км по горизонтали и 44 горизонта по вертикали). Полученные результаты согласуются с результатами других авторов.

Наибольшие величины сгонов и нагонов для двух сезонов наблюдаются при действии северо-восточного ветра. Максимальные отклонения свободной поверхности от невозмущенного состояния, вызываемые совместным действием ветра и стока рек, достигаются в Днепровском лимане (8 – 12 см зимой и 3 – 9 см летом). Величины максимальных сгонов составляют – 5 см зимой и – 4 см летом.

За счет мелкого шага сетки и уточненного рельефа дна удалось воспроизвести мезомасштабные вихри и струи. В зимний период на верхних горизонтах формируются вихри в Каркинитском заливе, антициклонический вихрь на севере и циклонические вихревые образования в центральной части области. В летний период в верхнем слое наблюдаются элементы вихревого движения на севере области. Для обоих сезонов отмечено усиление течений вблизи мелководных районов по сравнению с результатами, полученными с более грубым разрешением.

Показано, что зимняя циркуляция определяется в основном воздействием ветра, а летом преобладающее влияние на формирование полей течений оказывает градиент плотности.

Низкая температура воздуха и преобладание северных ветров зимой и интенсивный прогрев поверхностного слоя воды летом являются причиной большого перепада между летними и зимними значениями температуры в слое воды 0 – 30 м. Например, на горизонте 10 м разница между минимальными значениями температуры составляет 12 – 17°C, между максимальными значениями — 16 – 17°C.

Полученные результаты демонстрируют, что численная гидродинамическая модель МГИ НАН Украины адаптирована для шельфовой зоны Черного

моря, что позволит ее использовать как основу для программного комплекса по обработке данных прибрежных гидрологических съемок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андросович А.И., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Численная модель и расчет циркуляции вод северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 1994. – № 5. – С. 28 – 42.
2. *Алаев В.Г.* Исследование сезонной изменчивости гидродинамических полей в северо-западной части Черного моря на основе изопикнической модели // Там же. – 2000. – № 6. – С. 5 – 17.
3. *Иванов В.А., Рябцев Ю.Н.* Анализ течений на северо-западном шельфе Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2002. – Вып. 1(16). – С. 8 – 21.
4. *Тучковенко Ю.С.* Математическая модель формирования термохалинной структуры и циркуляции вод в лиманах, приустьевых и шельфовых областях северо-западной части Черного моря // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. – Вып. 9. – С. 138 – 154.
5. *Алексеев Д.В., Иванов В.А., Иванча Е.В. и др.* Моделирование эволюции волновых полей в районе северо-западного шельфа Черного моря при прохождении циклона // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 1. – С. 42 – 54.
6. *Демьшев С.Г., Евстигнеева Н.А.* Численная баротропная модель течений на шельфе Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – Вып. 19. – С. 78 – 86.
7. *Евстигнеева Н.А.* Расчет гидрофизических полей в зимний период в северо-западной части Черного моря // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 22. – С. 31 – 39.
8. *Демьшев С.Г., Евстигнеева Н.А.* Численные эксперименты по расчету полей температуры и солености в зимний период на северо-западном шельфе Черного моря // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – С. 111 – 115.
9. *Демьшев С.Г., Кортаев Г.К.* Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН, 1992. – С. 163 – 231.
10. *Яковлев Н.Г.* Численная модель и предварительные результаты расчетов по воспроизведению летней циркуляции вод Карского моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1996. – 32, № 5. – С. 714 – 723.
11. *Демьшев С.Г., Кортаев Г.К., Кныш В.В.* Моделирование сезонной изменчивости температурного режима верхнего деятельного слоя Черного моря // Там же. – 2004. – 40, № 2. – С. 259 – 270.
12. *Демьшев С.Г., Иванов В.А., Маркова Н.В. и др.* Построение поля течений в Черном море на основе вихреразрешающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солености // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – Вып. 15. – С. 215 – 226.
13. *Orlanski I.* A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows // J. Comput. Phys. – 1976. – 21, № 3. – P. 251 – 269.
14. *Kantha L., Blumberg A., Mellor G.* Computing phase speeds at open boundaries // J. Hydraul. Engineer. – 1990. – 116. – P. 592 – 597.
15. *Pacanowski R.C., Philander S.G.H.* Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – 11, № 11. – P. 1443 – 1451.

16. *Staneva J.V., Stanev E.V.* Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black Sea // *Oceanologia*. – 1998. – 21, № 3. – P. 383 – 417.
17. *Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К.* Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихререзающей модели циркуляции Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. – 2004. – № 1. – С. 52 – 68.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: naevstigneeva@yandex.ru

Материал поступил
в редакцию 24.01.11
После доработки 12.05.11

АНОТАЦІЯ Аналізуються результати двох експериментів, в яких дослідження циркуляції проводяться для січня – лютого і липня – серпня. Показано, що зимова циркуляція визначається в основному дією вітру, а влітку переважаючий вплив на формування полів течій надає градієнт густини.

Найбільші відхилення рівня моря від незбуреного стану для двох сезонів отримані при дії північно-східного вітру. Величини максимальних нагонів складають 12 см взимку і 9 см влітку, величини максимальних згонів рівні – 5 см взимку і – 4 см влітку.

За рахунок дрібного кроку сітки та уточненого рельєфу дна описані розподіли течій на мілководді, отримані елементи вихрового руху, не відтворені моделлю з крупним кроком, відмічено посилення течій поблизу мілководних районів в порівнянні з попередніми розрахунками, проведеними на грубішій сітці.

Ключові слова: чисельне моделювання, північно-західний шельф, високе просторове розділення, кліматичні поля, мезомасштабні вихори.

ABSTRACT Results of two experiments on studying circulation in January – February and July – August are analyzed. It is shown that winter circulation is conditioned mainly by wind influence, and in summer formation of current fields are predominantly influenced by density gradient.

Maximum values of sea level deviations from the undisturbed state for two seasons are obtained under the action of the northeastern wind. The values of maximum run-ups amount to 12 cm in winter and 9 cm in summer; the values of the maximum set-downs are –5 cm in winter and –4 cm in summer.

Due to a small step of the grid and the specified bottom relief, currents' distribution on the shoal are described, the elements of eddy motion which are not reproduced by the model with a big step are obtained. Currents' intensification nearby shallow water regions, as compared with previous calculations carried out on a coarser grid, is noted.

Keywords: numerical simulation, northwestern shelf, high spatial resolution, climatic fields, mesoscale eddies.