

# ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО РАСЧЕТУ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕНОСТИ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

С.Г. Демышев, Н.А. Евстигнеева

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

Приводятся результаты численного расчета термохалинных полей с разрешением 1,6 км в северо-западной части Черного моря в период с 15 января по 15 февраля. На поверхности моря задаются поля климатического ветра, потоки тепла, осадки и испарения; учитывается сток рек. Проводится анализ влияния величин фазовых скоростей волн на изменение полей температуры у открытой границы.

**Введение.** Для расчета прибрежной циркуляции вод северо-западного шельфа Черного моря существует несколько моделей [1–3]. В [1] для зимне-весеннего сезона исследовались ветровые течения и течения, обусловленные стоком рек. В [2] с использованием многослойной квазизопикнической модели проведены адаптационные расчеты гидрофизических полей на шельфе. В [3] описана численная гидродинамическая модель прибрежной циркуляции вод, адаптированная к условиям Одесского и Приднепровско-Бугского районов.

Основной трудностью при решении подобных задач является восстановление граничных условий на открытой жидкой границе. В перечисленных работах, если поток тепла (солености) направлен в область, задаются значения температуры и солености, характерные для открытого моря, иначе значения  $T$  ( $S$ ), рассчитываются различными способами.

Целью работы является расчет термохалинных полей в зимний период с высоким разрешением на шельфе Черного моря с помощью модифицированной термогидродинамической модели МГИ НАНУ [4], а также тестирование различных численных схем для расчета фазо-

вой скорости при задании на открытой границе условий излучения с целью минимизации ошибок при расчете величин  $T$  и  $S$ .

**Постановка задачи.** Уравнения модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды имеют вид [5] (ось  $z$  направлена вертикально вниз). В уравнениях переноса тепла и соли [5] слагаемые, обеспечивающие ассимиляцию данных наблюдений, не учитываются. Используется гармоническое представление турбулентных слагаемых в уравнениях движения и переноса тепла и соли.

На поверхности моря задается линеаризованное кинематическое условие.

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

$$v_V u_z = -\tau^x, \quad v_V v_z = -\tau^y, \quad \kappa^V T_z = Q^T,$$

$$\kappa^V S_z = (Ev - Pr) \cdot S_0 + \beta \cdot (S^{cl} - S_0).$$

Здесь  $Ev$  – скорость испарения воды с поверхности моря,  $Pr$  – скорость выпадения осадков,  $\tau^x, \tau^y$  – составляющие компоненты напряжения трения ветра,  $S^{cl}$  – климатическая соленость,  $S_0$  – соленость на поверхности моря,  $Q^T$  – потоки тепла,  $\beta$  – заданный параметр.

На дне выполняются условия

$$u = v = w = 0, \quad T_z = 0, \quad S_z = 0.$$

На твердых боковых стенках используются следующие условия:

для меридиональных участков границы

$$u = 0, \quad v_x = 0, \quad T_x = 0, \quad S_x = 0,$$

для зональных участков границы

$$v = 0, \quad u_y = 0, \quad T_y = 0, \quad S_y = 0.$$

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. Для января – февраля задавалась значения  $4,5^\circ\text{C}$  и  $7\%$  соответственно.

Поставим на жидкой границе следующие условия для  $u, v, T$  и  $S$ : для участков открытой границы, где вода втекает, задаются компоненты скорости, температура, соленость

$$u|_{\Gamma} = u^k, \quad v|_{\Gamma} = v^k, \quad T|_{\Gamma} = T^k, \quad S|_{\Gamma} = S^k.$$

Для задания граничных условий на втоке жидкости в область взяты полученные в [5] поля течений, температуры, солености для квазипериодического режима кинетической энергии, рассчитанные по модели для всего моря с шагом 5 км. Из 45 горизонтов использовались восемь: 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 на каждый момент времени.

Там, где вода вытекает, для компонент скорости задаются условия свободного протекания  $\partial u / \partial n = 0$ ,  $\partial v / \partial n = 0$ .

Для участков открытой границы, где вода вытекает, для температуры и солености решается известное уравнение [6]

$$\partial \phi / \partial t + C \partial \phi / \partial n = 0,$$

где  $\phi$  – некоторая переменная ( $T$  или  $S$ ),  $C$  – скорость переноса возмущений. Корректный расчет фазовой скорости важен при использовании радиационных условий [7].

Рассматриваемая область шельфа имеет открытую южную границу, которая совпадает с полосой, соответствующей по оси  $y$  индексам  $j = 1, 2$ . Таким образом, численные расчеты начинаются с приграничной области  $j = 3$ .

В эксперименте 1 для температуры и солености на участках открытой границы, где жидкость вытекает, задавались условия свободного протекания  $\partial T / \partial n = 0$ ,  $\partial S / \partial n = 0$ . В экспериментах 2 – 5 при вытекании жидкости из области для  $T$  и  $S$  ставились условия излучения, причем скорость переноса возмущений рассчитывалась следующим образом:

$$C_2 = -(\phi_3^{n+1} - \phi_3^n) / (\phi_3^{n+1} + \phi_4^{n-1} - 2\phi_4^n)$$

(эксперимент 2, неявная схема Орланского);  $C_3 = -(\phi_3^{n+1} - \phi_3^n) / (\phi_3^n - \phi_4^n)$  (эксперимент 3, явная направленная вперед схема);

$$C_4 = -(\phi_3^{n+1} - \phi_3^n) / (\phi_2^n - \phi_4^n)$$

(эксперимент 4, центральная явная схема);  $C_5 = -(\phi_3^{n+1} - \phi_3^n) / (\phi_3^{n+1} - \phi_4^{n+1})$ . (эксперимент 5, неявная направленная вперед схема). Для расчета  $C$  была использована методика, описанная в [6]:

$$C = \Delta y / \Delta t, \text{ при } -\phi_i / \phi_y > \Delta y / \Delta t,$$

$$C = -\phi_i / \phi_y \text{ при } 0 < -\phi_i / \phi_y < \Delta y / \Delta t.$$

Выражение для расчета  $T(S)$  на  $n+1$  шаге по времени имеет вид [6]

$$\phi_3^{n+1} = \frac{(1 - (\Delta t / \Delta y) \cdot C)}{(1 + (\Delta t / \Delta y) \cdot C)} \cdot \phi_3^n + \frac{2(\Delta t / \Delta y) \cdot C}{(1 + (\Delta t / \Delta y) \cdot C)} \cdot \phi_2^n.$$

Для согласования начальных полей масс и течений был проведен адаптационный расчет с целью геострофического приспособления поля течений к полю плотности и получению начальных полей для экспериментов.

Численная схема модели подробно описана в [4, 8] с указанием проведенных преобразований, обеспечивающих учет задания скоростей на жидкой части границы.

**Параметры численной модели.** Рассматривалась 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 по оси  $x$  – 1,66 км, по оси  $y$  – 1,56 км. Шаг по времени 30 с. По вертикали горизонтальная скорость течений, температура и соленость рассчитывались на 44 горизонтах: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; ...; 32; 34; ...; 49 м. Вертикальная компонента скорости вычислялась между горизонтами.

Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали вычислялись с известной аппроксимацией Филандера – Пакановского [9]. В результате серии численных экспериментов были подобраны максимальные значения для коэффициентов.

Для коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали выбраны следующие значения

$$v_H = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2 / \text{с}, \kappa_H = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2 / \text{с}.$$

Для выбранного периода времени 15 января – 15 февраля синоптическая обстановка обуславливает преобладание северных и северо-восточных ветров 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.

При расчетах учитывался сток трех рек – Днепра, Днестра и Южного Буга.

**Поля температуры.** По данным наблюдений в январе – феврале температура изменяется от  $-0,5$  –  $+1,0^\circ$  у берегов

до  $+7^{\circ}$  в открытой части моря. По результатам расчета в период с 15 января по 15 февраля минимальные значения температуры по всей области не превышают  $0^{\circ}\text{C}$ , а максимальные значения уменьшаются от 7,2 до  $5,6^{\circ}\text{C}$ .

На изменение температуры воды на мелководье оказывают влияние солнечные явления и сток рек. На первый расчетный день (рис. 1а, изотермы проведены через  $0,5^{\circ}\text{C}$ ) в центральной части области у открытой границы температура составляет  $6 - 6,5^{\circ}\text{C}$ , в мелководных заливах и лиманах температура меняется от 0,3 до  $4^{\circ}\text{C}$ . Под действием северных ветров и потоков тепла происходит выхолаживание мелководных районов. В последние расчетные дни (рис. 1б) температура в центральной части области не превышает  $5^{\circ}\text{C}$ , в мелководных заливах и лиманах температура воды – нулевая. Получено соответствие между рассчитанными полями и результатами, полученными в [2].

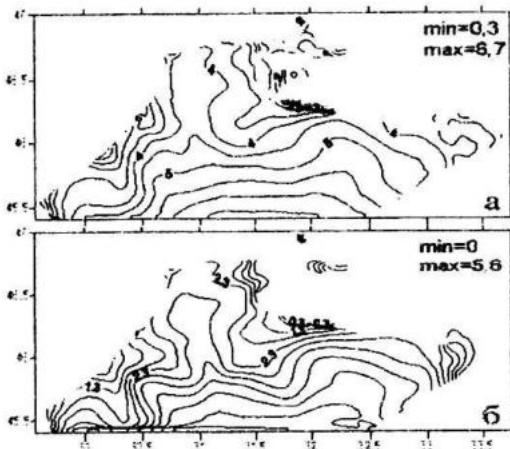


Рис. 1. Поля температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) на верхнем горизонте, полученные в эксперименте 1:  
а – 16 января, б – 12 февраля

Ошибки при задании граничных условий на открытых боковых границах, распространяющиеся в область, имеют большое воздействие на развитие процессов внутри области [8]. Рассмотрим полосу области, включающую открытую границу, чтобы оценить влияние условий на открытой границе на формирование поля температуры.

В качестве иллюстраций приведем результаты расчетов для горизонта 3 м на 15 расчетные сутки (30 января) (рис. 2, изотермы проведены через  $0,2^{\circ}\text{C}$ ), и для

горизонта 0,5 м на 25 расчетные сутки (9 февраля), когда под влиянием северного ветра вода вытекает через открытую границу.

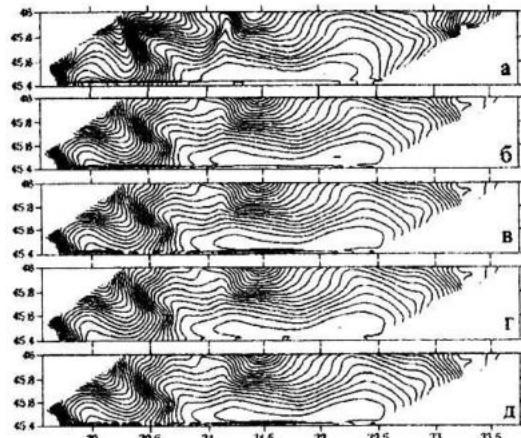


Рис. 2. Поля температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) 30 января на горизонте 3 м: а – в эксперименте 1; б – в эксперименте 2; в – в эксперименте 3; г – в эксперименте 4; д – в эксперименте 5

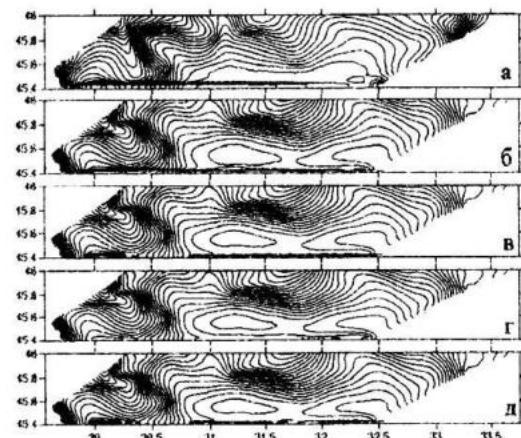


Рис. 3. Поля температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) 9 февраля на горизонте 0,5 м: а – в эксперименте 1; б – в эксперименте 2; в – в эксперименте 3; г – в эксперименте 4; д – в эксперименте 5

Анализируя поля температуры вблизи открытой границы, представленные на рис. 2 – 3, отметим, что минимальные искажения значений температуры при прохождении открытой границы получены в эксперименте 4 при использовании явной центральной схемы.

**Поля солености.** По данным наблюдений зимой соленость поверхностного слоя моря в северо-западной части моря составляет около 18 ‰, по мере приближения к берегам она уменьшается до 16 ‰; в районе устьев рек соленость понижается до 5 – 6 ‰. В период с 15 января по 15 февраля по результатам расчетов

максимальная соленость в рассматриваемой области изменяется от 18,09 до 18,15 ‰, минимальная соленость изменяется от 8,2 до 8,15 ‰.

На рис. 4 представлено распределение солености на последний расчетный день. За месяц структура поля осталась практически неизменной, за исключением некоторого уменьшения области распространения пресных вод за счет замерзания рек. Поступление пресной воды из рек обуславливает низкую соленость вблизи устьев рек (7–15 ‰). Максимальные значения поверхностной солености наблюдаются у южной открытой границы, что обусловлено поступлением более соленных и относительно теплых вод с района свала глубин. Наблюдается соответствие с результатами, полученными в [2].

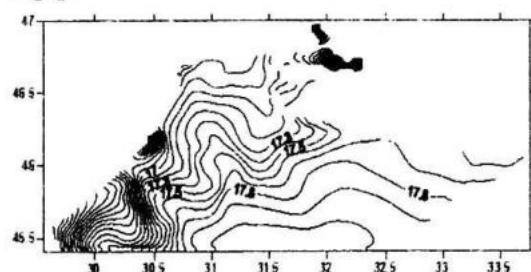


Рис. 4. Поле солености (%) на верхнем горизонте, полученные в эксперименте 1

**Заключение.** Для зимнего периода получены поля температуры и солености с высоким разрешением с помощью модифицированной трехмерной бароклинной модели Черного моря.

За счет мелкого шага сетки и уточненного рельефа дна проанализированы изменения температуры и солености в мелководных заливах, лиманах и устьях рек.

Среди четырех различных численных схем для расчета скорости переноса возмущений на открытой границе центральная явная схема показала наилучшие результаты. В дальнейшем эта схема будет использоваться в модели с ассимиляцией данных наблюдений температуры и солености для обработки гидрологических съемок на шельфе.

## 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 // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 6. – С. 5 – 17.
3. Тучковенко Ю.С. Математическая модель формирования термохалинной структуры и циркуляции вод в лиманах, приусадебных и шельфовых областях северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2003. – № 9. – С. 138 – 154.
4. Демышев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке С // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: Изд. ИВМ, 1992. – С. 163 – 231.
5. Демышев С.Г., Иванов В.А., Маркова Н.В., Черкасов Л.В. 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. – 2007. – № 15. – С. 215 – 226.
6. Orlanski I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows // J. Comput. Phys. – 1976. – 21. – P.251 – 269.
7. Kantha L, Blumberg A., Mellor G. Computing phase speeds at open boundaries // Journal of Hydraulic Engineering, – 1990. – Vol.116. – Р. 592 – 597.
8. Демышев С.Г., Евстигнеева Н.А. Численная баротропная модель течений на шельфе Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2009. – № 19. – С. 78 – 86.
9. Pacanowski R.C., Philander S.G.H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – № 11. – Р. 1443 – 1451.