

С.Г. Демышев, Н.А. Евстигнеева

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОХАЛИННЫХ ПОЛЕЙ
НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ
В ОКТЯБРЕ 2007 ГОДА НА ОСНОВЕ АССИМИЛЯЦИИ
В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

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 в октябре 2007 г. на северо-западном шельфе Черного моря. Результаты расчета с ассимиляцией данных температуры и солёности сравниваются с гидродинамическим прогнозом. Показано, что учет данных наблюдений приводит к качественным и количественным отличиям в структуре термохалинных полей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *северо-западный шельф, высокое пространственное разрешение, поля температуры и солёности, ассимиляция данных наблюдений.*

Введение. Знание прибрежной циркуляции Черного моря играет важную роль в решении задач навигации и строительства прибрежных и портовых сооружений. Для ее воспроизведения необходимо использовать гидротермодинамическую модель, которая должна учитывать влияние стока рек, обмен через открытую границу, описывать течения в мелководных заливах и лиманах. Для реконструкции реальной ситуации важно ассимилировать в модели поступающую гидрологическую информацию.

В [1, 2] на базе численной модели [3], включающей в себя полные уравнения движения, уравнения тепла и соли, была реализована процедура 4-мерного анализа гидрофизических полей Черного моря с усвоением данных измерений температуры и солёности, показана эффективность проведения усвоения данных на примере съемки в июне 1984 г. В [4] получены поля температуры и солёности по модели [3] с ассимиляцией данных спутниковых и метеорологических измерений, выполнена валидация модельных полей с данными натурных наблюдений в северо-восточной части Черного моря в 2000 – 2004 гг.

В [5, 6] была проведена адаптация гидродинамической модели МГИ НАН Украины [3] для расчета течений с высоким разрешением на северо-западном шельфе (СЗШ) Черного моря и было показано, что данная модель позволяет детально анализировать течения на мелководье и в глубинных слоях за счет мелкого шага сетки и уточненного рельефа дна.

С 2007 г. Морской гидрофизический институт НАН Украины возобновил экспедиционные исследования на НИС «Эксперимент» [7] в северо-западной части Черного моря, в задачи которых входит получение экспериментальных данных о вертикальном и пространственном распределении гидрологических характеристик. Однако до настоящего времени обработка

данных съемок, полученных в шельфовой зоне моря, на основе усвоения полученных наблюдений в гидротермодинамической модели не проводилась.

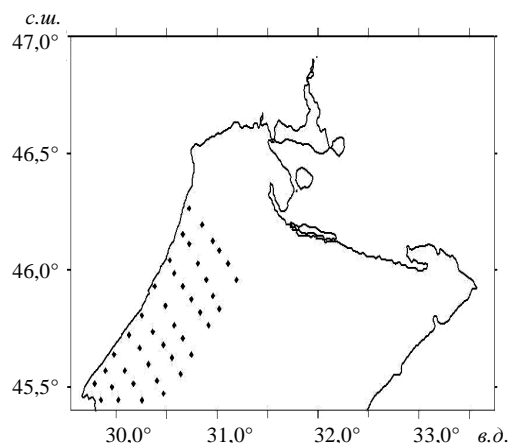


Рис. 1. Схема станций, выполненных на НИС «Эксперимент» 15 – 17 октября 2007 г.

выполнялись измерения, показана на рис. 1.

Уравнения модели и краевые условия. Система уравнений модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды имеет вид [3]:

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

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

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

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

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

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

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

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

где $E = \rho_0 (u^2 + v^2) / 2$, $\zeta = v_x - u_y$; 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; I – по-

токи коротковолновой солнечной радиации. Остальные обозначения в уравнениях (1) – (8) – общепринятые [3].

В серии численных экспериментов было показано, что учет проникающей коротковолновой радиации I позволяет более точно воспроизводить изменения температуры в мелководных заливах и лиманах. Параметризация I в уравнении (6) подробно описана в работах [8, 9].

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

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

$$v_V u_z = -\tau^x, \quad v_V v_z = -\tau^y, \quad \kappa^V T_z = Q^T, \quad \kappa^V S_z = (Pr - Ev)S_0,$$

где τ^x, τ^y – составляющие компоненты напряжения трения ветра; S_0 – соленость на поверхности моря; Q^T – потоки тепла.

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

На участках границы, где втекают реки, используются следующие 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] и с учетом задания скоростей на жидкой части южной границы.

Для задания граничных условий на открытой границе области использовались поля течений, температуры, солености, полученные по модели [3] для всего моря на горизонтальной сетке 5×5 км в рамках проекта «Оперативная океанография» [12]. 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, соленость; где вода вытекает ($v < 0$), для u, v ставятся условия $\partial u / \partial n = 0, \partial v / \partial n = 0$, для определения T и S на открытой границе задаются условия Орланского [13] с использованием центральной явной численной схемы [14] для расчета скорости переноса возмущений.

Начальные поля для u , v , ζ , T и S были получены на основе расчета по модели [3] с усвоением данных альтиметрии и «спутниковой» температуры поверхности моря (SST)¹ в рамках проекта «Оперативная океанография» [12]. Данные поля были линейно проинтерполированы на сетку высокого разрешения и выбраны значения, попадающие в рассматриваемую область шельфа. Начальный момент времени соответствовал 14 октября 2007 г.

Система уравнений (1) – (8) с соответствующими краевыми и начальными условиями решалась численно. Численная схема модели подробно описана в [2, 3, 5, 6] с указанием проведенных преобразований, обеспечивающих учет задания скоростей, температуры и солёности на жидкой части границы.

Параметры модели. Рассматривается область Черного моря, ограниченная с юга параллелью $45,5^\circ$ с.ш. и расположенная между меридианами $29,5$ и $33,5^\circ$ в.д., для которой максимальная глубина не превышает 50 м. (см. рис. 1). Численные эксперименты проводились с разрешением 1,66 км по оси x и 1,56 км по оси y . Шаг по времени составлял 30 с. Общее время интегрирования уравнений модели – 5 дней (с 14 по 18 октября 2007 г.). По вертикали горизонтальные составляющие скорости течений, температура и солёность рассчитывались для 44 горизонтов: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; ... 32; 34; ... 49 м. Вертикальная компонента скорости вычислялась для промежуточных горизонтов.

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 до глубины слоя скачка $H = 24$ м (глубина этого слоя определена по данным наблюдений) рассчитываются с аппроксимацией Филандера – Пакановского [15]:

$$\nu_V = \nu_0 (R_0 + Ri)^{-2} + \nu_1, \quad \kappa^S = \left[\nu_0 (R_0 + Ri)^{-2} + \nu_1 \right] / (R_0 + Ri) + \kappa_1, \\ \kappa^T = \left[\nu_0 (R_0 + Ri)^{-2} + \nu_1 \right] / (R_0 + Ri) + \kappa_1,$$

Где $\nu_0 = 5$; $R_0 = 1$; $Ri = (\partial\rho/\partial z)g \left[(\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2 \right]^{-1}$ – число Ричардсона; $\nu_1 = 1$; $\kappa_1 = 1$.

Для горизонтов ниже $H = 24$ м полагаем $\nu_V = 0,1$, $\kappa^S = 0,1$, $\kappa^T = 0,1$.

Параметры ν_0 , ν_1 , κ_1 аппроксимации Филандера – Пакановского [15] и значения коэффициентов ниже глубины слоя скачка выбирались по результатам серии специализированных численных экспериментов, в которых анализировались профили T , S и сравнивались с натурными данными.

На поверхности моря каждые шесть часов задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, коротковолновой радиации, осадки и испарение, полученные в рамках проекта «Оперативная океанография» [12] и линейно проинтерполированные на выбранную сетку.

¹ SST – Sea Surface Temperature – температура поверхности моря.

В период времени 14 – 18 октября 2007 г. преобладали северо-западные, юго-западные и западные ветры со средней скоростью 6 – 7 м/с. Максимальная скорость ветра (10 – 11 м/с) отмечалась 14 и 15 октября.

При расчетах учитывался сток трех рек: Днепра, Днестра и Южного Буга. Температура в устьях рек задавалась равной 16,2°C, соленость воды – 1‰ (по данным измерений, полученных в экспедициях в сентябре и октябре 2007 г.).

На основе описанной гидродинамической модели с выбранными параметрами проведено два численных эксперимента: гидродинамический прогноз (эксперимент 1) и расчет с ассимиляцией данных температуры и солености (эксперимент 2). Для реализации процедуры усвоения данных натуральных наблюдений использовалась методика последовательной оптимальной интерполяции по Гандину [16], подробно описанная в работах [1, 2, 16].

Описание съемки 2007 г. Приведем краткую характеристику используемых данных измерений температуры и солености, имеющихся в банке данных МГИ НАН Украины [17]. В ходе экспедиции на НИС «Эксперимент» [7] для выбранной области было выполнено 44 станции: 15 октября – 6, 16 октября – 20 и 17 октября – 18 станций (см. рис. 1). Количество станций, которые наиболее всего обеспечены наблюдениями по вертикали (ниже 23 м) – 10.

Максимальные значения поверхностной температуры 17,3 – 17,5°C наблюдались на станциях, расположенных между меридианами 30,5 и 31° в.д. и параллелями 45,5 и 45,7° с.ш., а также вблизи открытой границы. Минимальные значения температуры 14,9 – 15,3°C отмечались в приустьевой зоне Днестра. Для выбранного периода времени характерно охлаждение поверхностных вод и заглубление слоя скачка. Отметим, что глубина этого слоя в сентябре составляла 17 – 18 м (по данным измерений экспедиции 16 – 22 сентября 2007 г. на НИС «Эксперимент»).

На рис. 2 показаны распределения по вертикали измеренной температуры (рис. 2, *а*) и солености (рис. 2, *б*), наблюдавшиеся на различных станциях 16 и 17 октября 2007 г. Во всех профилях температуры, построенных для станций, где имеются данные наблюдений в слое воды 23 – 31 м, четко прослеживается слой скачка на глубине 22 – 26 м. Средний перепад в значениях температуры в слое скачка составляет от 6 до 7°C.

Анализируя изменения по вертикали данных наблюдений температуры на 44 различных станциях, отметим три типа распределения T с глубиной до слоя скачка, представленные на рис. 3:

1. *Рост температуры с глубиной.* Примеры таких вертикальных профилей изображены на рис. 3, *а* (измерения проведены на станциях, расположенных западнее меридиана 30,5° в.д. 16 октября).

2. *Уменьшение T с глубиной* ($0,1^\circ < \Delta T < 0,5^\circ \text{C}$). Примеры таких вертикальных профилей приведены на рис. 3, *б* (измерения проведены на станциях, расположенных восточнее 30,5° в.д. 17 октября).

3. *Незначительное изменение T с глубиной* ($|\Delta T| < 0,1^\circ \text{C}$). На рис. 3, *в* представлены профили температуры, измеренные на различных станциях.

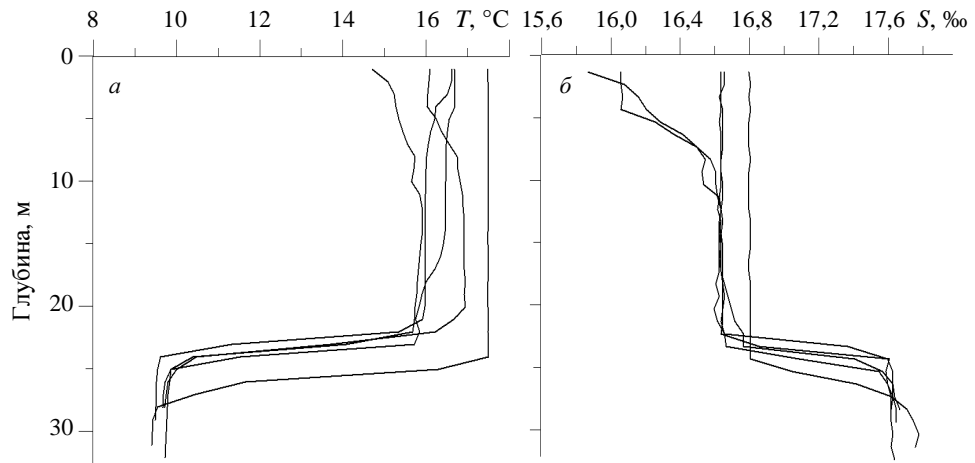


Рис. 2. Вертикальные профили измеренной 16 и 17 октября 2007 г. на пяти различных станциях температуры (а) и солёности (б) морской воды.

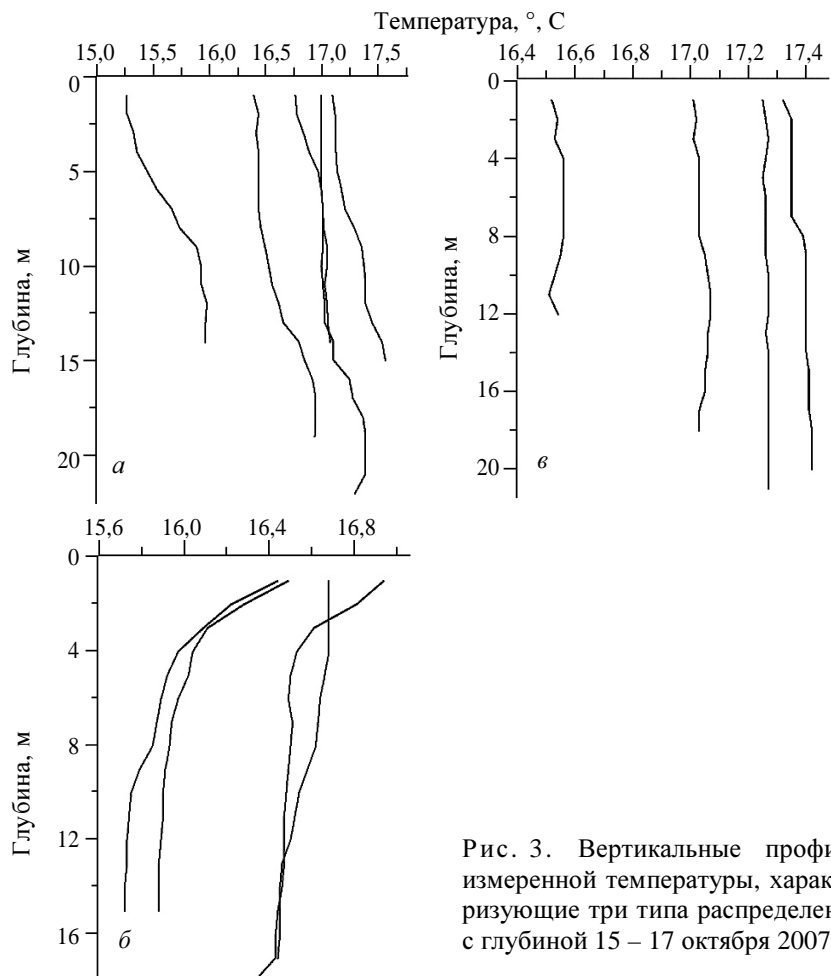


Рис. 3. Вертикальные профили измеренной температуры, характеризующие три типа распределения с глубиной 15 – 17 октября 2007 г.

Минимальные значения измеренной поверхностной солености (в пределах от 14,9 до 15,4‰) отмечаются вблизи устья Днестра и приустьевой зоны Дуная. Максимумы значений поверхностной солености 16,6 – 16,8‰ наблюдаются восточнее меридиана 30,5° в.д. Во всех профилях солености, построенных для станций, где имеются данные наблюдений в слое воды 23 – 31 м (см. рис. 2, б), наблюдается слой скачка солености на глубине 22 – 26 м. Средний перепад в значениях S в слое скачка составляет 1‰.

Сопоставление результатов численного эксперимента 1 с данными наблюдений. В эксперименте 1 система уравнений (1) – (8) с указанными ранее краевыми и начальными условиями интегрировалась в течение 5 дней (без ассимиляции данных). На рис. 4 представлены профили модельной и измеренной солености и температуры на одной из станций 17 октября 2007 г. При сравнении рассчитанных вертикальных профилей температуры и солености с данными наблюдений, имеющимися в банке данных МГИ НАН Украины [17] для октября 2007 г., 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‰) (см. рис. 4, а);

- отсутствие в модельных профилях T и S слоя скачка (см. рис. 4, а, б). На всех глубоководных станциях, согласно данным наблюдений, четко прослеживается слой скачка температуры и солености (перепад в значениях температуры составляет 6 – 9°C, в значениях солености – 0,5 – 1‰). Существование этого слоя отмечается также и в сентябре 2007 г. по данным измерений экспедиции МГИ НАН Украины на НИС «Эксперимент» в восточной части СЗШ.

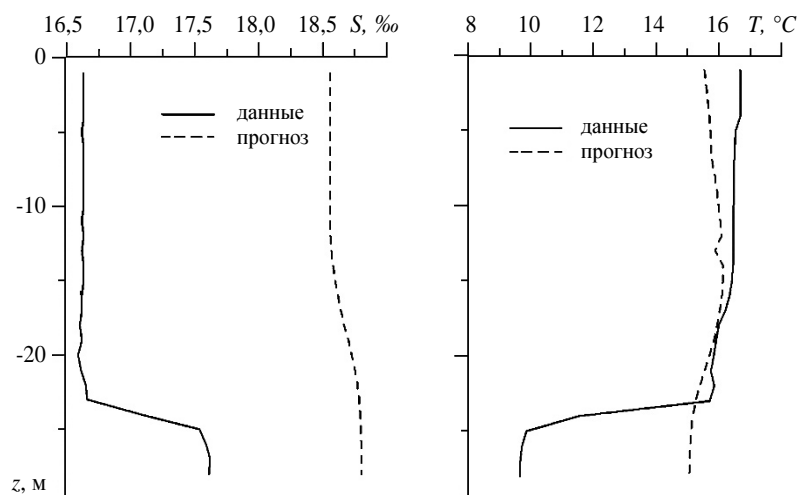


Рис. 4. Профили модельной и измеренной солености и температуры на станции, выполненной 17 октября 2007 г. в точке с координатами 46,10° с.ш. и 31,05° в.д.

Корректирование начальных полей и данных для краевых условий на открытой границе для эксперимента 2 (с ассимиляцией данных). 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 $\delta S_k = \sum_1^N (S_{\text{mod}} - S_{\text{data}}) / N$ (N – число

станций на k -м горизонте, S^{mod} и S^{data} – 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 данных натуральных наблюдений.

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 [18].

На первом шаге решались уравнения для невязки температуры и солености $\nabla^2 \delta^T = 0$, $\nabla^2 \delta^S = 0$ с краевыми условиями: $\delta^T = 0$, $\delta^S = 0$ – на твердой границе, $\delta^T = T_0^{\text{mod}} - T^{\text{data}}$, $\delta^S = S_0^{\text{mod}} - S^{\text{data}}$ – на жидкой границе. Здесь $\delta^T = T_0^{\text{mod}} - T^{\text{data}}$, $\delta^S = S_0^{\text{mod}} - S^{\text{data}}$, T_0^{mod} , S_0^{mod} и T^{data} , S^{data} – модельная температура, модельная соленость и наблюдаемая температура, наблюдаемая соленость. На втором шаге формировались температура и соленость в тех частях области, где коррекция полей температуры и солености не проводилась $T^{\text{mod}} = T_0^{\text{mod}} + \delta^T$, $S^{\text{mod}} = S_0^{\text{mod}} + \delta^S$.

Для согласования поля плотности (температура и соленость) и поля течений была проведена процедура геострофического согласования. Она заключалась в том, что уравнения модели (1) – (8) интегрировались на 5 суток с краевыми условиями, которые не изменялись по времени. Из анализа графиков средней по объему и на горизонтах кинетической энергии было установлено, что квазигеострофический баланс достигается через трое суток. Полученные поля для u , v , ζ , T и S , принимались за начальные поля для эксперимента с усвоением данных натуральных наблюдений (эксперимент 2).

Были внесены следующие изменения в данные T и S для использования при задании граничных условий на открытой границе области в эксперименте 2:

1) $T_{\text{mod}} - \delta T^*$, где $\delta T^* = T_{\text{mod}}^* - T_{\text{data}}^*$, T_{mod}^* и T_{data}^* – рассчитанная в эксперименте 1 и наблюдаемая температура на станции, расположенной вблизи жидкой границы,

2) $S_{\text{mod}} - \delta S^*$, где $\delta S^* = S_{\text{mod}}^* - S_{\text{data}}^*$, S_{mod}^* и S_{data}^* – рассчитанная в эксперименте 1 и наблюдаемая соленость на станции, расположенной вблизи жидкой границы.

Сравнение результатов численных экспериментов 1 и 2. Напомним, что в эксперименте 1 выполнен гидродинамический прогноз с начальными полями, взятыми из [12]. В эксперименте 2 с подключением процедуры ассимиляции данных измерений температуры и солености и модифицированными начальными полями получены пространственные распределения T и S . Изучим влияние усвоения данных наблюдений на формирование термохалинных полей в октябре 2007 г.

Проведем сравнение полей температуры на различных горизонтах, полученных в экспериментах 1 и 2. На рис. 5 представлены поля температуры на горизонте 5 м в западной части СЗШ для двух экспериментов (изотермы проведены через каждые $0,2^{\circ}\text{C}$). 15 октября (см. рис. 5, *а, з*) минимальные значения температуры ($15,8 - 16^{\circ}\text{C}$) наблюдаются в районе реки Днестр и на севере области, максимальные значения ($17,4 - 18^{\circ}\text{C}$) – у открытой границы. На севере СЗШ воды являются более холодными ($16 - 16,4^{\circ}\text{C}$) в эксперименте 1 по сравнению с гидродинамическим прогнозом ($16,4 - 16,6^{\circ}\text{C}$). После внесения поправок в поля температуры (см. рис. 5, *з*) с шести станций, расположенных между меридианами $29,7$ и 30° в.д., вблизи юго-западной границы области формируются потоки более теплой воды.

16 октября вода в верхнем слое (см. рис. 5, *б, д*) охлаждается до $15 - 15,6^{\circ}\text{C}$ вблизи Днестра и на севере области, максимумы значений T не превышают $17,6^{\circ}\text{C}$ (у открытой границы). В полях температуры, рассчитанных с усвоением натуральных данных с 20 станций, расположенных между меридианами 30 и $30,7^{\circ}$ в.д. (см. рис. 5, *д*), формируются зоны с более холодной водой (например, сокращается площадь вод, занятых водой с $T = 17^{\circ}\text{C}$), на севере и в центре СЗШ вода в среднем на $0,2 - 0,3^{\circ}\text{C}$ холоднее по сравнению с гидродинамическим прогнозом.

17 октября отмечается дальнейшее понижение температуры на верхних горизонтах (см. рис. 5, *в, е*) до $14,8 - 15,5^{\circ}\text{C}$ вблизи Днестра и на севере области, в центре располагаются воды с температурой $15,5 - 16,2^{\circ}\text{C}$, максимумы значений T не превышают $17,4^{\circ}\text{C}$ (у открытой границы). Учет данных наблюдений (18 станций, расположенных между меридианами $30,5$ и $31,2^{\circ}$ в.д.) приводит к появлению в полях температуры (см. рис. 5, *е*) зон с более холодной водой ($15,8 - 16,2^{\circ}\text{C}$) по сравнению с результатами эксперимента 1.

15 – 17 октября на горизонте 15 м в полях температуры, рассчитанных в эксперименте 1, значения T в западной части СЗШ составляют $18 - 19^{\circ}\text{C}$, тогда как в эксперименте 2 максимальные значения температуры не превышают 17°C . Температура воды в эксперименте 1 на севере области составляет $16,6 - 17^{\circ}\text{C}$, тогда как в эксперименте 2 максимальные значения температуры не превышают $16,4^{\circ}\text{C}$, в центральной части средняя разница между рассчитанными в двух экспериментах значениями составляет $0,5^{\circ}\text{C}$.

Сравним поля солености, полученные в экспериментах 1 и 2. На рис. 6 представлены поля солености на горизонте 5 м в западной части СЗШ для двух экспериментов (изохалины проведены через каждые $0,2\text{‰}$).

15 – 17 октября в эксперименте 1 на верхних горизонтах (см. рис. 6, *а, б, в*) минимальные значения солености ($17,0 - 17,6\text{‰}$) наблюдаются в районе реки Днестр, максимальные значения ($18,4 - 18,6\text{‰}$) – в юго-западном районе СЗШ.

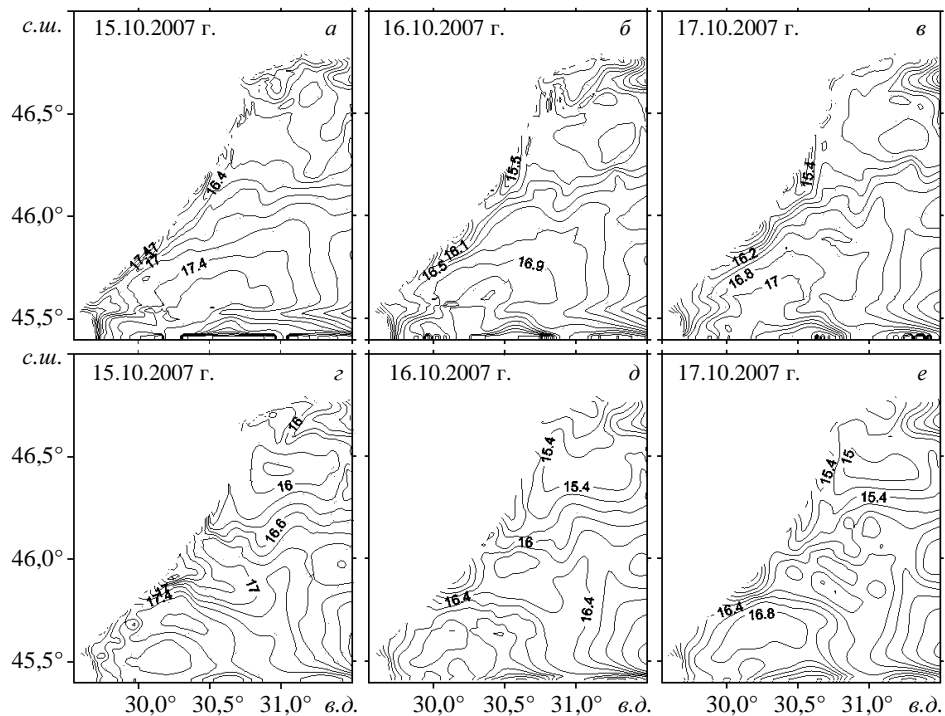


Рис. 5. Поля температуры ($^{\circ}\text{C}$) в западной части СЗШ на горизонте 5 м 15, 16 и 17 октября 2007 г.: а, б, в – в эксперименте 1; з, д, е – в эксперименте 2.

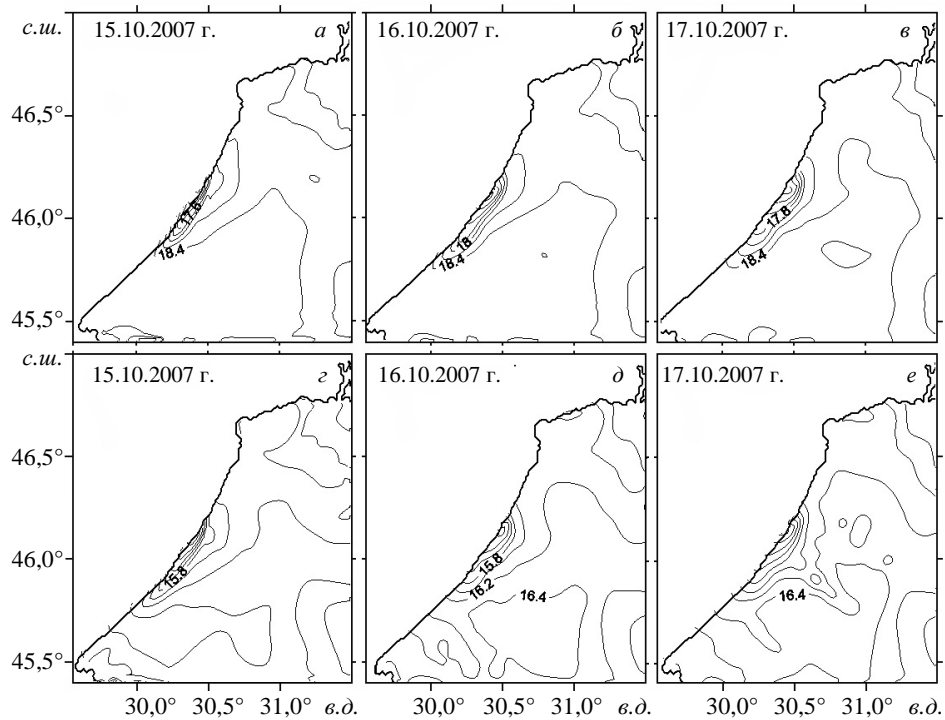
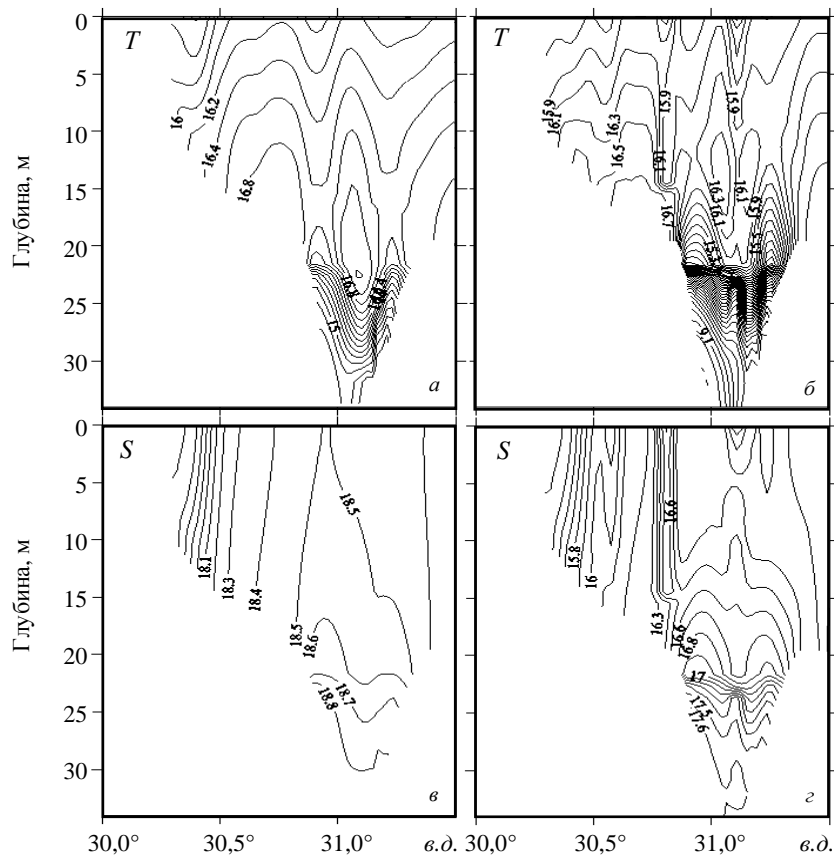


Рис. 6. Поля солености (‰) на горизонте 5 м в западной части СЗШ на горизонте 5 м 15, 16 и 17 октября 2007 г.: а, б, в – в эксперименте 1; з, д, е – в эксперименте 2.

В это же время в эксперименте 2 (см. рис. б, з, д, е) минимальные значения солености (12 – 15‰) наблюдаются в районе Днестра, а максимальные значения (16,4 – 16,5‰) – в юго-западном районе. С учетом внесения поправок в поля солености (см. рис. б, з) с шести станций, расположенных между меридианами 29,7 и 30° в.д. у юго-западной границы области формируются более пресные воды (15,8 – 16‰), поступающие из приустьевой зоны Дуная. Учет данных наблюдений 16 октября (на станциях, расположенных между меридианами 30 и 30,7° в.д.) приводит к появлению в полях солености (см. рис. б, д) зон воды с пониженной до (16,1 – 16,3‰) соленостью западнее меридиана 30,5° в.д., а восточнее этого меридиана формируются воды с повышенной, относительно прилегающих к ним, соленостью (16,4 – 16,7‰). 17 октября (см. рис. б, е) в области, расположенной между меридианами 30,5 и 31,2° в.д., появляются более распресненные воды вблизи Днестра (с соленостью 15,8 – 16,2‰), восточнее меридиана 30,7 в.д. формируются воды с более высокой соленостью (16,4 – 16,6‰).

Проведем сравнение вертикальной структуры температуры и солености в обоих вариантах расчетов.

На рис. 7 представлены вертикальные сечения в полях температуры и солености в западной части СЗШ (вдоль параллели 46° с. ш.).



На рис. 7, а и рис. 7, б изображены сечения в полях температуры для 17 октября (четвертого расчетного дня), рассчитанные в экспериментах 1 и 2 (изотермы проведены через каждые 0,2°C).

Температура поверхностного слоя воды в эксперименте 1 (см. рис. 7, а) 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 (см. рис. 7, б) являются более охлажденными по сравнению с результатами эксперимента 1. Их температура составляет (15,5 – 15,7°C). Максимальные значения температуры (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. 7, в и рис. 7, г представлены вертикальные сечения в полях солёности вдоль параллели 46° с.ш. для 17 октября, рассчитанные по модели без учета и с учетом ассимиляции данных (изохалины проведены через каждые 0,1‰).

Минимальная солёность, рассчитанная в эксперименте 1 (см. рис. 7, в), 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 2 (см. рис. 7, г) воды с минимальной солёностью от 15,5 до 16‰ располагаются в верхнем 15-метровом слое воды между меридианами 30,3 и 30,5° в.д., восточнее меридиана 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 – ассимиляция приводит к наличию бóльших градиентов в полях температуры и солёности (см. рис. 7, б и рис. 7, г) по сравнению с гидродинамическим прогнозом (см. рис. 7, а, в).

В процессе интегрирования уравнений модели в эксперименте 2 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:

$$\delta_T^n = \frac{1}{N} \sum_1^N \left[\left| T_{\text{mod}}^n - T_{\text{data}}^n \right| \right], \quad \delta_S^n = \frac{1}{N} \sum_1^N \left[\left| S_{\text{mod}}^n - S_{\text{data}}^n \right| \right],$$

$$\sigma_T = \left\{ \frac{1}{N} \sum_1^N \left[\left| T_{\text{mod}}^n - T_{\text{data}}^n \right| - \delta_T^n \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$\sigma_S = \left\{ \frac{1}{N} \sum_1^N \left[\left| S_{\text{mod}}^n - S_{\text{data}}^n \right| \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}},$$

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

В табл. 1 и 2 представлены средние и среднеквадратические ошибки оценки полей температуры и солености соответственно на горизонтах 1, 5, 15, 24, 28 м для трех дней.

Таблица 1. Значения δ_T^n и σ_T на различных горизонтах 15 – 17 октября 2007 г.

Глубина (м)	Параметр	Дата измерения		
		15.10.2007 г.	16.10.2007 г.	17.10.2007 г.
1	δ_T^n	0,65	0,35	0,24
	σ_T	2,66	1,41	1,03
5	δ_T^n	0,69	0,25	0,19
	σ_T	2,81	1,03	0,84
10	δ_T^n	0,65	0,23	0,22
	σ_T	2,58	0,99	0,91
15	δ_T^n	0,77	0,36	0,23
	σ_T	2,81	1,31	0,89
20	δ_T^n	0,89	0,58	0,41
	σ_T	2,21	1,41	1,19
24	δ_T^n	1,73	0,94	0,75
	σ_T	4,69	2,25	2,44
28	δ_T^n	0,54	0,51	0,11
	σ_T	0,92	0,59	0,14

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

Глубина (м)	Параметр	Дата измерения		
		15.10.2007	16.10.2007	17.10.2007
1	δ_S^n	0,35	0,27	0,18
	σ_S	1,45	1,11	0,79
5	δ_S^n	0,32	0,23	0,17
	σ_S	1,34	0,95	0,76
10	δ_S^n	0,32	0,18	0,14
	σ_S	1,31	0,75	0,58
15	δ_S^n	0,25	0,12	0,12
	σ_S	0,97	0,47	0,48
20	δ_S^n	0,17	0,14	0,08
	σ_S	0,48	0,39	0,28
24	δ_S^n	0,28	0,19	0,12
	σ_S	0,44	0,27	0,16
28	δ_S^n	0,14	0,06	0,03
	σ_S	0,296	0,13	0,11

Анализируя данные, представленные в табл. 1 и 2, отметим, что наибольшие значения ошибок оценки полей температуры δ_T^n и σ_T наблюдаются в слое скачка (глубины 20 – 24 м), наибольшие значения средних ошибок оценки полей солёности δ_S^n и σ_S – в верхнем слое воды. 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 эффективности применения процедуры ассимиляции.

Заключение. На основе гидродинамической модели с усвоением данных наблюдений при учете реальных краевых условий восстановлены непрерывные во времени и пространстве поля температуры и солёности с высоким пространственным разрешением ($1,66 \times 1,56$ км по горизонтали и 44 горизонта по вертикали) в период с 14 по 18 октября 2007 г.

Учет натуральных данных позволил воспроизвести слой скачка в вертикальных профилях температуры и солёности и распространение опресненных речных вод вдоль берега. В соответствии с наблюдениями в поле температуры формируются зоны с более холодной водой относительно гидродинамического прогноза, в поле солёности – более пресные воды.

При сопоставлении вертикального распределения температуры и солёности показано, что ассимиляция данных наблюдений приводит к качественным изменениям в структуре термохалинных полей, в частности, к формированию больших градиентов в слое скачка по сравнению с гидродинамическим прогнозом.

Полученные результаты демонстрируют, что модифицированная численная модель [5, 6] с процедурой ассимиляции данных может быть успешно использована при обработке данных натуральных полигонных съемок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьшев С.Г. Четырехмерное усвоение данных о температуре и солёности в Черном море // Известия РАН, серия: Физика атмосферы и океана. – 1996. – том 32, № 2. – С. 280-289.
2. Демьшев С.Г. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана. Диссертация на соискание ученой степени д. ф.-м. н. – Севастополь, 1996. – 343 с.
3. Демьшев С.Г., Кортаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке S // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: Изд. ИВМ. – 1992. – С. 163-231.
4. Пиотух В.Б., Ратнер Ю.Б. Сопоставление модельных и натуральных термохалинных характеристик в северо-восточной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2005, вып. 13. – С. 244-258.
5. 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: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2009, вып. 19. – С. 78-86.

6. *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. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2010, вып. 22. – С. 31-39.
7. *Горячкин Ю.Н.* Экспедиционные исследования в придунайском районе Черного моря и Керченском проливе // Морской гидрофизический журнал. – 2009, № 3. – С. 77-80.
8. *Paulson, C. A., Simpson J.* Irradiance measurements in the upper ocean // J. Phys. Oceanogr. – 1977. – vol. 7, № 6. – P. 952-956.
9. *Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Сосик Х.М.* Спектральная модель подводной облученности в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 2009, № 6. – С. 33-46.
10. *Яковлев Н.Г.* Численная модель и предварительные результаты расчетов по воспроизведению летней циркуляции вод Карского моря // Известия РАН, серия: Физика атмосферы и океана. – 1996. – том 32, № 5. – С. 714-723.
11. *Демьшев С.Г., Коротаев Г.К., Кныш В.В.* Моделирование сезонной изменчивости температурного режима верхнего деятельного слоя Черного моря. // Известия РАН, серия: Физика атмосферы и океана. – 2004. – том 40, № 2. – С. 259-270.
12. *Коротаев Г.К., Еремеев В.Н.* Введение в оперативную океанографию. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2006. – 382 с.
13. *Orlanski I.* A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows // J. Comput. Phys. – 1976. – vol. 21, № 3. – P.251-269.
14. *Kantha L., Blumberg A., Mellor G.* Computing phase speeds at open boundaries // J. Hydraulic Engineering. – 1990. – vol. 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. – vol. 11, № 11. – P. 1443-1451.
16. *Гандин Л.С., Каган Р.Л.* Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 359 с.
17. *Суворов А.М., Андриющенко 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: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2003. – С. 130-137.
18. *Ratner Yu., Grigoriev A., Dorofeev V. et al.* Pilot experiment on operational functioning of the Black Sea Nowcasting/Forecasting System / Тезисы докладов Международной научной конференции «Современное состояние экосистемы Черного и Азовского морей» (Крым, Донузлав, 13 – 16 сентября 2005 г.). – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2005. – С. 95.

Материал поступил в редакцию 09.11.2011 г.

После переработки 14.11.2011 г.

АНОТАЦІЯ На основі гідродинамічної моделі, що включає нелінійні рівняння руху, рівняння адвекції тепла і солі і процедури асиміляції проведений чисельний експеримент із засвоєнням даних спостережень гідрологічної зйомки в жовтні 2007 р. на північно-західному шельфі Чорного моря. Проводиться порівняння результатів моделювання полів температури і солоності з гідродинамічним прогнозом. З результатів розрахунків показана ефективність вживання процедури асиміляції, яка приводить до якісних змін в структурі термохалінних полів.

ABSTRACT On the basis of hydrodynamic model, including nonlinear equations of motion, equations of heat and salt and assimilation procedure, a numeral experiment is conducted with assimilation of data observations of hydrological survey in October, 2007 on the north-western shelf of the Black sea. A comparison of results of model temperature and salinity fields with a hydrodynamic prognosis is made. From the results of calculations an efficiency of application of assimilation procedure, which results in qualitative changes in the structure of thermohaline fields, is shown.