

**РАСЧЕТ ТЕРМОХАЛИННЫХ  
ПОЛЕЙ НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ  
ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ  
В ОКТЯБРЕ 2007 ГОДА  
С АССИМИЛЯЦИЕЙ ДАННЫХ  
НАБЛЮДЕНИЙ**

*Н.А. Евстигнеева*

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

*На основе гидродинамической модели, включающей нелинейные уравнения движения, уравнения адвекции тепла и соли, и процедуры ассимиляции проведен численный эксперимент с усвоением данных наблюдений гидрологической съемки октября 2007 года. Выполнено сравнение результатов моделирования полей температуры и солёности с гидродинамическим прогнозом полей.*

**Введение.** Прибрежная зона моря имеет важнейшее значение в жизнедеятельности людей, поэтому численное моделирование гидродинамических процессов в этой зоне приобретает большое значение для решения прикладных задач. Гидродинамическая модель для расчета прибрежной циркуляции должна учитывать влияние стока рек, обмен через жидкую границу, описывать течения в мелководных заливах и лиманах. Для воспроизведения реальной ситуации важно также усваивать в модели поступающую гидрологическую информацию.

В [1, 2] была проведена адаптация гидродинамической модели МГИ НАНУ [3] для расчета течений с высоким разрешением. С 2007 года Морской гидрофизический институт НАН Украины возобновил экспедиционные исследования на НИС "Эксперимент", в северо-западной части Черного моря, в задачи которых входит получение экспериментальных данных о распределении гидрологических характеристик.

В настоящей работе адаптированная к условиям северо-западного шельфа модель МГИ с подключенной процедурой ассимиляции данных измерений температуры и солёности используется для восстановления термохалинных полей в октябре 2007 года. Проводится

сравнение модельных результатов с данными наблюдений о вертикальном и пространственном распределении температуры и солёности, изучается влияние усвоения данных наблюдений на результаты расчета.

**Постановка задачи.** Уравнения модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды имеют вид [3]. Используется гармоническое представление турбулентных слагаемых в уравнениях движения и переноса тепла и соли. Краевые условия на поверхности, на дне, на твердых боковых стенках и на участках границы, где втекают реки, подробно описаны в [2].

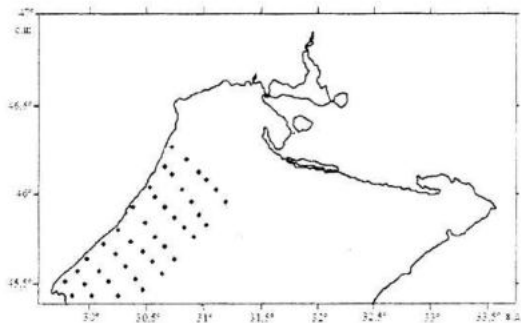
Спецификой данной задачи является наличие южной открытой границы. Для задания граничных условий на жидкой границе области использовались поля течений, температуры, солёности, полученные по модели [3] для всего моря на горизонтальной сетке  $5 \times 5$  км в рамках проекта «Оперативная океанография» [4]. Значения для  $u$ ,  $v$ ,  $T$  и  $S$ , рассчитанные для горизонтов: 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40 м, соответствующие широте жидкой границы, были линейно проинтерполированы на выбранную сетку на каждый момент времени. Из анализа знаков величин  $v$  ставились следующие граничные условия: для участков открытой границы, где вода втекает ( $v > 0$ ), задаются компоненты скорости, температура, солёность; 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 солёности на открытой границе задаются условия Орланского [5].

Начальные поля для  $u$ ,  $v$ ,  $\zeta$ ,  $T$  и  $S$  были получены на основе расчета по модели [3] на сетке  $5 \times 5$  км в рамках проекта «Оперативная океанография» [4]. Начальный момент времени соответствовал 14 октября 2007 года.

Численная схема модели подробно описана в [1, 2] с указанием проведенных преобразований, обеспечивающих учет задания скоростей, температуры и солёности на жидкой части границы.

**Параметры численной модели.** Рассматривается область Черного моря, ограниченная  $45,5^\circ$  с.ш. и расположен-

ная между 29,5 и 33,5° в.д., для которой максимальная глубина не превышает 50 м (рис. 1). Численные эксперименты проводились с разрешением 1,66 км по оси  $x$ , 1,56 км по оси  $y$ . Шаг по времени 30 с. Общее время интегрирования уравнений модели – 5 дней (14 – 18 октября 2007 года). По вертикали горизонтальные составляющие скорости течений, температура и соленость рассчитывались для 44 горизонтов: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; ...; 32; 34; ...; 49 м.



Р и с. 1. Схема станций, выполненных на НИС "Эксперимент" 15 – 17 октября 2007 года

Для коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали выбраны значения  $\nu_H = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2 / \text{с}$ ,  $\kappa_H = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2 / \text{с}$ . Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали рассчитывались с аппроксимацией Филандера – Пакановского [6].

На поверхности моря каждые шесть часов задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, осадки и испарение, полученные в рамках проекта [4] и линейно проинтерполированные на выбранную сетку.

В период времени 14 – 18 октября преобладают северо-западные, юго-западные и западные ветры со средней скоростью 6 – 7 м/с. Сила ветра максимальна 14 и 15 октября (10 – 11 м/с).

При расчетах учитывался сток трех рек – Днепра, Днестра и Южного Буга. Температура в устьях рек задавалась 16,2 °С, соленость воды – 1 ‰.

Для реализации процедуры усвоения данных натурных наблюдений использовалась методика последовательной оптимальной интерполяции, подробно описанная в работах [7, 8].

**Сопоставление результатов гидродинамического прогноза (эксперимент П) с данными наблюдений.** При сравнении рассчитанных вертикальных профилей температуры и солености с данными наблюдений, имеющимися в банке данных МГИ НАНУ [9] для октября 2007 года, были выявлены следующие недостатки модельных полей  $T$  и  $S$  в слое воды 0 – 30 м:

- недостаточная распресненность вод не только в приустьевых участках полигона, но по всему северо-западному шельфу в целом (разница между модельными значениями и данными наблюдений на верхних горизонтах составляет 2 – 3 ‰, на горизонте 30 м – 1 ‰);

- отсутствие в модельных профилях  $T$  и  $S$  слоя скачка. На всех глубоководных станциях, согласно данным наблюдений, четко прослеживается слой скачка температуры и солености (перепад в значениях температуры составляет 6 – 9 °С, в значениях солености – 0,5 – 1 ‰).

**Корректирование начальных полей и данных на открытой границе.** Проведем модификацию начальных полей температуры и солености для последующего их использования в эксперименте с усвоением данных.

Для устранения первого недостатка в начальных полях  $S$  на каждом горизонте  $k$  до 30 м рассчитывались величины

$$\delta S_k = \sum_1^N (S_{\text{mod}} - S_{\text{data}}) / N \quad (N - \text{число станций на } k\text{-м горизонте; } S^{\text{mod}} \text{ и } S^{\text{data}} - \text{модельная и наблюдаемая соленость),}$$

а затем на рассматриваемых горизонтах производилось вычитание  $S_{\text{mod}} - \delta S_k$ .

Для воспроизведения слоя скачка в вертикальных профилях  $T$  и  $S$  для горизонтов 20 – 31 м была проведена процедура последовательной оптимальной интерполяции.

При неполном покрытии СЗШ данными измерений, что имеет место в данном случае, возникают пограничные слои, разделяющие область ассимиляции и область, где усвоение не проводилось. Поэтому после оптимальной интерполяции для преодоления этого недостатка использовалась процедура сглаживания,

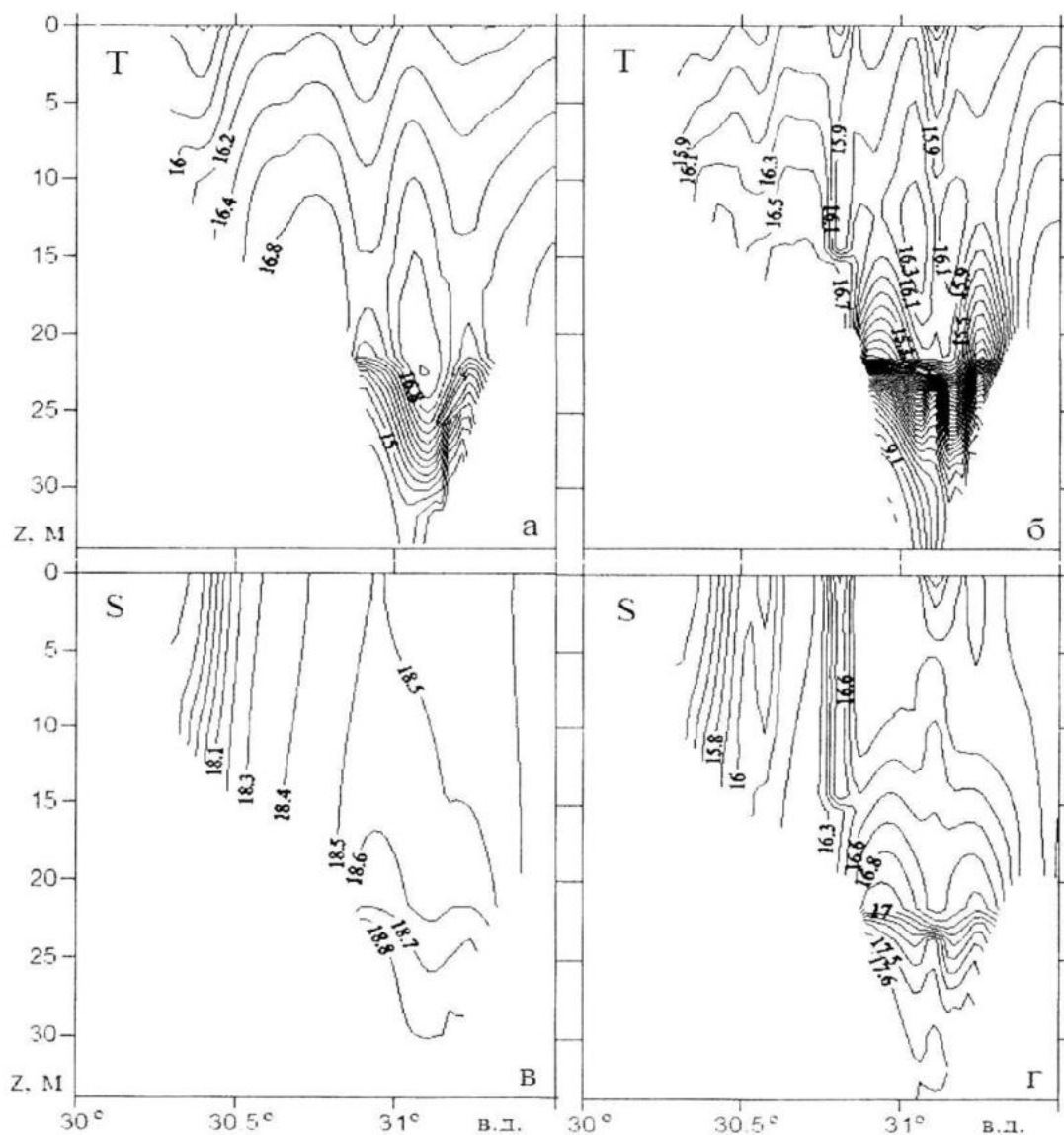
которая состояла из нескольких шагов, описанных в [10]. Далее для согласования поля плотности и поля течений была проведена процедура геострофического согласования. Полученные поля для  $u$ ,  $v$ ,  $\zeta$ ,  $T$  и  $S$ , принимались за начальные поля для эксперимента с усвоением данных натуральных наблюдений (эксперимент II).

Были внесены соответствующие изменения в данные  $T$  и  $S$  для использования при задании граничных условий на открытой границе области.

**Сравнение результатов численных экспериментов I и II.** На рис. 2а и 2б представлены вертикальные сечения в поле температуры вдоль  $46^\circ$  с.ш. для 17

октября (четвертого расчетного дня), рассчитанные в экспериментах I и II.

Температура поверхностного слоя воды в эксперименте I (рис. 2а) увеличивается с запада на восток от  $15,8$  до  $16,2$  °C. Максимальные значения  $17 - 17,2$  °C достигаются в слое воды  $15 - 24$  м, воды с минимальной температурой  $14 - 15$  °C располагаются на глубине ниже  $24$  м. Поверхностные воды в эксперименте с усвоением данных (рис. 2б) являются более охлажденными ( $15,5 - 15,7$  °C) по сравнению с результатами эксперимента I.



Р и с. 2. Вертикальные сечения вдоль  $46^\circ$  с. ш. 17 октября 2007 года: а – в поле температуры в эксперименте I; б – в поле температуры в эксперименте II; в – в поле солёности в эксперименте I; г – в поле солёности в эксперименте II

Максимальные значения  $T$  в эксперименте II (16,5 – 16,7 °C) достигаются в слое воды 10 – 20 м, при изменении глубины от 20 до 34 м температура уменьшается от 15 до 8,5 °C.

На рис. 2в и 2г представлены вертикальные сечения в поле солёности вдоль 46° с. ш. для 17 октября, полученные по модели без учета и с учетом ассимиляции данных. Минимальная солёность, рассчитанная в эксперименте I (рис. 2в), наблюдается в западной части области (17,5 – 17,7 ‰). В верхнем 20-метровом слое солёность по вертикали меняется незначительно, а при изменении глубины от 20 до 34 м солёность увеличивается от 18,6 до 18,8 ‰. В эксперименте II воды с минимальной солёностью 15,5 – 16 ‰ располагаются в верхнем 15-метровом слое воды между 30,3 и 30,5° в.д., восточнее 30,5° в.д. при изменении глубины от 1 до 34 м солёность увеличивается от 16,3 до 17,6 ‰. Отметим качественные изменения в вертикальной структуре полей (воды в верхнем слое моря являются более стратифицированными – применение процедуры ассимиляции приводит к наличию больших градиентов в полях температуры и солёности) на рис. 2б и рис. 2г по сравнению с гидродинамическим прогнозом (рис. 2а, рис. 2в).

**Заключение.** Учет натуральных данных позволил воспроизвести слой скачка в вертикальных профилях температуры и солёности и распределённость вод, близкие к наблюдаемым. Ассимиляция в гидродинамической модели данных наблюдений привела к появлению в полях температуры областей с более холодной водой относительно гидродинамического прогноза, в полях солёности сформировались более распределённые воды.

Показано, что усвоение данных наблюдений приводит к наличию больших градиентов  $T$  и  $S$  по сравнению с гидродинамическим прогнозом и к качественным изменениям в структуре полей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. – 2009. – 19. – С. 78 – 86.
2. Евстигнеева Н.А. Расчет гидрофизических полей в зимний период в северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2010. – 22. – С. 31 – 39.
3. Демьшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке  $C$  // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: Изд. ИВМ. – 1992. – С. 163 – 231.
4. Коротаев Г.К., Еремеев В.Н. Введение в оперативную океанографию. – Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2006. – 382 с.
5. Orlanski I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows // J. Comput. Phys. – 1976. – 21. – P. 251 – 269.
6. Pacanowski R.C., Philander S.G.H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // J. Physical Oceanography. – 1981. – № 11. – P. 1443 – 1451.
7. Гандин Л.С., Каган П.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 359 с.
8. Кныш В.В., Моисеенко В.А., Саркисян А.С. и др. Комплексное использование измерений на гидрофизических полигонах океана в четырехмерном анализе // Докл. АН СССР. – 1970. – 252, № 4. – С. 832 – 836.
9. Суворов А.М., Андрющенко Е.Г., Годин Е.А. и др. Банк океанологических данных МГИ НАНУ: содержание и структура баз данных, система управления базами данных // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАНУ, 2003. – С. 130 – 137.
10. Ratner Yu., Grigoriev A., Dorofeev V. et al. Pilot experiment on operational functioning of the Black Sea Nowcasting/Forecasting System. – Международная научная конференция «Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей. Крым, Донузлав, 2005. – С. 92.