

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО РАСЧЕТУ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕНОСТИ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ БЕЗ УЧЕТА И С УЧЕТОМ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

H.A. Евстигнеева

Морской гидрофизический институт
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: naevstigneeva@yandex.ru

На основе гидродинамической модели, включающей нелинейные уравнения движения, уравнения адvectionи тепла и соли проведены численные эксперименты по расчету гидрофизических полей в октябре 2007 г. на северо-западном шельфе Черного моря. Выполнено сравнение результатов экспериментов без учета и с учетом ассилияции данных, приведены количественные и качественные отличия в термохалинных полях.

Введение. Развитие туризма, строительство прибрежных и портовых сооружений, добыча полезных ископаемых делают актуальными вопросы экологического мониторинга, охраны и рационального использования природных ресурсов прибрежной зоны. Решение этих вопросов неразрывно связано с задачами исследования динамики вод в шельфовой области, их перемешивания и обмена с открытыми частями моря.

В связи с необходимостью знания особенностей прибрежной циркуляции Черного моря гидродинамическая модель Морского гидрофизического института (МГИ) [1] была адаптирована к условиям шельфовой зоны [2, 3]. При этом учитывалось, что для расчета течений на шельфе модель должна иметь высокое пространственное разрешение, учитывать более детальное представление рельефа дна, корректно описывать влияние стока рек и обмен через открытые границы, усваивать поступающую гидрологическую информацию.

В настоящей работе адаптированная к условиям северо-западного шельфа модель МГИ используется для восстановления термохалинных полей в октябре 2007 г. Проводится сопоставление

модельных расчетов со всеми доступными данными наблюдений и исследуется роль ассилияции данных измерений температуры и солености при формировании полей температуры и солености.

Постановка задачи и параметры модели. Уравнения модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды имеют вид [1]. 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].

Для задания граничных условий на южной жидкой границе области использовались поля течений, температуры, солености, полученные по модели [1] для всего моря на сетке 5×5 км в рамках проекта «Оперативная океанография» [4]. Из анализа знаков величин и ставились следующие граничные условия: для участков открытой границы, где вода втекает ($v > 0$), задаются компоненты скорости, температура, соленость; 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 задаются условия излучения.

Начальные поля были получены на основе расчета по модели [1] на сетке 5×5 км в рамках проекта «Оперативная океанография» [4]. Начальный расчетный момент времени соответствовал 14 октября 2007 г.

Рассматривалась область Черного моря, ограниченная $45,5^\circ$ с.ш. и расположенная между $29,5$ и $33,5^\circ$ в.д. (рис. 1). Численные эксперименты проводились с горизонтальным разрешением $\sim 1,6$ км. Шаг по времени составлял 30 с. Общее время интегрирования уравнений модели – 4 дня (с 14 по 17 октября 2007 г. – период проведения полигонной съемки).

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.

На поверхности моря задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, осадки и испарение, полученные в рамках проекта [4] и линейно проинтерполированные на выбранную сетку. При расчетах учитывалась река. Для реализации процедуры усвоения данных натурных наблюдений использовалась методика последовательной оптимальной интерполяции, подробно описанная в работах [5, 6].

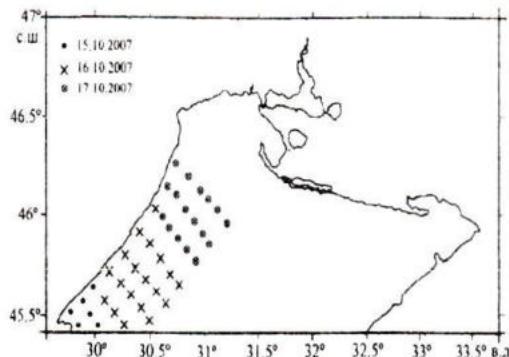


Рис. 1. Схема станций, выполненных на НИС "Эксперимент" 15 – 17 октября 2007 г.

Сравнение результатов численных экспериментов. При сопоставлении результатов расчета без ассимиляции данных температуры и солености (эксперимент 1) с данными наблюдений были выявлены следующие отличия: – наличие более соленой воды по всему северо-западному шельфу (разница между модельными значениями и данными наблюдений на верхних горизонтах составляла 2%, на горизонте 30 м – 1%); – отсутствие в модельных профилях T и S слоя скачка, который четко прослеживался на всех станциях согласно данным измерений. С целью уменьшения ошибки в начальных полях для последующих экспериментов была проведена процедура коррекции исходных термохалинных полей с использованием данных наблюдений, подробно описанная в [6].

Таким образом, на основе гидродинамической модели с указанными выше параметрами проведено три численных эксперимента: расчет гидрофизических полей без учета данных наблюдений с начальными полями, рассчитанными по модели для всего моря с шагом 5 км в рамках проекта [4] (эксперимент 1), расчет гидрофизических полей с модифи-

цированными начальными полями без применения процедуры ассимиляции данных в течение расчета (эксперимент 2), расчет гидрофизических полей с модифицированными начальными полями с ассимиляцией данных наблюдений 1 раз в сутки (эксперимент 3).

В процессе интегрирования уравнений модели в эксперименте 3 проводился расчет средних (δ_T^n и δ_S^n) и среднеквадратических (σ_T и σ_S) ошибок оценок полей T , S на каждый момент усвоения для всех горизонтов k , где имеются данные измерений:

$$\delta_T^n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |T_{mod}^n - T_{data}^n|,$$

$$\delta_S^n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_{mod}^n - S_{data}^n|,$$

$$\sigma_T = \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_{mod}^n - T_{data}^n - \delta_T^n)^2 \right\}^{1/2},$$

$$\sigma_S = \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_{mod}^n - S_{data}^n - \delta_S^n)^2 \right\}^{1/2},$$

где N – общее число станций на k -м горизонте; T_{mod}^n и S_{mod}^n – рассчитанные значения по модели на n -ые сутки; T_{data}^n и S_{data}^n – данные наблюдений, отнесенные к одному моменту времени.

В табл. 1 и 2 представлены модули средних и среднеквадратических ошибок оценки полей температуры и солености на горизонтах 1, 5, 15, 24, 28 м для трех дней соответственно. В последних столбцах таблиц приведены значения модулей ошибок термохалинных полей, рассчитанные в эксперименте 2. Анализируя данные, представленные в табл. 1 и 2, отметим, что наибольшие значения ошибок оценки полей температуры δ_T^n и σ_T наблюдались в слое скачка 20 – 24 м, наибольшие значения ошибок оценки полей солености δ_S^n и σ_S – в верхнем слое воды. Таким образом, применение процедуры ассимиляции данных позволяет более точно воспроизвести структуру пикноклина и распространение опресненных речных вод вдоль берега.

Со временем для δ_T^n , σ_T , δ_S^n и σ_S на всех горизонтах имеет место тренд к убыванию, что свидетельствует об эф-

фективности применения процедуры ассилиации. Сравнивая значения ошибок оценки полей температуры и солености, представленные в предпоследних и последних столбцах таблиц, отметим, что применение процедуры ассилиации данных в течение расчета позволяет уменьшить модули значений примерно в 2 раза. Также было проведено сравне-

ние рассчитанных полей поверхностной температуры с доступными данными измерений, отнесенных к одному моменту времени, и спутниковыми изображениями температуры NOAA (разрешение 1 км). На рис. 2 представлены модельные поля для трех экспериментов, полученные на последний день расчетов.

Таблица 1

Значения δ_T^n и σ_T на различных горизонтах 15, 16 и 17 октября 2007 г.

Глубина (м)		15.10.2007	16.10.2007	17.10.2007	18.10.2007
1	δ_T^n	0,65	0,35	0,24	0,51
	σ_T	2,66	1,41	1,03	2,11
5	δ_T^n	0,69	0,25	0,19	0,44
	σ_T	2,81	1,03	0,84	1,86
10	δ_T^n	0,65	0,23	0,22	0,44
	σ_T	2,58	0,99	0,91	1,82
15	δ_T^n	0,77	0,36	0,23	0,54
	σ_T	2,80	1,31	0,89	2,06
20	δ_T^n	0,88	0,58	0,41	1,09
	σ_T	2,21	1,41	1,19	2,78
24	δ_T^n	1,73	0,94	0,75	2,28
	σ_T	4,69	2,25	2,44	4,41
28	δ_T^n	0,54	0,51	0,11	0,44
	σ_T	0,92	0,59	0,14	0,72

Таблица 2

Таблица 2 – Значения δ_S^n и σ_S на различных горизонтах 15, 16 и 17 октября 2007 г.

Глубина (м)		15.10.2007	16.10.2007	17.10.2007	18.10.2007
1	δ_T^n	0,35	0,27	0,18	0,41
	σ_T	1,45	1,11	0,79	1,74
5	δ_T^n	0,32	0,23	0,17	0,37
	σ_T	1,34	0,95	0,76	1,57
10	δ_T^n	0,32	0,18	0,14	0,32
	σ_T	1,31	0,75	0,57	1,35
15	δ_T^n	0,25	0,12	0,12	0,25
	σ_T	0,97	0,47	0,48	0,97
20	δ_T^n	0,17	0,14	0,08	0,19
	σ_T	0,47	0,39	0,27	0,56
24	δ_T^n	0,28	0,18	0,11	0,28
	σ_T	0,44	0,27	0,16	0,68
28	δ_T^n	0,14	0,07	0,03	0,09
	σ_T	0,29	0,13	0,11	0,19

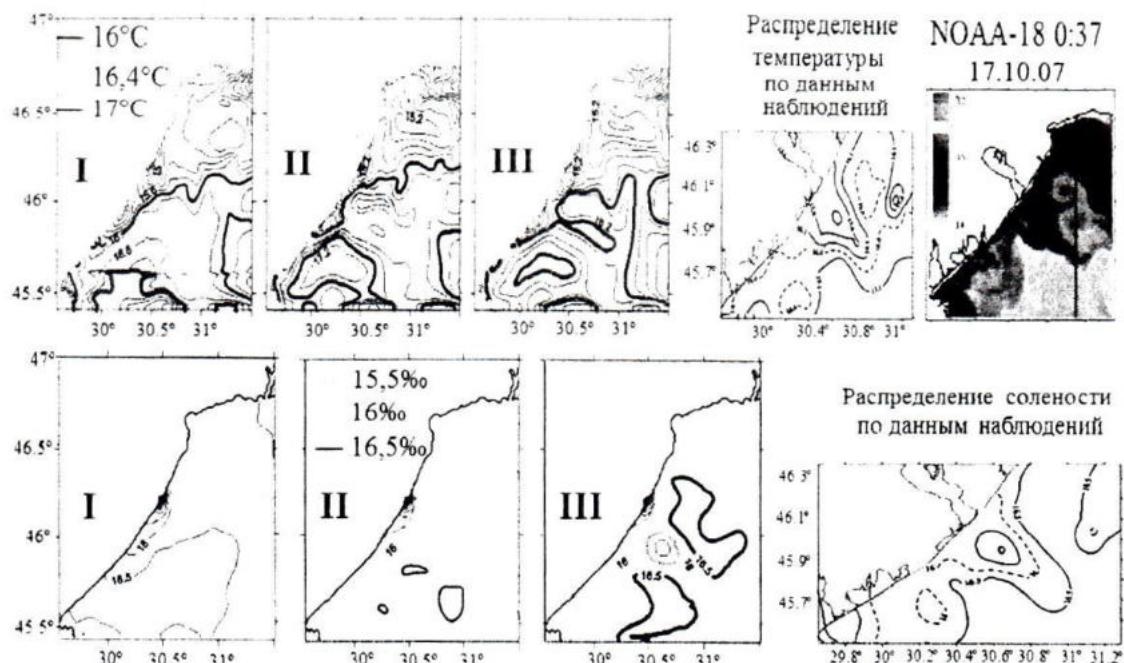


Рис. 2. Поля температуры и солености на горизонте 1 м, рассчитанные в экспериментах I, II, III, распределения температуры и солености по данным наблюдений, спутниковое изображение температуры 17 октября 2007 г.

Качественное соответствие натурным данным было получено в результатах эксперимента 3 (наличие в приусьевой зоне распресненных и относительно холодных вод, к северу от устья реки Днестр потоки с более теплой водой относительно прилегающих вод и более теплая и соленая вода вблизи открытой границы).

Заключение. Показано, что для воспроизведения гидрологической структуры полей на северо-западном шельфе в октябре 2007 г., близкой к наблюдаемой, необходимо использовать уточненные начальные условия и ассимилировать данные наблюдений гидрологической съемки в течение всего расчета. Это позволило воспроизвести слой скачка в вертикальных профилях температуры и солености, описать распространение опресненных речных вод вдоль берега, а также получить характерные структурные зоны, отмеченные по данным наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демышев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинических течений океана на сетке С // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: Изд. ИВМ. – 1992. – С. 163 – 231.
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. Демышев С.Г., Евстигнеева Н.А. Численное моделирование гидрофизических полей с ассимиляцией данных наблюдений в прибрежной зоне Южного берега Крыма в июле 2000 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2012. – 26, т. 2. – С. 27 – 39.
4. Коротаев Г.К., Еремеев В.Н. Введение в оперативную океанографию. – Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2006. – 382 с.
5. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 359 с.
6. Демышев С.Г., Евстигнеева Н.А. Анализ гидрофизических полей на северо-западном шельфе Черного моря // Океанология. – 2013. – Т. 53, № 5. – С. 585 – 595.