

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА


УДК 551.465

DOI: 10.22449/0233-7584-2021-4-423-435

Оценка климатических полей температуры и солёности вод Черного моря для современного периода (1991–2020)

Н. В. Маркова , В. Н. Белокопытов, О. А. Дымова,
Н. А. Миклашевская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 n.v.markova@mail.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г, после доработки – 16.03.2021 г.

Цель. Основной целью исследования является оценка нового массива климатических полей температуры и солёности вод Черного моря, рассчитанных по данным гидрологических наблюдений, для современного стандартного 30-летнего климатического периода 1991–2020 гг. (по определению Всемирной метеорологической организации для расчета климатических норм).

Методы и результаты. Оценка нового массива климатических температуры и солёности проводилась на основе анализа результатов численных экспериментов. В эксперименте численной моделью воспроизводился годовой ход гидрофизических полей Черного моря, при расчете использовалась схема ассимиляции данных оцениваемого массива температуры и солёности. В отличие от осредненных данных натуральных наблюдений получаемые модельные поля были согласованы с точки зрения уравнений движения морской среды. Кроме трехмерных полей температуры и солёности моделью воспроизводились трехмерные климатические поля течений Черного моря на каждые сутки года, что невозможно осуществить только по данным инструментальных измерений. Выполнен анализ пространственно-временной изменчивости воспроизведенных моделью трехмерных полей, исследованы интегральные характеристики динамики вод Черного моря за современный 30-летний климатический период и сопоставлены с аналогичными характеристиками за предыдущее столетие. Для проведения численного моделирования использована трехмерная нелинейная модель динамики Черного моря, разработанная в Морском гидрофизическом институте. Моделирование проводилось на сетке с горизонтальным разрешением 5 км с использованием батиметрии *EMODNet*. Результаты анализа проведенных расчетов показали, что увеличение пространственного разрешения климатического массива температуры и солёности в современный период позволило более детально воспроизвести динамику вод Черного моря во всех его слоях. Вместе с тем в полях солёности присутствовала существенная мелкомасштабная изменчивость, наиболее выраженная на глубоководных горизонтах.

Выводы. По сравнению с расчетом с усвоением предыдущего варианта климатического массива температуры и солёности в воспроизводимых моделью полях отмечено увеличение интегральной температуры верхнего перемешанного слоя с угончением и «разрывом» холодного промежуточного слоя в центральной части моря, что говорит о потеплении верхнего слоя вод в последние 30 лет. Наибольшая зашумленность, выявленная на глубоководных горизонтах в воспроизводимых полях солёности в эксперименте с ассимиляцией нового массива климатических полей, связана с количеством и качеством данных о солёности, получаемых в ходе натуральных наблюдений. С учетом недостаточного метрологического обеспечения измерений электропроводности морской воды для следующей версии климатического массива необходима более строгая процедура проверки и фильтрации данных наблюдений в глубинных слоях.

Ключевые слова: климатические поля, моделирование, ассимиляция, Черное море, температура, солёность, течения

Благодарности: численные эксперименты по расчету динамики Черного моря выполнены в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0003. Обработка


© Маркова Н. В., Белокопытов В. Н., Дымова О. А., Миклашевская Н. А., 2021

и анализ результатов выполнены в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0004.

Для цитирования: Оценка климатических полей температуры и солености вод Черного моря для современного периода (1991–2020) / Н. В. Маркова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 423–435. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-423-435

Assessment of the Black Sea Temperature and Salinity Climatic Fields for the Recent Climatological Period (1991–2020)

N. V. Markova , V. N. Belokopytov, O. A. Dymova,
N. A. Miklashevskaya

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 n.v.markova@mail.ru

Purpose. The study is aimed at assessing a new climatic array of the Black Sea temperature and salinity calculated using hydrological observations for the standard (according to the World Meteorological Organization definition) 30-year climatological period 1991–2020.

Methods and Results. New array of the temperature and salinity climatic fields was assessed based on analyzing the results of numerical experiments. In the experiment, annual variation of the Black Sea hydrophysical parameters was reproduced by the numerical model. Modeling included the scheme of assimilating the data of the climatic temperature and salinity array assessed. In contrast to the averaged data of the field observations, the model fields were matched from the viewpoint of the motion equations. Besides the temperature and salinity three-dimensional fields, the three-dimensional climatic fields of the Black Sea currents were also reproduced for each day of a climatic year that is quite impossible using the instrumental measurements data only. Spatial-temporal variability of the modeled three-dimensional fields was analyzed. The integral characteristics of the Black Sea water dynamics for the recent 30-year climatic period were studied and compared with the analogous ones for the previous century. Simulation was performed at the grid with the 5 km horizontal resolution using the *EMODNet* bathymetry by means of the three-dimensional non-linear model of the Black Sea dynamics developed in Marine Hydrophysical Institute. Having been analyzed, the performed calculations showed that the increased spatial resolution of the temperature and salinity climatic array for the recent period made it possible to reproduce dynamics in all the layers of the Black Sea waters in more details. At the same time, a significant small-scale variability, most pronounced at the deep-water horizons, was present in the salinity fields.

Conclusions. As compared to the experiment with assimilation of the previous version of the climatic array, the modeling based on the new array of the thermohaline fields revealed increase in the integral temperature of the upper mixed layer. At that, thinning and «break» of the cold intermediate layer found in the central part of the sea, indicates warming of the sea upper layer during the last 30 years. The highest noisiness detected at the deep-water horizons in the modeled salinity fields is related to quantity and quality of the salinity data resulted from the field observations. Taking into account insufficient metrological facilities for measuring seawater electrical conductivity, the next version of climatic array requires a more strict procedure for verifying and processing the observation data obtained in the deep-sea layers.

Keywords: climatic fields, modeling, assimilation, Black Sea, temperature, salinity, currents

Acknowledgments: numerical experiments on modeling of the Black Sea dynamics were carried out within the framework of the state task on theme No. 0555-2021-0003. The experiment results were processed and analyzed within the framework of the state task on theme No. 0555-2021-0004.

For citation: Markova, N.V., Belokopytov, V.N., Dymova, O.A. and Miklashevskaya, N.A., 2021. Assessment of the Black Sea Temperature and Salinity Climatic Fields for the Recent Climatological Period (1991–2020). *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(4), pp. 392-403. doi:10.22449/1573-160X-2021-4-392-403

Введение

Методика воспроизведения климатических полей Черного моря на основе ассимиляции в численной модели среднемноголетних данных натуральных наблюдений уже отработана. В численной модели Морского гидрофизического института (далее – модель МГИ) [1] с усвоением натуральных наблюдений ранее рассчитывались климатические поля температуры, солёности, скоростей течений и уровня Черного моря на сетке 15 км по горизонтали [2–6], позднее – на сетке с разрешением 5 км [7]. Периодичность ассимиляции данных наблюдений в модели МГИ при расчетах климатических полей подробно исследована в работе [8].

Изменение ассимилируемого массива данных может повлечь существенные изменения в воспроизводимых численной моделью гидрофизических полях [4, 5]. Как правило, этот эффект связан с увеличением количества данных гидрологических наблюдений, формирующих ассимилируемый массив (далее в тексте – массив ГК («гидрологический климат»)). На рассматриваемом этапе (1991–2020 гг.) существенно повысился технический уровень средств измерений, возросла точность получаемых данных. Вместе с тем изменилась организация наблюдений в открытом море, сократилось количество судовых океанографических съёмок, выполняемых по заранее спланированным схемам экспедиционных работ. Постепенно основными измерительными платформами становятся автономные дрейфующие буи-профилемеры, траектории которых полностью определяются текущим полем течений. Это влечет за собой изменения в пространственном распределении количества данных, в соотношении инструментальной и систематической погрешностей, а также в других факторах, влияющих на результаты климатических расчетов.

Оценку качества формируемого массива ГК можно провести путем анализа результатов моделирования, выполненного с усвоением содержащихся в массиве климатических данных. Для этого необходимо исследовать интегральные характеристики динамики морской среды и пространственно-временную изменчивость трехмерных гидрофизических полей Черного моря, воспроизведенные численной моделью. В настоящей работе таким способом выявляются особенности массива трехмерных климатических полей температуры и солёности вод Черного моря, построенного по данным гидрологических наблюдений для нового 30-летнего климатического периода 1991–2020 гг. (далее – ГК30). Анализ особенностей гидрофизических полей проводится в сопоставлении с результатами расчета климата моря с усвоением предыдущего варианта ГК-массива, построенного на основе гидрологических данных за почти 100-летний период 1910–2003 гг. (далее – ГК100). По итогам численных экспериментов выясняется влияние изменения ассимилируемого массива данных температуры и солёности на воспроизведение моделью климатической циркуляции в Черном море.

Методика расчета и используемые данные

Численные эксперименты проводились на основе модели МГИ [1] по схеме, представленной в работе [7]. Модель МГИ базируется на полных уравнениях термогидродинамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики. Возвышение свободной поверхности рассчитывается в предположении

выполнения линеаризованного кинематического условия. Плотность нелинейно зависит от температуры и солёности, уравнение состояния приведено в работе [9]. На дне ставятся условия непротекания и отсутствия потоков тепла и соли, трение о дно не учитывается. На твердых боковых участках границы выполняются условия скольжения и непротекания, для температуры и солёности задается равенство нулю нормальных производных. В устьях рек и проливах ставятся условия Дирихле для температуры, солёности и скорости. На свободной поверхности задаются вектор касательных напряжений трения ветра [6], потоки тепла [10] и влаги [11].

В отличие от работы [7] при расчетах использована более точная батиметрия *EMODNet* (URL: <https://www.emodnet-bathymetry.eu>). Вертикальное турбулентное перемешивание описывалось с помощью параметризации Пакановски – Филандера [12]. Горизонтальная турбулентная вязкость и диффузия представлены бигармоническими операторами с постоянными коэффициентами, равными 10^{17} см⁴/с. Конечно-разностная аппроксимация уравнений модели МГИ реализована на сетке *C* по терминологии Аракавы [13]. Пространственное разрешение по горизонтали составляло 5 км, что соответствует $(1/16)^\circ$ по долготе и $(1/23)^\circ$ по широте. По вертикали задано 38 расчетных горизонтов со сгущением в верхнем слое. Версия модели МГИ с разрешением 5 км была валидирована на основе натуральных данных в ходе международного научного проекта *MyOcean* [14] и используется в системе оперативного прогноза состояния Черного моря [15].

Согласно схеме, апробированной в [8] и использованной в [7], на каждом 40-м шаге по времени в модели усваивались интерполированные в узлы расчетной сетки поля температуры и солёности из массива ГК. Усвоение ГК-полей происходило путем включения в правые части уравнений адвекции – диффузии тепла и соли дополнительного ассимиляционного слагаемого, зависящего от разности слагаемых модельных и ГК-значений:

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = -k^H \nabla^4 T + (k^T T_z)_z + \Lambda(T^{cl} - T),$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = -k^H \nabla^4 S + (k^S S_z)_z + \Lambda(S^{cl} - S),$$

где T – температура; S – солёность; u, v, w – компоненты скорости; k^H – коэффициент горизонтальной диффузии; k^T – коэффициент диффузии тепла по вертикали; k^S – коэффициент диффузии соли по вертикали; T^{cl}, S^{cl} – ассимилируемые значения температуры и солёности из ГК-массива. Структура коэффициента при ассимиляционном слагаемом была аналогична приведенной в работе [3]: $\Lambda = [1/(Rel(1 + \eta^2(z)))]\delta(t - t^a)$, где Rel – время релаксации; $\eta^2(z)$ – дисперсия ошибок измерений, нормированная на дисперсию поля; δ – управляющий параметр ($\delta = 0$ в период релаксации, $\delta = 1$ в момент ассимиляции данных наблюдений); t^a – момент усвоения данных наблюдений.

На основе модели МГИ проведено два численных эксперимента, продолжительность счета в каждом составила 18 модельных лет. Первый численный эксперимент (назовем его Э100) проводился с ассимиляцией массива ГК100,

рассчитанного по гидрологическим данным за период 1910–2003 гг.*. Второй эксперимент (Э30) выполнен при тех же настройках модели, но с использованием для ассимиляции нового климатического массива температуры и солености ГК30, построенного на основе методики реанализа термохалинных полей [16] за 30-летний период 1991–2020 гг. В начальный момент времени в обоих расчетах компоненты скорости приравнялись нулю, а поля температуры и солености соответствовали их ГК-распределению. Режим циркуляции с годовым периодом устанавливался примерно через 4000 суток от начала счета. Для оценки результатов моделирования в данной работе рассматривается период с 6252-х по 6616-е сутки (18-й год) счета.

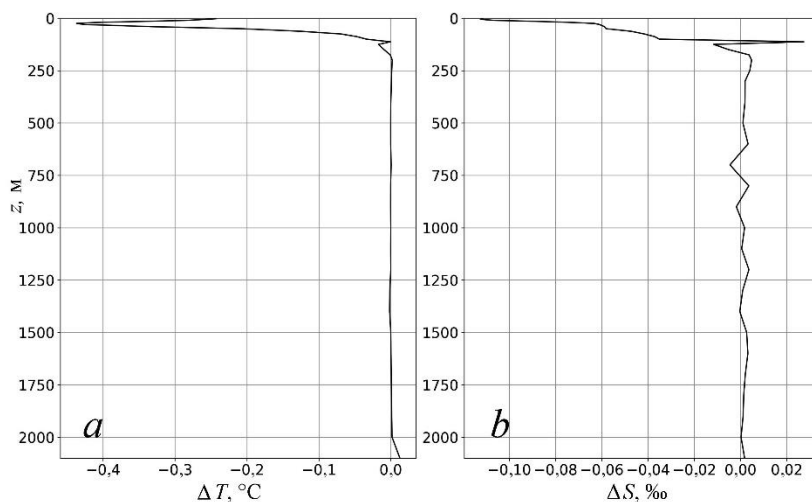
Ассимилируемые массивы ГК100 и ГК30 существенно отличаются по периоду осреднения, количеству станций, горизонтальному и вертикальному пространственному разрешению, методике расчета. ГК100 основан на 130 тыс. гидрологических станций, осредненных на комбинированной сетке $20 \times 30'$ и $40 \times 60'$ (в зависимости от обеспеченности данными). ГК30 рассчитан на сетке $10 \times 15'$ с использованием 25 тыс. станций, из которых 6 тыс. – профили буев *ARGO*. Более длительный период осреднения, большее количество станций и более низкое пространственное разрешение заведомо обеспечивают более гладкие климатические распределения в ГК100. Главные цели создания ГК30 – отразить современные океанографические условия в Черном море и уточнить пространственную структуру представляемых термохалинных полей, в том числе в глубинных слоях.

ГК-поля температуры и солености были линейно интерполированы в узлы сетки модели, затем по среднемесячным данным восстановлены поля на каждые сутки года. Для сопоставления друг с другом данные полученных массивов осреднялись по горизонтам и рассчитывалась разница (отклонения) между ними: для температуры $\Delta T = T^{ГК100} - T^{ГК30}$, для солености ΔS – аналогично.

Анализ результатов

На рис. 1 показаны среднегодовые профили разницы температуры и солености между сравниваемыми ГК-массивами. В верхнем 100-метровом слое значения термохалинных параметров из ГК30 превышали соответствующие значения из ГК100. Для солености выделялся пик на горизонте 112,5 м, где ее величины в ГК100 были больше, чем в ГК30, на 0,02‰, что, вероятнее всего, связано с повышением вертикального разрешения в ГК30. В слое 250–2000 м средняя по горизонтам температура была практически одинакова (рис. 1, *a*), тогда как для солености в слое 500–1500 м наблюдались отклонения между ГК100 и ГК30 с разным знаком (рис. 1, *b*). При сопоставлении среднемесячных значений выявлено, что наибольшая разница между величинами температуры достигает 2,32°C на горизонте 2,5 м в мае (при максимальной скорости прогрева верхнего слоя моря), а между величинами солености эта разница составляет 0,24‰ на горизонте 5 м в январе.

* Белокопытов В. Н. Термохалинная и гидролого-акустическая структура вод Черного моря : дисс. ... канд. геогр. наук. Севастополь, 2004. 160 с.



Р и с. 1. Изменение с глубиной среднегодовой разницы между данными ГК100 и ГК30: *a* – температуры (ΔT); *b* – солености (ΔS)

F i g. 1. Change of average annual difference between the HC100 and HC30 data with depth: *a* – temperature (ΔT); *b* – salinity (ΔS)

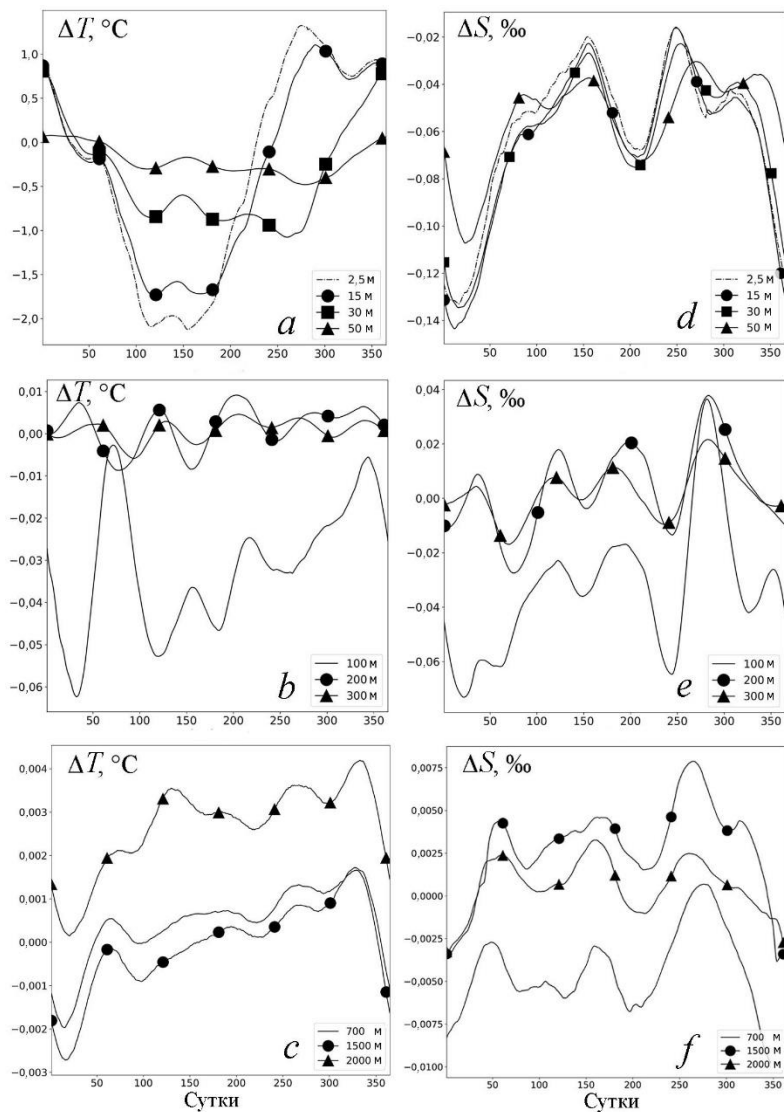
На рис. 2 представлено изменение в течение года средней по горизонтам разницы между модельными значениями температуры и солености в экспериментах Э100 и Э30. Анализ отклонений *температуры* показал, что в верхнем 30-метровом слое наблюдались три экстремума: в декабре – январе, в мае и в сентябре (рис. 2, *a*).

На горизонте 50 м экстремумы достигались в те же периоды, однако количественные отличия между Э100 и Э30 здесь были меньше на порядок относительно полученных для верхнего 30-метрового слоя. На нижней границе холодного промежуточного слоя (ХПС), в частности на всем горизонте 100 м, разница температур отрицательна, это означает, что модельная температура в Э30 выше, чем в Э100. Минимальное по модулю отклонение $0,003^{\circ}\text{C}$ отмечено в марте, максимальное $0,062^{\circ}\text{C}$ – в феврале. В слое 200–300 м отклонения находились в пределах $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, *b*). В глубинных слоях, на горизонтах более 700 м (рис. 2, *c*), сезонные кривые качественно похожи, абсолютная разница не превышала тысячных долей градуса, а экстремальные значения достигались в декабре – январе.

В течение года разница в значениях *солености* в слое 2,5–100 м отрицательная, т. е. средняя соленость в эксперименте Э30 оказалась выше. До глубин 50 м поведение кривых практически одинаковое (рис. 2, *d*), с наибольшими по модулю отклонениями в декабре – январе и в июне.

На горизонте 100 м в конце января и в сентябре соленость выше по данным Э30, в октябре – по результатам Э100. В слое 200–300 м отличия в солености находились в диапазоне $-0,02 \dots 0,04\text{‰}$ (рис. 2, *e*). На горизонте 700 м соленость по данным Э30 выше, чем по данным Э100, за исключением октября. Глубже горизонта 1500 м в декабре – январе соленость по данным Э30 выше, в остальную часть года значения по данным Э100 превышали соответствующие

щие значения в Э30 (рис. 2, *f*). Таким образом, анализ расчетных данных показал, что при усвоении нового массива ГК30 получаемые в Э30 модельные температура и соленость на разных горизонтах отличались от соответствующих значений в Э100 как в большую, так и в меньшую сторону.

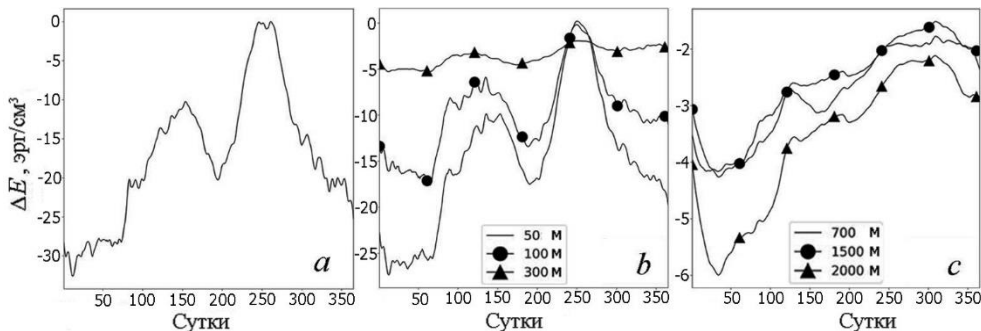


Р и с. 2. Сезонный ход разницы температуры и солености между данными Э100 и Э30: *a, d* – в слое 2,5–50 м; *b, e* – в слое 100–300 м; *c, f* – в слое 700–2000 м

Fig. 2. Seasonal variation of the differences between the E100 and E30 temperature and salinity data: *a, d* – in the layer 2.5–50 m; *b, e* – in the layer 100–300 m; *c, f* – in the layer 700–2000 m

Изменение со временем разницы *плотности кинетической энергии*, характеризующей интенсивность течений, показало, что по данным Э30 во всем объеме скорости течений выше, чем по результатам Э100. Максимальные по

модулю отклонения наблюдались зимой, минимальные – в сентябре на горизонтах до 300 м (рис. 3, *a, b*). На глубинах более 700 м максимальная разница значений плотности кинетической энергии достигалась в феврале, минимальная – в ноябре (рис. 3, *c*). Отличия в интенсивности течений были подтверждены также анализом карт течений на различных горизонтах.



Р и с. 3. Сезонный ход разницы плотности кинетической энергии между данными Э100 и Э30: *a* – на горизонте 2,5 м; *b* – в слое 50–300 м; *c* – в слое 700–2000 м

F i g. 3. Seasonal variation of the difference between the E100 and E30 kinetic energy density data: *a* – at the 2.5 m horizon; *b* – in the layer 50–300 m; *c* – in the layer 700–2000 m

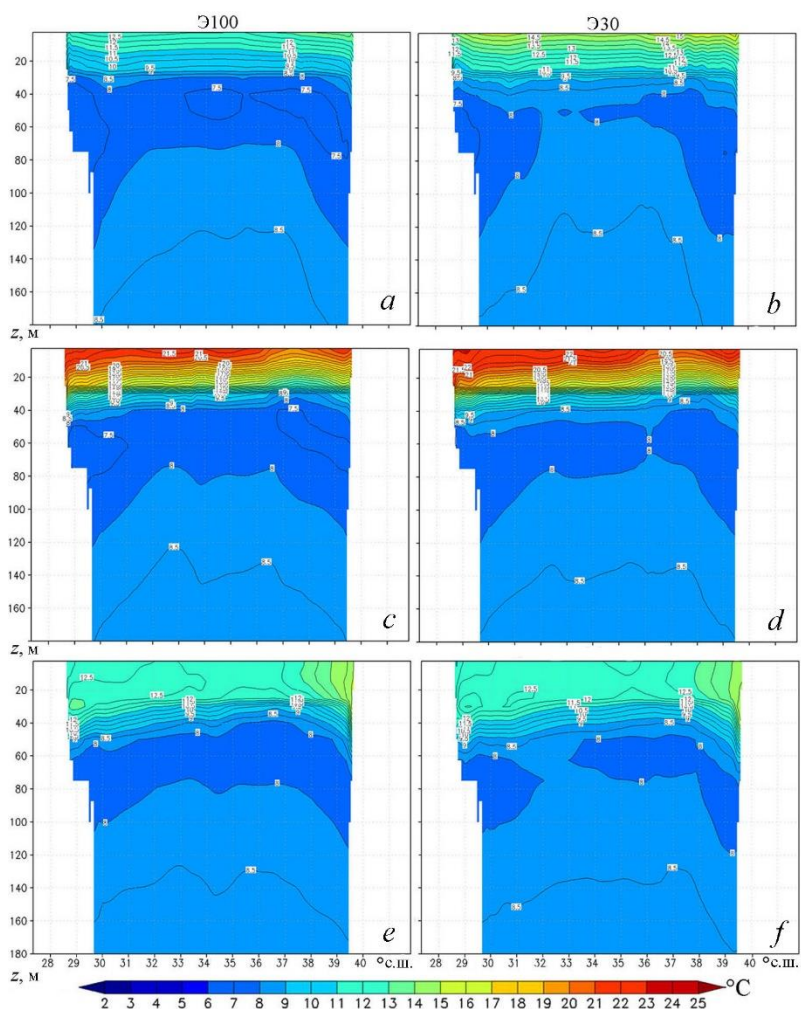
Анализ пространственного распределения гидрофизических характеристик, полученных по результатам численного моделирования, показал следующее.

Температура. По результатам Э30 в начале года в поверхностном слое температура ниже, чем по данным Э100, примерно на 1°C. С середины января до середины марта пространственное распределение температуры в Э30 и Э100 отличалось незначительно. С середины марта температура в Э30 выше, чем в Э100: в этот период в Э30 происходил более быстрый прогрев вод поверхностного слоя. При этом разница в значениях температуры в восточной части моря и на северо-западном шельфе (СЗШ) достигала 2°C. Такие особенности отмечались до начала августа. В конце лета наибольшие отличия зафиксированы в западной и юго-восточной частях моря. Минимальная разница между результатами проведенных экспериментов установлена в августе. С сентября в Э30 воды были холоднее уже примерно на 1°C и охлаждались быстрее, чем в Э100.

Существенные различия в результатах моделирования полей температуры отмечались в слое 30–50 м. В январе – феврале наибольшая разница (до 2°C) была характерна для района СЗШ. В апреле в указанном слое разница в значениях температуры в районе Севастопольского антициклона составляла ~1°C. Согласно Э30, отмечался более быстрый весенний прогрев, особенно вдоль северо-западной части материкового склона. К середине июля пространственное распределение температуры в слое 30–50 м по результатам Э100 и Э30 стало качественно подобным, однако в Э30 ее значения были все же на 0,5–1°C выше. К середине сентября западная часть моря в Э30 оказалась прогретой сильнее по сравнению с Э100 примерно на 1°C.

С конца ноября в Э30 фиксировалось более быстрое понижение температуры, особенно в районе СЗШ: в среднем на горизонте 30 м в Э30 температура была ниже примерно на 1°C, при этом на горизонте 50 м данные по Э30 и Э100 качественно и количественно были сходными. На глубине 100 м в течение года отличия в температуре между Э100 и Э30 незначительные. На горизонте 500 м в Э30 выделялась более обширная область вод с температурой, превышающей 8,883°C. Глубже уже не было существенной разницы и заметной детализации структуры поля температуры в Э30 по сравнению с Э100.

На рис. 4 показано уточнение и «разрыв» ХПС (по критерию 8°C) в центральной части моря и увеличение температуры верхнего перемешанного слоя в Э30 по сравнению с Э100. Это свидетельствует об увеличении теплозапаса верхнего слоя моря в последние 30 лет.

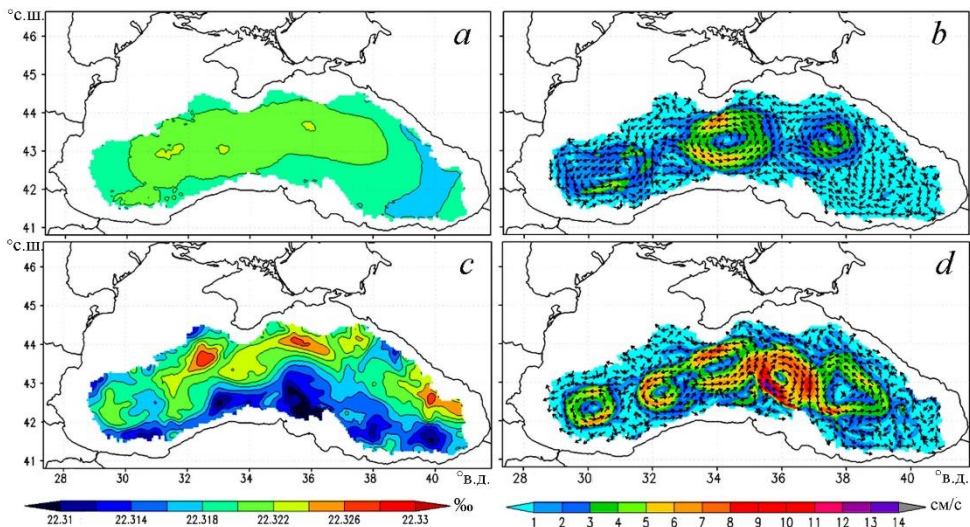


Р и с. 4. Температура в слое 0–180 м на разрезе вдоль 43,6° с. ш. по данным Э100 (слева) и Э30 (справа), рассчитанная на 7 мая (*a, b*), 2 августа (*c, d*), 18 ноября (*e, f*)

Fig. 4. Temperature in the layer 0–180 m on the section along 43.6°N according to the E100 (left) and E30 (right) data, calculated for May, 7 (*a, b*), August, 2 (*c, d*) and November, 18 (*e, f*)

Соленость. В слое 2,5–5 м в течение всего года в центральной части моря воды с соленостью, превышающей 18,3‰, занимали большую площадь в эксперименте Э30 по сравнению с Э100. С января до середины марта максимальные значения солености в Э30 составили 18,6‰, в Э100 – не превышали 18,4‰. Наименьшая разница в значениях солености между результатами экспериментов зафиксирована в весенне-летний сезон в слое 30–50 м. В восточной части моря отличия были максимальными – до 0,2‰ в зимний период. В Э30 в течение года в центре моря наблюдались более соленые воды по сравнению с Э100. При этом на СЗШ в Э30 воды имели меньшую соленость, разница значений составляла ~0,15‰.

На горизонтах 100–500 м поля солености в Э100 и Э30 качественно почти не отличались. Основные различия наблюдались в зоне материкового склона, в районах с интенсивной синоптической изменчивостью. Наибольшая разница в структуре поля солености была выявлена на глубинах более 700 м. В Э30 поля существенно неоднородны – пространственное распределение данных показало наличие областей с повышенными и пониженными значениями солености в отличие от более гладкого поля в Э100 (рис. 5, а, с).



Р и с. 5. Поля солености (а, с) и течений (b, d), рассчитанные на 19 марта, на горизонте 1500 м по данным Э100 (a, b) и Э30 (c, d)

F i g. 5. Fields of salinity (a, c) and currents (b, d) at the 1500 m horizon calculated for March, 19 according to the E100 (a, b) and E30 (c, d) data

Течения. В обоих экспериментах воспроизведены известные особенности циркуляции Черного моря – Основное Черноморское течение (ОЧТ), восточный и западный циклонические круговороты, квазистационарные вихри Севастопольского и Батумского антициклонов. На рис. 6 показаны поля скорости течений на горизонте 5 м в летний период. Видно, что в целом структура полученных полей сходна, однако максимальные скорости в Э30 оказались выше в среднем на 2–3 см/с, что, вероятно, вызвано увеличением горизонтальных

градиентов плотности вследствие улучшения пространственного разрешения в ассимилируемом массиве ГК.

Согласно Э30, в течение всего года в слое 30–50 м наблюдалось меандрирование ОЧТ в районе центральной части Анатолийского побережья, а также отмечалась интенсификация Батумского антициклона по сравнению с результатами Э100. По данным Э100 на горизонте 100 м с февраля по май юго-западная ветвь ОЧТ была более интенсивной и узкой, чем по данным Э30. В то же время по данным Э30 скорости в ОЧТ вдоль восточной части Анатолийского побережья и побережья Кавказа были выше.

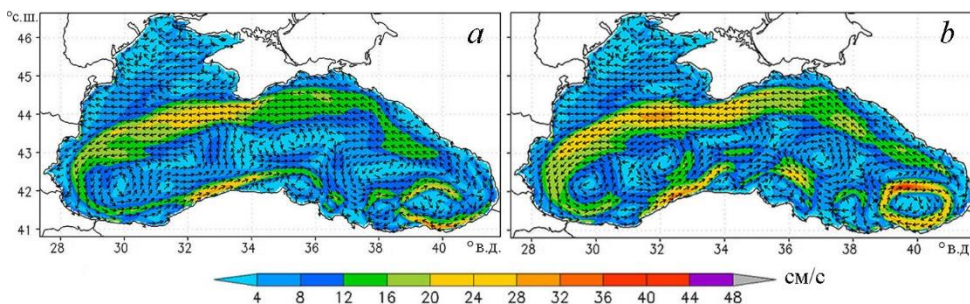


Рис. 6. Течения на горизонте 5 м, рассчитанные на 11 июля: *a* – по данным Э100; *b* – по данным Э30

Fig. 6. Currents at the 5 m horizon calculated for July, 19 according to: *a* – E100 and *b* – E30 data

Поля скорости на горизонтах более 500 м в обоих экспериментах характеризовались наличием вихревых образований разных знаков завихренности. В глубоководной части моря количество вихрей в Э30 больше, чем в Э100 (рис. 5, *b*, *d*). Вихри в абиссальной области сохраняли свою структуру до дна. Разница в количестве и интенсивности вихрей в результатах рассмотренных экспериментов обусловлена, по-видимому, значительными неоднородностями в структуре поля плотности, рассчитанного с усвоением в модели данных ГК30.

Отмеченные выше различия в термохалинных и гидродинамических характеристиках Черного моря, полученные с использованием данных гидрологических массивов ГК100 и ГК30, обусловлены двумя основными причинами. Для климатических средних в верхнем слое моря весьма существенным фактором является многолетняя изменчивость. Период 1991–2020 гг. характеризовался достаточно быстрой сменой состояния моря: от холодного и рассредоточенного к более теплему и соленому. Соответственно, распределение количества данных по годам влияет на средние характеристики всего периода. Для глубинных слоев, где пространственно-временная изменчивость на всех масштабах очень мала, основную роль играет качество проводимых измерений. Существуют проблемы с устойчивостью работы и калибровкой установленных на дрейфующих носителях измерительных приборов, длительное время находящихся в морской среде, особенно заметные для буев-профилемеров начала 2000-х гг. (первого поколения). Для судовых CTD-зондов различных организаций интеркалибрация проводилась только во время международных

съемок Черного моря в 1990-х гг. Все это в целом повышает уровень высоко-частотных шумов, которые трудно полностью отфильтровать при расчете средних полей.

Заключение

Проведенные численные эксперименты по моделированию динамики Черного моря с ассимиляцией двух разных климатических массивов температуры и солёности показали следующее. По сравнению с расчетом с усвоением климатического массива температуры и солёности по данным наблюдений за 1910–2003 гг. при усвоении в модели нового климатического массива по данным за последние 30 лет в воспроизводимых численной моделью полях отмечены существенные отличия. К ним относятся увеличение интегральной температуры верхнего перемешанного слоя, утончение и «разрыв» ХПС (по критерию 8°C) в центральной части моря, что свидетельствует о потеплении верхнего слоя вод в последние 30 лет. Повышенная зашумленность, выявленная на глубоководных горизонтах в полях солёности, воспроизводимых в эксперименте с ассимиляцией нового массива, связана с количеством и качеством данных наблюдений, проводимых на современном этапе. С учетом недостаточного метрологического обеспечения измерений электропроводности морской воды для следующей версии климатического массива необходима более строгая процедура проверки и фильтрации наблюдений в глубинных слоях Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьшев С. Г., Коротаев Г. К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане : Атмосфера – Океан – Космос. Программа «Разрезы». Москва : Институт вычислительной математики РАН, 1992. С. 163–231.
2. Демьшев С. Г., Кныш В. В., Коротаев Г. К. Результаты расчета адаптированных полей Черного моря на основе ассимиляции в модели данных по климатической температуре и солёности // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 5. С. 604–617.
3. Кныш В. В., Демьшев С. Г., Коротаев Г. К. Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 2. С. 36–52. URL: <http://xn--c1agq7a.xn--p1ai/index.php/repository?id=683> (дата обращения: 20.07.2021).
4. Долговременные изменения термохалинных и динамических характеристик Черного моря по климатическим данным температуры и солёности и их ассимиляции в модели / В. В. Кныш [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 3. С. 11–30. URL: <http://xn--c1agq7a.xn--p1ai/index.php/repository?id=819> (дата обращения: 22.07.2021).
5. Демьшев С. Г., Кныш В. В., Инюшина Н. В. Сезонная изменчивость и трансформация с глубиной климатических горизонтальных течений Черного моря по результатам ассимиляции в модели новых климатических данных температуры и солёности // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 6. С. 28–45. URL: <http://xn--c1agq7a.xn--p1ai/index.php/repository?id=841> (дата обращения: 20.07.2021).
6. Дорофеев В. Л., Коротаев Г. К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихре-разрешающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 1. С. 52–68. URL: <http://xn--c1agq7a.xn--p1ai/index.php/repository?id=766> (дата обращения: 26.07.2021).

7. Построение поля течений в Черном море на основе вихререзающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солености / С. Г. Демьшев [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 215–226.
8. Демьшев С. Г., Кныш В. В. Реконструкция адаптированной вертикальной скорости Черного моря на базе синтеза модели циркуляции и климатических данных по температуре и солености // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. Вып. 11. С. 93–104.
9. Мамаев О. И. Т, S-анализ вод Мирового океана. Л. : Гидрометеиздат, 1970. 364 с.
10. Staneva J. V., Stanev E. V. Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black Sea // Oceanologia Acta. 1998. Vol. 21, iss. 3. P. 393–417. doi:10.1016/S0399-1784(98)80026-1
11. Ефимов В. В., Тимофеев Н. А. Теплобалансовые исследования Черного и Азовского морей. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 1990. 236 с.
12. Pacanowski R. C., Philander S. G. H. Parameterization of Vertical Mixing in Numerical Models of Tropical Oceans // Journal of Physical Oceanography. 1981. Vol. 11, iss. 11. P. 1443–1451. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<1443:POVMIN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<1443:POVMIN>2.0.CO;2)
13. Arakawa A., Lamb V. R. A Potential Enstrophy and Energy Conserving Scheme for the Shallow Water Equation // Monthly Weather Review. 1981. Vol. 109, iss. 1. P. 18–36. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109%3C0018:APEAEC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109%3C0018:APEAEC%3E2.0.CO;2)
14. The MyOcean Black Sea from a scientific point of view / S. Demyshev [et al.] // Mercator Ocean Quarterly Newsletter. 2010. Vol. 39. P. 16–24. URL: http://marine.copernicus.eu/wp-content/uploads/2016/06/r63_9_quarterly_letter-issue_39.pdf (date of access: 08.07.2021).
15. Operational system for diagnosis and forecast of hydrophysical characteristics of the Black Sea / G. K. Korotaev [et al.] // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52. P. 542–549. <https://doi.org/10.1134/S0001433816050078>
16. Белокопытов В. Н. Ретроспективный анализ термохалинных полей Черного моря на основе методов эмпирических ортогональных функций // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 5. С. 412–421. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-412-421

Об авторах:

Маркова Наталья Владимировна, младший научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 3625-6866, ORCID ID: 0000-0002-7123-6657, ResearcherID: Q-2638-2017, Scopus Author ID: 57198013260**, n.v.markova@mail.ru

Белокопытов Владимир Николаевич, заведующий отделом океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **SPIN-код: 5697-5700, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588, ResearcherID: ABA-1230-2020, Scopus Author ID: 6602381894**, v.belokopytov@gmail.com

Дымова Ольга Алексеевна, старший научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 7565-1082, ORCID ID: 0000-0003-4036-2447, ResearcherID: P-9669-2015, Scopus Author ID: 6508381809**, olgadym@yahoo.com

Миклашевская Надежда Андриановна, младший научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 8476-2604, ORCID ID: 0000-0003-2619-343X, ResearcherID: P-2167-2017, Scopus Author ID: 8523715300**, nmikl@rambler.ru