

Расчет гидрофизических полей с ассимиляцией данных наблюдений в северной части Черного моря в осенний сезон 2016 года

Н. А. Евстигнеева

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: naevstigneeva@yandex.ru*

Поступила 12.04.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

Работа посвящена анализу результатов расчета циркуляции и термохалинной структуры вод на основе трехмерной нелинейной гидродинамической модели и данных гидрологической съемки, выполненной в северной части Черного моря в осенний сезон 2016 г. Численная модель имела пространственное разрешение 1.6 км по горизонтали и 27 горизонтов по вертикали, использовалось реалистическое атмосферное воздействие. При ассимиляции данных наблюдений, основанной на фильтре Калмана, учитывались неоднородность и неизотропность ошибок оценок полей температуры и солености. Рассчитанные поля течений характеризовались вихревыми образованиями и струйными течениями. В северной части Черного моря наблюдались следующие особенности циркуляции: интенсивный поток струи Основного Черноморского течения вдоль Крымского побережья, антициклонические вихри с радиусами около 30 км вблизи г. Севастополя и в западной части области, циклонический вихрь с радиусом около 40 км между 34.5 и 35.5° в. д., антициклонические вихри с радиусом около 25 км вдоль Крымского побережья. При обтекании течением неровностей береговой линии и рельефа дна в прибрежной зоне получены вихревые образования разных масштабов разного знака вращения (в Каламитском заливе, в восточной части и вдоль восточного побережья Крыма). По результатам анализа реконструированных термохалинных полей отмечена взаимосвязь между формированием зон пониженной и повышенной (относительно прилегающих вод) температуры и местоположением особенностей в поле течений, в частности соответствие зон с более теплой распресненной водой антициклоническим образованиям.

Ключевые слова: Черное море, численное моделирование, высокое пространственное разрешение, ассимиляция данных природных наблюдений, мезомасштабные вихри, субмезомасштабные вихри.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0003 (шифр «Оперативная океанология»). Автор выражает благодарность Демышеву С. Г. за предоставленную гидродинамическую модель Черного моря, а также Дымовой О. А. за подготовленные для расчета начальные гидрофизические поля. Автор выражает благодарность рецензентам за ценные замечания.

© Евстигнеева Н. А., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Евстигнеева Н. А. Расчет гидрофизических полей с ассимиляцией данных наблюдений в северной части Черного моря в осенний сезон 2016 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 94–106. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-94-106

Calculation of Hydrophysical Fields with Assimilation of Observational Data in the Northern Part of the Black Sea in Autumn 2016

N. A. Evstigneeva

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: naevstigneeva@yandex.ru*

Submitted 12.04.2020; revised 12.08.2020; published 25.09.2021

The paper analyzes the results of calculation of the circulation and thermohaline water structure based on a three-dimensional nonlinear hydrodynamic model and hydrological data from a survey, carried out in the northern part of the Black Sea in autumn 2016. We used a high spatial resolution (horizontal grid $\sim 1.6 \times 1.6$ km and 27 vertical layers) model and realistic atmospheric forcing. The assimilation procedure of observational data was based on a modified Kalman filter taking into account the heterogeneity and anisotropy of estimation error of the temperature and salinity fields. The calculated fields of currents were characterized by eddies and jet currents. The following circulation features were observed in the northern part of the Black Sea: an intense jet of the Black Sea Rim Current along the Crimean coast, anticyclonic eddies with a radius of about 30 km near Sevastopol and in the western part of the region, a cyclonic eddy with a radius of about 40 km between 34.5 and 35.5 E, anticyclonic eddies with a radius of about 25 km along the Crimean coast. Eddy formations of different scales and different signs of rotation were obtained (in the Kalamitsky Bay, in the eastern part and along the eastern coast of the Crimea), when the current flowed around irregularities of the coastline and the bottom relief in the coastal zone. The correlation between the formation of zones of lower and higher temperature relative to adjacent waters and the location of features in the field of current (in particular, the correspondence of zones with warmer desalinated water to the anticyclonic formations) was noted from the analysis of the reconstructed thermohaline fields.

Keywords: Black Sea, numerical simulation, high spatial resolution, assimilation of observational data, mesoscale and submesoscale eddies.

Acknowledgments: the work was carried out under state task on topic no. 0555-2021-0003 (code “Operational oceanology”). The author is grateful to S. G. Demyshev for the provided hydrodynamic model of the Black Sea and to O. A. Dymova for the initial hydrophysical fields prepared for the calculation. The author is grateful to the reviewers for their helpful comments.

For citation: Evstigneeva, N.A., 2021. Calculation of Hydrophysical Fields with Assimilation of Observational Data in the Northern Part of the Black Sea in Autumn 2016. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 94–106. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-94-106 (in Russian).

Введение

С 2016 г. Морской гидрофизический институт (МГИ) возобновил комплексный мониторинг состояния гидрологических, гидрохимических, метеорологических, гидрооптических и биологических полей Черного моря [1]. Регулярные экспедиционные исследования черноморской акватории позволили пополнить базу океанографических данных, расширить знания о структуре и изменчивости гидрофизических полей и выявить ряд особенностей сезонной и синоптической изменчивости динамики вод (например, [1, 2]).

В настоящее время численные эксперименты показывают высокую эффективность использования гидродинамических моделей с блоком усвоения данных контактных наблюдений. Обработка данных гидрологических съемок на основе ассимиляции их в численной модели позволяет построить непрерывные в пространстве и времени поля течений, температуры и солёности и дает возможность изучить закономерности эволюции вихрей и течений на различных масштабах.

В работе [3] решается задача комплексного использования данных измерений температуры, солёности и скорости течений на полигонах «ПОЛИМОДЕ» при ассимиляции их в модели на основе применения фильтра Калмана и приводятся результаты расчета согласованных полей с привлечением механизма геострофического приспособления и учета асинхронности полигонных измерений. В [4] обсуждается постановка задачи в отношении четырехмерной вариационной ассимиляции данных температуры и солёности в модели гидродинамики Мирового океана, а также алгоритм ее решения и результаты. В [5] на основе вариационной ассимиляции данных спутниковых наблюдений разработан алгоритм решения задачи численного моделирования гидротермодинамики Черного и Азовского морей, который учитывает ковариационную матрицу ошибок наблюдений, рассчитанную на основе статистических характеристик данных наблюдений за температурой поверхности моря. В [6] представлена система усвоения океанографических данных, развиваемая в Гидрометцентре России. Усвоение осуществлялось по схеме анализ – прогноз – анализ, компонентами которой являлись процедуры обработки получаемых в оперативном режиме данных наблюдений, вариационная схема анализа данных и модель общей циркуляции океана. Выполнен реанализ гидрофизических полей Мирового океана за период 2005–2015 гг. В [7, 8] с помощью гидродинамической модели и процедуры ассимиляции, основанной на последовательной коррекции модельных значений методом оптимальной интерполяции невязок, представлены результаты обработки нескольких гидрологических съемок на небольших акваториях (западное побережье Крыма и северо-западный шельф Черного моря). В поле течений обнаружены и исследованы мезомасштабные вихревые образования и интенсивные струйные течения, которые соответствовали спутниковым наблюдениям и отсутствовали в экспериментах с использованием модели с более низким разрешением.

Цель данного исследования заключалась в воспроизведении циркуляции в северной части Черного моря для осеннего сезона 2016 г. с помощью трехмерной нелинейной модели [9], разработанной в МГИ, и процедуры ассимиляции данных наблюдений (гидрологическая съемка 89-го рейса

НИС «Профессор Водяницкий») на основе фильтра Калмана [10–12] с учетом неоднородности и неізотропности ошибок оценок полей температуры и солености. Анализ построенных полей скорости течений, температуры и солености позволит определить области генерации мезо- и субмезомасштабных особенностей гидрофизических полей и исследовать возможные причины их формирования.

Постановка задачи и параметры численного эксперимента

Система уравнений численной модели МГИ [9] в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды представлена в форме Громеки – Лэмба. Конечно-разностная дискретизация уравнений модели, начальных и граничных условий проведена на сетке C [10]. Применяемая методика алгоритма фильтра Калмана с учетом неоднородности и неізотропности оценок полей температуры и солености была подробно описана в работах [11–13].

Пусть к моменту времени (t_n) поступления данных измерений рассчитаны термохалинные поля по уравнениям модели [9], тогда они корректируются по формулам [7, 12, 13]:

$$T(\bar{x}, t_n^+) = T(\bar{x}, t_n^-) + \sum_{m=1}^M \Delta_m^T(\bar{x}, t_n^-) [T(\bar{x}_m, t_n) - T(\bar{x}_m, t_n^-)], \quad (1)$$

$$S(\bar{x}, t_n^+) = S(\bar{x}, t_n^-) + \sum_{m=1}^M \Delta_m^S(\bar{x}, t_n^-) [S(\bar{x}_m, t_n) - S(\bar{x}_m, t_n^-)]. \quad (2)$$

Первые слагаемые в квадратных скобках в (1) и (2) – поступившие на момент времени t_n данные измерений T, S ; вторые – поля температуры и солености, рассчитанные по численной модели на этот же момент времени [7]. Знак минус у t_n означает, что соответствующие поля получены без учета данных измерений, поступивших на текущий момент времени; плюс – расчет искомых характеристик с учетом данных натуральных наблюдений, имеющих на момент t_n . M – количество измерений, которое определяется радиусом корреляции и по которым рассчитывали весовые множители. Весовые коэффициенты определялись из соотношений:

$$\Delta_m^T(\bar{x}, t_n^-) = \sum_{l=1}^M P_{TT}(\bar{x}, \bar{x}_l, t_n^-) [P_{TT}(\bar{x}_m, \bar{x}_l, t_n^-) + R_T(\bar{x}_m, \bar{x}_l, t_n^-)]^{-1}, \quad (3)$$

$$\Delta_m^S(\bar{x}, t_n^-) = \sum_{l=1}^M P_{SS}(\bar{x}, \bar{x}_l, t_n^-) [P_{SS}(\bar{x}_m, \bar{x}_l, t_n^-) + R_S(\bar{x}_m, \bar{x}_l, t_n^-)]^{-1}, \quad m = 1, \dots, M, \quad (4)$$

где R_T, R_S – ковариационные функции ошибок измерений температуры и солености соответственно; P_{TT}, P_{SS} – ковариационные функции ошибок оценки полей температуры и солености, которые аппроксимируются следующими выражениями [11]:

$$P_{TT}(\bar{x}, \bar{x}', t) = \sigma_T(\bar{x}, t) \cdot \sigma_T(\bar{x}', t) \cdot P_T(x - x', y - y'), \quad (5)$$

$$P_{SS}(\bar{x}, \bar{x}', t) = \sigma_S(\bar{x}, t) \cdot \sigma_S(\bar{x}', t) \cdot P_S(x - x', y - y'), \quad (6)$$

где σ_T, σ_S – поля среднеквадратических ошибок оценок полей T и S ; P_T, P_S – ковариационные функции полей температуры и солености.

Уравнения для σ_T, σ_S имеют следующий вид:

$$\partial\sigma_T^2/\partial t + \partial(\sigma_T^2 u)/\partial x + \partial(\sigma_T^2 v)/\partial y + \partial(\sigma_T^2 w)/\partial z = k_H \Delta\sigma_T^2 + \partial(k^V \partial\sigma_T^2/\partial z)/\partial z, \quad (7)$$

$$\partial\sigma_S^2/\partial t + \partial(\sigma_S^2 u)/\partial x + \partial(\sigma_S^2 v)/\partial y + \partial(\sigma_S^2 w)/\partial z = k_H \Delta\sigma_S^2 + \partial(k^V \partial\sigma_S^2/\partial z)/\partial z, \quad (8)$$

где k_H, k^V – коэффициенты турбулентной диффузии.

В моменты поступления данных наблюдений σ_T, σ_S корректировали по соотношениям:

$$\sigma_T^2(\bar{x}, t_n^+) = \sigma_T^2(\bar{x}, t_n^-) - \sum_{m=1}^M \Delta_m^T(\bar{x}, t_n^-) P_T(x_m - x, y_m - y), \quad (9)$$

$$\sigma_S^2(\bar{x}, t_n^+) = \sigma_S^2(\bar{x}, t_n^-) - \sum_{m=1}^M \Delta_m^S(\bar{x}, t_n^-) P_S(x_m - x, y_m - y). \quad (10)$$

Таким образом, поля T, S, σ_T, σ_S рассчитывались по уравнениям модели до моментов поступления данных наблюдений. В моменты ассимиляции осуществлялась коррекция полей T, S, P_{TT}, P_{SS} в соответствии с (1)–(10).

В качестве первого приближения в задаче предполагалось задание на всех границах условий $\partial\sigma_T^2/\partial n = 0, \partial\sigma_S^2/\partial n = 0$, а также в начальный момент времени ковариационные функции принимались равными ковариационным функциям самого поля (то есть дисперсия ошибок оценок полей температуры и солёности была равна единице).

Численный расчет проведен на горизонтальной сетке 1.64×1.64 км (27 горизонтов по вертикали). Шаг по времени составлял 96 с. При расчете коэффициентов турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали использовалась параметризация Меллора – Ямады 2.5 [14]. Коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали ($\nu^H=10^{16}$ см⁴/с, $k^H=10^{16}$ см⁴/с) и коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии дисперсии ошибок $k_H=10^5$ см²/с были выбраны экспериментально. Период интегрирования уравнений модели – 21 день (с 29 сентября по 20 октября 2016 г.). В качестве начальных условий задачи использовали полученные в предыдущих расчетах поля течений, температуры и солёности для 29 сентября 2016 г. с разрешением 1.64 км.

На поверхности моря задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоков тепла, коротковолновой радиации, осадков и испарения, полученные по данным греческого центра атмосферных прогнозов *NonHydrostatic SKIRON/Eta Modelling System* (1/10°)¹⁾. Из анализа полей ветра видно, что с 29 сентября по 15 октября наблюдались ветры различного направления с максимальной скоростью до 10 м/с, с 16 октября преобладали северо-восточные ветры с максимальной скоростью около 15 м/с.

Для анализа была выбрана гидрологическая съемка 89-го рейса НИС «Профессор Водяницкий», выполненная в северной части Черного моря в осенний сезон 2016 г. В ходе экспедиции в период с 30 сентября по 19 октября было выполнено 128 станций (рис. 1). Гидрологические характеристики измерялись с помощью комплекса *CTD SBE 911plus*. Максимальная глубина,

¹⁾ URL: <http://forecast.uoa.gr/forecastnew.php> (дата обращения: 15.10.2015).

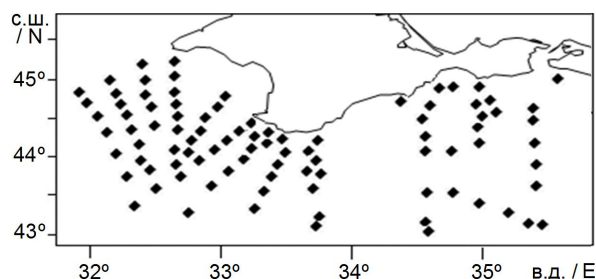


Рис. 1. Схема станций 89-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в осенний сезон 2016 г.

Fig. 1. Scheme of stations of the 89th cruise of the R/V “Professor Vodyanitsky” in autumn 2016

экспоненциального типа $\exp(-\lambda[(x-x')^2 + (y-y')^2])$ [11], где λ – размерный параметр (равный $0.016 \cdot (\Delta x)^{-2}$), выбранный на уровне значения корреляционной функции 0.1 [7]. Данные 128 станций были сгруппированы по 14 дням, и ассимиляция проводилась раз в сутки.

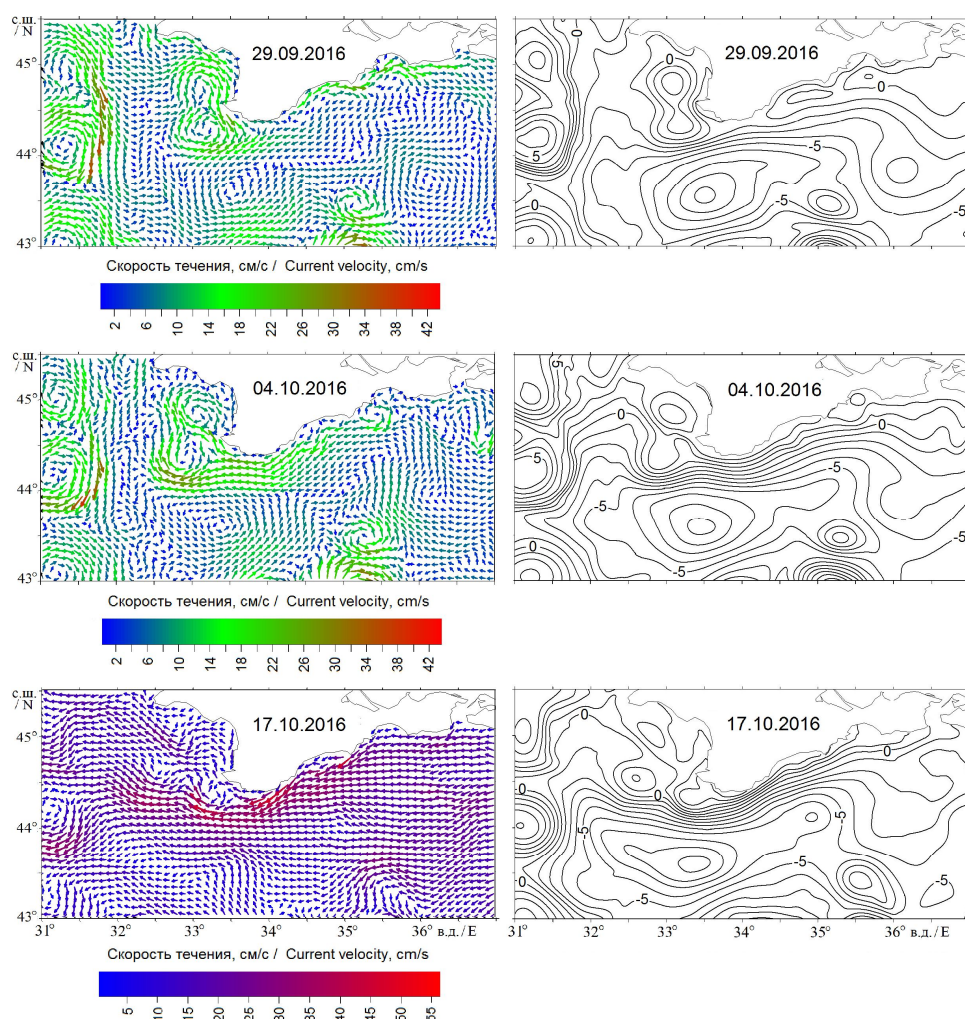
Область W , расположенная между меридианами 31 и 37° в. д. и параллелями 43 и 45.5° с. ш. (рис. 1), в которой были получены гидрологические данные, анализируется более подробно в следующем разделе.

Поля течений и уровня

В начальном поле течений были отмечены два антициклонических вихря в районе г. Севастополя и два антициклонических вихря на западе области W (наблюдались до глубины 300 м, имели радиусы около 30 км и максимальную скорость в верхнем слое до 46 см/с), антициклонический вихрь с радиусом около 20 км в верхнем слое воды вдоль восточного побережья Крыма, один циклонический и два антициклонических вихря с радиусом около 40 км на востоке области W , два циклонических вихря с радиусами около 35 км (прослеживались до глубины 100 м) в центральной части области W . На рис. 2, *a* и *b* представлены поле поверхностных течений (изображается каждая пятая стрелка) и поле уровня соответственно для 29 сентября.

Антициклонические вихри вблизи г. Севастополя и в западной части области W и циклонический вихрь между 34.5 и 35.5° в. д. сохранялись в течение всего расчетного периода и только при усилении ветрового воздействия были выражены слабее в верхнем слое. В рассматриваемый период вдоль Крымского побережья наблюдался интенсивный поток Основного Черноморского течения (ОЧТ), максимальная скорость которого достигала 55 см/с на верхнем горизонте. Поток был направлен на запад и юго-запад (например, рис. 2, *c* и *d*). Между береговой линией и ОЧТ генерировались антициклонические вихри с радиусом около 25 км (например, рис. 2, *c*). Возможный механизм – потоки различных направлений вдольберегового дрейфового течения под действием юго-западного ветра и течения с северо-востока. Все перечисленные особенности циркуляции заметны также и в поле уровня (рис. 2, *d*). Так как с 16 октября ветровое воздействие стало более интенсивным (скорость ветра составляла более 15 м/с), вихревые образования в этот период в верхнем слое воды были выражены слабее. Поле течений на верхнем горизонте для 17 октября представлено на рис. 2, *e*.

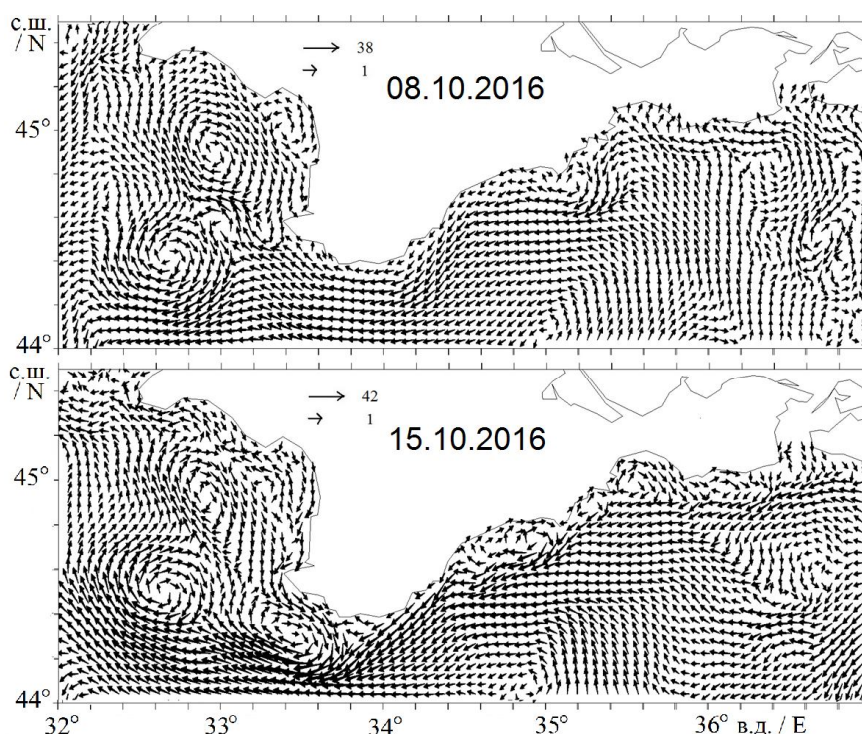
до которой проводили зондирования, изменялась от 30 до 1000 м [1, 2]. По результатам анализа статистической структуры полей (вычисления пространственных корреляционных функций полей температуры и солености) был определен радиус корреляции ~20 км. Ковариационные функции термохалинных полей аппроксимировались функцией



Р и с. 2. Поле течений (см/с) на горизонте 3 м 29 сентября (а), 4 октября (с), 17 октября (е), поле уровня (см) 29 сентября (б), 4 октября (д), 17 октября (ф)

Fig. 2. Field of currents (cm/s) at a depth of 3 m on September 29 (a), on October 4 (c), on October 17 (e), field of level (cm) on September 29 (b), on October 4 (d), on October 17 (f)

Поле течений в прибрежной зоне обладало сложной мезо- и субмезомасштабной структурой, характеризующейся вихревыми образованиями разных масштабов разного знака вращения в верхнем слое. Возможная причина формирования – набегание течения на неровности береговой линии и рельефа дна. Скорости не превышали 30 см/с, время жизни составляло не более 3 дней. Для иллюстрации приведем поля течений на верхнем горизонте (изображается каждая третья стрелка) для 8 и 15 октября (рис. 3), на которых отчетливо заметны циклонический вихрь в Каламитском заливе (рис. 3, а и б), циклонические и антициклонические вихри в восточной части (рис. 3, а) и цепочка антициклонических вихрей малого масштаба вдоль восточного побережья Крыма (например, на рис. 3, б).



Р и с . 3 . Поле течений (см/с) на горизонте 3 м 8 октября (а), поле течений (см/с) на горизонте 3 м 15 октября (б)

Fig. 3. Field of currents (cm/s) at a depth of 3 m on October 8 (a), current field (cm/s) at a depth of 3 m on October 15 (b)

Описанные модельные поля течений не противоречат полученным в [1, 2] результатам, согласно которым стрежень ОЧТ располагался над свалом глубин, максимальные скорости наблюдались у юго-западных берегов Крыма, в западной части полигона был зафиксирован Севастопольский антициклон, а на востоке съемки к югу от Феодосийского залива также прослеживался антициклонический круговорот.

Поля температуры и солёности

В начальном поле температуры (рис. 4, а, изотермы проведены через каждые 0.4 °С) в верхнем квазиоднородном слое наблюдалась температура от 21 до 22.5 °С (минимальное значение достигалось в северо-западной части области *W*, максимальное значение – в юго-западной части). В начальном поле солёности (рис. 4, д, изогалины проведены через каждые 0.2 ЕПС) в верхнем квазиоднородном слое значения изменялись от 17 до 18.2 °С (минимальное значение достигалось в северо-западной части области *W*, максимальное значение – в восточной глубоководной части). Во время расчета отмечалось охлаждение поверхностных вод до значений 17.5 °С (наблюдалось в северо-западной части) и осолонение до 18.4 ЕПС (на северо-востоке). Поля температуры и солёности на верхнем горизонте для 17 октября приведены на рис. 4, с и ф. Минимальные значения солёности (около 17 ЕПС) наблюдались в западном районе съемки вследствие распреснения

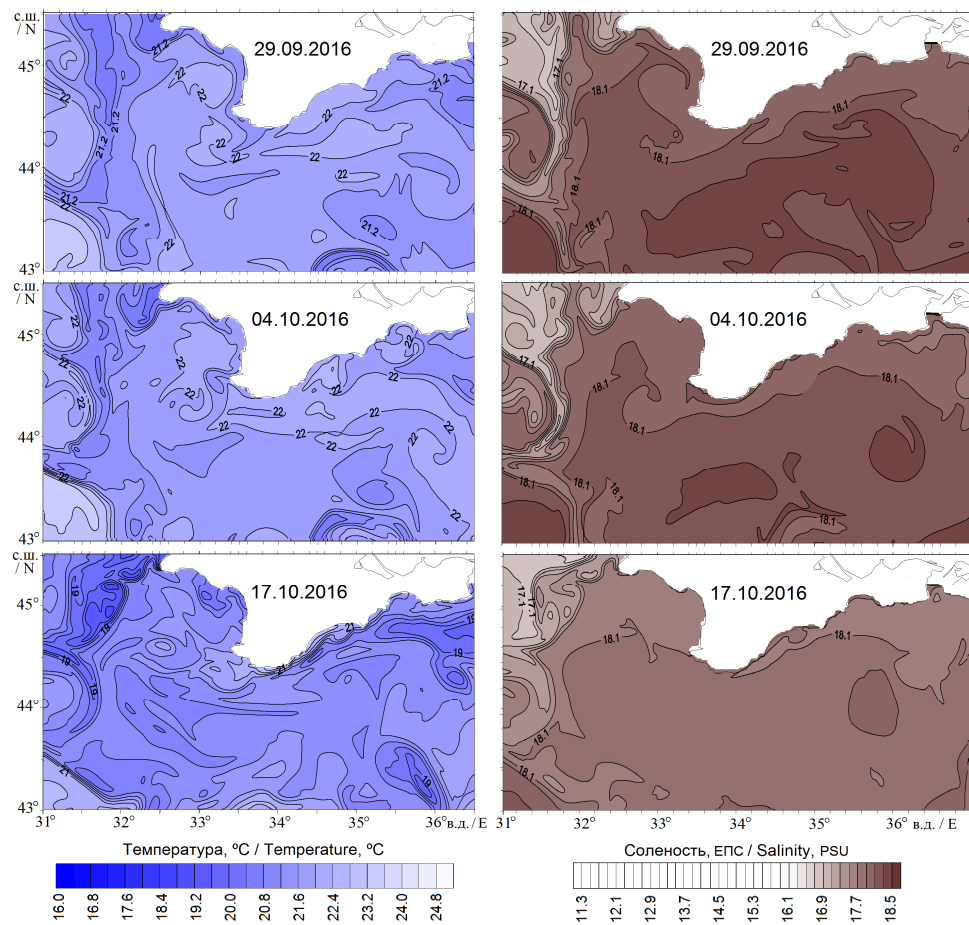


Рис. 4. Поля температуры ($^{\circ}\text{C}$) на горизонте 3 м 29 сентября (а), 4 октября (б), 17 октября (с); поля солёности (ЕПС) на горизонте 3 м 29 сентября (д), 4 октября (е), 17 октября (ф)

Fig. 4. Fields of temperature ($^{\circ}\text{C}$) at a depth of 3 m on September 29 (a), October 4 (b), October 17 (c); fields of salinity (PSU) at a depth of 3 m on September 29 (d), October 4 (e), October 17 (f)

на северо-западном шельфе Черного моря. Формировались зоны пониженной и повышенной (относительно прилегающих вод) температуры, которые могли быть связаны с особенностями в полях течений. Отмечено соответствие антициклонических образований зонам с более теплой распресненной водой. В качестве иллюстрации приведем поля температуры и солёности для 4 октября и 17 октября 2016 г. В районе г. Ялты и в западной части, где сформировались антициклонические вихри (рис. 2, б), 4 октября температура воды составляла более 22°C , солёность – менее 18.1 ЕПС (рис. 4, б и е), при этом 17 октября в области формирования вихрей у Крымского побережья (рис. 2, с) температура воды составляла более 21°C , а солёность – менее 18.2 ЕПС (рис. 4, с и ф).

По результатам расчета максимальная глубина слоя скачка составляла около 30 м в прибрежной зоне и около 10 м в открытой глубоководной части.

Перепад температур составлял 10–12 °С. Минимальные значения глубины холодного промежуточного слоя (около 40 м) в области *W* наблюдались на западе и юге, максимальные (около 80 м) – на востоке. Температура холодного промежуточного слоя повышалась от 8.3 °С в западной части области *W* до 8.5 °С в районе свала глубин.

Описанные модельные термохалинные поля не противоречат результатам, полученным в [1, 2], согласно которым в зоне антициклонов на поверхности прослеживалось повышение температуры, понижение солёности, увеличение глубины залегания нижней границы верхнего квазиоднородного слоя и ядра холодного промежуточного слоя.

Для оценки отклонения численных расчетов гидрофизических полей от наблюдаемых данных проводился расчет модулей средних и среднеквадратических ошибок оценки полей температуры и солёности в моменты поступления данных на различных горизонтах в процессе интегрирования уравнений модели. Наибольшие значения модулей ошибок оценки полей наблюдались в слое скачка. Со временем на всех горизонтах значения модулей убывали. Таким образом, учет данных наблюдений позволил воспроизвести структуру пикноклина, близкую к наблюдаемой.

Выводы

Непрерывные по времени и пространству поля течений, уровня, температуры и солёности Черного моря рассчитаны в осенний период 2016 г. с помощью трехмерной нелинейной гидродинамической модели с усвоением гидрологических данных 89-го рейса НИС «Профессор Водяницкий».

В этот период наблюдался интенсивный поток ОЧТ вдоль Крымского побережья с максимальной скоростью до 55 см/с, направленный на запад и юго-запад. Между береговой линией и течением генерировались антициклонические вихри с радиусом около 25 км. По результатам расчета наблюдались антициклонические вихри вблизи г. Севастополя в западной части рассмотренной области *W* (прослеживались до глубины 300 м, имели радиусы около 30 км и максимальную скорость в верхнем слое до 46 см/с), в восточной части области *W* отмечен один циклонический и два антициклонических вихря с радиусом около 40 км, а в центральной ее части – два циклонических вихря с радиусами около 35 км (прослеживались до глубины 100 м). При интенсивном ветровом воздействии вихревые образования в верхнем слое воды были выражены слабее.

В поле течений в прибрежной зоне восстановлены вихревые образования разных масштабов разного знака вращения, формирующиеся при обтекании течением неровностей береговой линии и рельефа дна (циклонический вихрь в Каламитском заливе, циклонические и антициклонические вихри в восточной части, цепочка антициклонических вихрей малого масштаба вдоль восточного побережья Крыма).

Глубина слоя скачка составляла около 30 м в прибрежной области и около 10 м в глубоководной части, перепад температур достигал 10–12 °С. Формирование зон пониженной и повышенной (относительно прилегающих вод) температуры могло быть связано с особенностями в полях течений (отмечено соответствие антициклонических образований зонам с более теплой распресненной водой).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрологические исследования в северной части Черного моря в 2016 г. (87, 89 и 91-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 3. С. 247–253. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-247-253
2. Особенности сезонной и синоптической изменчивости структуры вод в зоне Основного черноморского течений в осенне-зимний период 2016 г. / Ю. В. Артамонов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 1. С. 32–43. doi:10.22449/2413-5577-2018-1-32-43
3. Усвоение гидрологических наблюдений для расчета течений в морях и океанах / В. В. Кныш [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 67–85.
4. *Залесный В. Б., Ивченко В. О.* Моделирование крупномасштабной циркуляции морей и океанов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 3. С. 295–308. <https://doi.org/10.7868/S0002351515030141>
5. Вариационная ассимиляция данных наблюдений в математической модели динамики Черного моря / В. И. Агошков [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 6. С. 585–599. doi:10.22449/0233-7584-2019-6-585-599
6. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей Мирового океана / А. А. Зеленко [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 4. С. 501–513. <https://doi.org/10.7868/S0002351516040143>
7. *Демьшев С. Г., Евстигнеева Н. А.* Анализ гидрофизических полей на северо-западном шельфе Черного моря // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 581–595. <https://doi.org/10.7868/S0030157413040023>
8. Анализ динамических и энергетических характеристик циркуляции вод у берегов Западного Крыма на основе ассимиляции данных наблюдений в численной модели динамики Черного моря / С. Г. Демьшев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 1. С. 23–40. doi:10.22449/0233-7584-2021-1-23-40
9. *Демьшев С. Г.* Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 137–149.
10. *Arakawa A.* Computational design for long-term numerical integration of the equations of fluid motion: Two-dimensional incompressible flow. Part I // Journal of Computational Physics. 1966. Vol. 1, iss. 1. P. 119–143. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(66\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(66)90015-5)
11. *Кныш В. В., Моисеенко В. А., Чернов В. В.* Некоторые результаты четырехмерного анализа гидрофизических полей в Тропической Атлантике // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24, № 7. С. 744–752.
12. *Демьшев С. Г., Кортаев Г. К.* Численные эксперименты по четырехмерному усвоению данных наблюдений в Черном море в июне 1984 г. на основе численной энергосбалансированной модели // Морской гидрофизический журнал. 1992. № 3. С. 21–33.
13. Применение метода адаптивной статистики для реанализа полей Черного моря с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солёности в модели / Г. К. Кортаев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 1. С. 40–56. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-40-56
14. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Reviews of Geophysics. 1982. Vol. 20, № 4. P. 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>

Об авторе:

Евстигнеева Наталья Александровна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 826-959**, **ORCID ID: 0000-0002-8636-7289**, **Scopus Author ID: 55236367400**, *naevstigneeva@yandex.ru*

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A., Alekseev, D.V., Fedirko, A.V., Shutov, S.A., Kolmak, R.V., Shapovalov, R.O. and Shcherbachenko, S.V., 2018. Hydrological Research in the Northern Part of the Black Sea in 2016 (87th, 89th and 91st Cruises of R/V Professor Vodyanitsky). *Physical Oceanography*, 25(3), pp. 229–234. doi:10.22449/1573-160X-2018-3-229-234
2. Artamonov, Yu.V., Alekseev, D.V., Skripaleva, E.A., Shutov, S.A., Deriushkin, D.V., Zavyalov, D.D., Kolmak, R.V., Shapovalov, R.O., Shapovalov, Yu.I., Fedirko, A.V. and Shcherbachenko, S.V., 2018. Peculiarities of Seasonal and Synoptic Variability of Water Structure in the Zone of the Rim Current at Autumn and Winter 2016. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones*, (1), pp. 32–43. doi:10.22449/2413-5577-2018-1-32-43
3. Knysh, V.V., Korotaev, G.K., Mizyuk, A.I. and Sarkisyan, A.S., 2012. Assimilation of Hydrological Observation Data for Calculating Currents in Seas and Oceans. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 48(1), pp. 57–73. <https://doi.org/10.1134/S0001433812010057>
4. Zalesny, V.B. and Ivchenko, V.O., 2015. Simulating Large-Scale Circulation in Seas and Oceans. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 51(3), pp. 259–271. <https://doi.org/10.1134/S0001433815030135>
5. Agoshkov, V.I., Shutyaev, V.P., Parmuzin, E.I., Zakharova, N.B., Sheloput, T.O. and Lezina, N.R., 2019. Variational Data Assimilation in the Mathematical Model of the Black Sea Dynamics. *Physical Oceanography*, 26(6), pp. 515–527. doi:10.22449/1573-160X-2019-6-515-527
6. Zelenko, A.A., Vil'fand, R.M., Resnyanskii, Yu.D., Strukov, B.S., Tsyulnikov, M.D. and Svirenko, P.I., 2016. An Ocean Data Assimilation System and Reanalysis of the World Ocean Hydrophysical Fields. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 52(4), pp. 443–454. <https://doi.org/10.1134/S0001433816040149>
7. Demyshev, S.G. and Evstigneeva, N.A., 2013. Numerical Analysis of Hydrophysical Fields on the Northwestern Shelf of the Black Sea. *Oceanology*, 53(5), pp. 511–525. <https://doi.org/10.1134/S0001437013040024>
8. Demyshev, S.G., Evstigneeva, N.A., Alekseev, D.V., Dymova, O.A. and Miklashevskaya, N.A., 2021. Analysis of the Dynamic and Energy Characteristics of Water Circulation near the Western Crimea Coast and in the Sevastopol Region Based on the Observational Data Assimilation in the Numerical Model of the Black Sea Dynamics. *Physical Oceanography*, 28(1), pp. 20–36. doi:10.22449/1573-160X-2021-1-20-36
9. Demyshev, S.G., 2012. A Numerical Model of Online Forecasting Black Sea Currents. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 48(1), pp. 120–132. <https://doi.org/10.1134/S0001433812010021>

10. Arakawa, A., 1966. Computational Design for Long-Term Numerical Integration of the Equations of Fluid Motion: Two-Dimensional Incompressible Flow. Part I. *Journal of Computational Physics*, 1(1), pp. 119–143. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(66\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(66)90015-5)
11. Knysh, V.V., Moiseenko, V.A. and Chernov, V.V., 1988. Some Results of Four-Dimensional Analysis of Hydrophysical Fields in the Tropical Atlantic. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 24 (7), pp. 744–752.
12. Demyshev, S.G. and Korotaev, G.K., 1992. [Numerical Experiments on Four-Dimensional Assimilation of Observational Data in the Black Sea in June 1984 Based on a Numerical Energy-Balanced Model]. *Marine Hydrophysical Journal*, (3), pp. 21–33.
13. Korotaev, G.K., Knysh, V.V., Lishaev, P.N. and Demyshev, S.G., 2018. Application of the Adaptive Statistics Method for Reanalysis of the Black Sea Fields including Assimilation of the Temperature and Salinity Pseudo-Measurements in the Model. *Physical Oceanography*, 25(1), pp. 36–51. doi:10.22449/1573-160X-2018-1-36-51
14. Mellor, G.L. and Yamada, T., 1982. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4), pp. 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>

About the author:

Natalia A. Evstigneeva, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **SPIN-code: 826-959**, **ORCID ID: 0000-0002-8636-7289**, **Scopus Author ID: 55236367400**, naevstigneeva@yandex.ru

The author has read and approved the final manuscript.