

Ретроспективный анализ термохалинных полей Черного моря на основе методов эмпирических ортогональных функций

В. Н. Белокопытов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

E-mail: v.belokopytov@gmail.com

Поступила в редакцию 30.05.2018 г.

Для реконструкции термохалинных полей Черного моря по нерегулярным наборам данных наблюдений разработан метод, сочетающий в себе методы оптимальной интерполяции и разложения на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). Для повышения пространственной согласованности термохалинной структуры ранее используемый подход реконструкции по горизонтальным ЭОФ преобразован в комбинированный метод, в котором базовыми элементами являются вертикальные ЭОФ. В качестве исходного массива использовались прошедшие проверку качества первичные данные наблюдений, интерполированные на регулярную сетку $10' \times 15'$ методом оптимальной интерполяции. В результате рассчитан массив ретроспективного анализа за длительный период 1923–2015 гг. с относительной долей случаев полного восстановления среднемесячных полей во всем объеме моря около 70%. На основе массива реанализа различными методами рассчитаны климатические поля как для всего периода наблюдений, так и для отдельных десятилетних периодов. Выявлено, что на протяжении всего XX века амплитудно-фазовые характеристики климатических термохалинных полей в Черном море сохраняют свою устойчивость, общие тенденции многолетних изменений сезонного цикла противоположны для температуры и солёности. Данные реанализа использовались для исследований различных аспектов межгодовой и междесятилетней изменчивости термохалинной структуры Черного моря, плотностной стратификации, геострофической циркуляции и др. В перспективе массив реанализа термохалинных полей может применяться для дальнейших исследований многолетних изменений в черноморском бассейне, а также при ассимиляции данных наблюдений в работах по реконструкции гидрофизических полей с помощью гидродинамических моделей.

Ключевые слова: Черное море, термохалинная структура, реанализ, климатические поля, эмпирические ортогональные функции.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан–атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата» (шифр «Взаимодействие океана и атмосферы»).

Для цитирования: 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

Retrospective Analysis of the Black Sea Thermohaline Fields Based on the Empirical Orthogonal Functions

V. N. Belokopytov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

e-mail: v.belokopytov@gmail.com

Mathematical method combining optimal interpolation and expansion into the empirical orthogonal functions is developed to implement a retrospective analysis of the Black Sea thermohaline structure using incomplete archival oceanographic data. In order to increase spatial consistency of the resulted hydrologic structure, the earlier applied reconstruction method based on the horizontal empirical orthogonal functions was transformed to the combined one in which the vertical empirical orthogonal functions were the basic elements. The results of computing experiments make it possible to limit the number of the modes by 5 both for horizontal and vertical empirical orthogo-

© Белокопытов В. Н., 2018

nal functions. Such a combination significantly reduces the calculation time and **lowers** the error level. This method was applied to reconstruct the monthly fields (spatial resolution is 10' latitude × 15' longitude) for almost a hundred-year period from 1923–2015. The relative part of the monthly average fields' successful reconstruction constitutes about 70%. Based on the reanalysis data, the temperature and salinity climatic fields were calculated by various methods both for the entire observational period and for certain decades. It is revealed that in the XX century the gain-phase climatic characteristics of the Black Sea remain very stable whereas general tendencies in the long-term variations of the temperature and salinity seasonal cycles are opposite: when the sea temperature seasonal range rises the phase of annual harmonic of seasonal oscillations diminishes, and in the case of salinity, it increases, i. e. the salt content maximum shifts for the later period. The reanalysis data were used to study various aspects of the inter-annual and inter-decadal variability of the Black Sea thermohaline structure, density stratification, geostrophic circulation etc. The future trends imply application of the thermohaline fields' reanalysis array for studying long-term changes in the Black Sea basin as well as for assimilating observational data in the hydro-physical fields' reconstructions by the hydrodynamic models.

Keywords: Black Sea, thermohaline structure, reanalysis, climate, empirical orthogonal functions.

Acknowledgements: the investigation is carried out within the framework of the state task on the theme № 0827-2018-0001 "Fundamental studies of the interaction processes in the ocean-atmosphere system conditioning the regional spatial-temporal variability of natural environment and climate" (code "Ocean and atmosphere interaction").

For citation: Belokopytov, V.N., 2018. Retrospective Analysis of the Black Sea Thermohaline Fields Based on the Empirical Orthogonal Functions. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(5), pp. 412-421. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-412-421 (in Russian).

Введение. В климатических исследованиях наряду с широко распространенными массивами глобального реанализа атмосферных полей в настоящее время стали использоваться аналогичные массивы океанографических характеристик, такие как *ECWMF-Ocean*, *NCEP/GODAS*, *GECCO*, *SODA*, *Mercator* и др. Целый ряд региональных массивов реанализа гидрофизических полей Черного моря, относящихся к различным историческим периодам, был создан в Морском гидрофизическом институте РАН [1–4].

Основным методом ретроспективного анализа океана является применение полных гидродинамических моделей и методов ассимиляции данных контактных и дистанционных наблюдений. Альтернативный подход состоит в восстановлении океанографических полей математическими методами, опирающимися только на статистическую структуру данных. Такая методика, обоснованная в трудах Л. С. Гандина, В. И. Беляева, И. Е. Тимченко [5–8], применена в современных работах [9–17], включая исследование [18], посвященное Черному морю. Несмотря на различные недостатки статистических методов, в частности сильную зависимость от пространственной структуры данных, с их помощью можно исследовать продолжительные исторические периоды с более предсказуемым уровнем ошибок восстановления (степени неопределенности), чем при использовании гидродинамических моделей, так как на результаты моделирования влияет не только количество и пространственное распределение ассимилируемых данных, но и качество используемого атмосферного реанализа. В последнее время появились атмосферные массивы, охватывающие весь XX век (*ERA-20C*, *NOAA 20CR*), однако пока трудно оценить, насколько в них учтены систематические изменения, происходившие в глобальной системе метеорологических наблюдений на протяжении 100 лет.

Цель исследования состояла в создании массива реанализа Черного моря на всем временном интервале океанографических наблюдений, охватывающем 100-летний период, и расчете климатических характеристик для различных исторических периодов на основе статистических методов реконструкции термохалинных полей.

Методика проведения ретроспективного анализа. Расчет массива реанализа производился в несколько этапов. На первом этапе первичные данные, прошедшие проверку качества, интерполировались методом оптимальной интерполяции на регулярную сетку. На втором этапе осуществлялось разложение интерполированных значений на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). На третьем этапе вычислялись временные коэффициенты ЭОФ для всего периода наблюдений. На четвертом этапе по временным коэффициентам ЭОФ восстанавливались среднемесячные термохалинные поля для всего объема моря и проводилась проверка на их соответствие заданным статистическим критериям.

Метод оптимальной интерполяции, применяемый на первом этапе, традиционно используется в гидрометеорологии, так как он позволяет учитывать реальную корреляционную структуру полей, минимизировать ошибку интерполяции и дает возможность ее количественной оценки. Эквивалентом оптимальной интерполяции является вариационный обратный метод, который, в частности, применялся в *MEDATLAS* для Средиземного и Черного моря [19].

В данной работе система уравнений оптимальной интерполяции [5] решалась методом Гаусса. Мера ошибки наблюдений оценивалась как

$$\eta_i = \sigma_f^2 / x_i^2,$$

где σ_f^2 – средняя дисперсия ошибки наблюдений, равная сумме инструментальной погрешности и дисперсии мезомасштабной изменчивости (из работы [20, с. 150]); x_i^2 – средняя дисперсия аномалий (отклонений от нормы \bar{x} значений x_i в точке наблюдений i). В качестве нормы использовались климатические среднемесячные поля температуры и солёности.

Было принято допущение об изотропности пространственных корреляционных функций в Черном море [21, 22]. Для автокорреляционной функции в системе уравнений оптимальной интерполяции использовалось приближение [21], аппроксимирующее структуру гауссовых полей.

Первичная интерполяция на регулярную сетку заведомо проводилась таким образом, чтобы не допускать экстраполяции при заполнении свободного пространства, так как для этого были предназначены следующие этапы. В результате расчетов сформированы массивы интерполированных значений для периода наблюдений 1910–2015 гг. с временной дискретностью 10 сут и 1 мес. с пространственным разрешением $10' \times 15'$. Относительная доля покрытия акватории моря (рис. 1) данными максимальна для периода конца 1950-х – начала 1990-х гг. (до 80%) и минимальна в 1930–1940 гг. и после 1995 г. (менее 20%).

На втором этапе сначала рассчитывалась общая корреляционная (автоковариационная) матрица

$$C = \text{Cov}(\mathbf{x}', \mathbf{x}')$$

по всему набору полей среднемесячных аномалий \mathbf{x}' из массива оптимальной интерполяции. Ковариационные матрицы C , рассчитанные для каждого гори-

зонта, сглаживались трехточечным фильтром Шапиро. Далее для C решалась задача поиска собственных чисел и векторов:

$$C = E \Lambda E^T,$$

где E – матрица собственных векторов; Λ – диагональная матрица собственных чисел; E^T – транспонированная E .

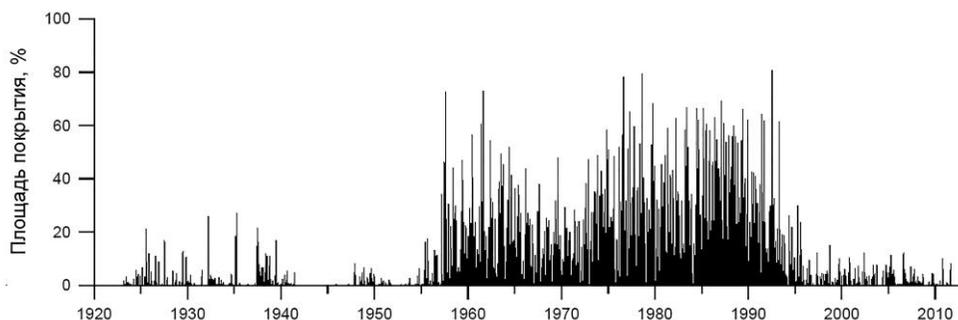


Рис. 1. Относительная доля покрытия площади по 10-суточным интервалам акватории Черного моря значениями на регулярной сетке, рассчитанными методом оптимальной интерполяции
Fig. 1. Relative portion of the Black Sea area covered by the decade-derived values (regular grid) calculated by the method of optimal interpolation

Поиск собственных векторов E осуществлялся с помощью алгоритмов QL/QR разложения, которые достаточно эффективны для вычислений [23, 24].

На третьем этапе для каждого момента времени рассчитывались временные коэффициенты для всех мод ЭОФ

$$a_{ii} = x'_t e^i,$$

где e^i – собственный вектор для i -й моды; x'_t – поле среднемесячных аномалий в момент времени t .

В связи с наличием пропусков в полях x'_t временные коэффициенты определялись аналогично методу наименьших квадратов [25, с. 14]:

$$\hat{a}_i = \frac{\sum_{j \in K} x'_j e^i_j}{\sum_{j \in K} |e^i_j|^2},$$

где $K = \{j: x'_j \text{ не пропущенные значения}\}$; $\hat{}$ – символ статистической оценки.

На последнем этапе путем обратной процедуры результирующие поля восстанавливались во всех узлах сетки:

$$x'_t = \sum_{i=1}^M \hat{a}_{ii} e^i,$$

где M – количество старших мод, участвующих в расчете.

При анализе результатов реконструкции выяснилось, что данный подход, ранее использовавшийся для поверхностных полей, плохо подходит для восстановления трехмерной термохалинной структуры [23]. При увеличении ко-

личества используемых мод (до 20) размах межгодовых аномалий чрезмерно усиливался, вертикальная структура полей искажалась сильными инверсиями. При уменьшении количества мод пространственная структура аномалий существенно изменялась в сравнении с исходными полями.

Ошибки в знаке и абсолютной величине межгодовых аномалий связаны в основном с зависимостью оценки временных коэффициентов $\hat{\alpha}_{it}$ от пространственного распределения первичных данных. Искусственные вертикальные инверсии часто возникают при неравномерной обеспеченности данными по глубине. Поэтому для повышения пространственной согласованности термохалинной структуры по вертикали и горизонтали метод реконструкции был модифицирован путем подключения блока вертикальных ЭОФ.

Модифицированный метод в целом аналогичен описанному выше методу, использующему набор горизонтальных ЭОФ, но при этом имеет существенные отличия.

На первом этапе базовыми элементами становятся вертикальные ЭОФ Ψ , рассчитанные по исходным векторам x'_t в виде аномалий от среднемесячного климатического вертикального профиля в узле сетки. Распределение первых пяти вертикальных ЭОФ солёности приведено на рис. 2.

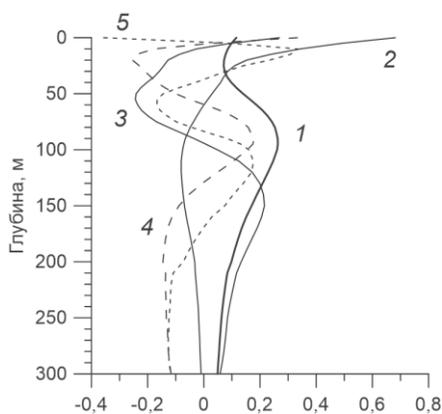


Рис. 2. Вертикальные ЭОФ солёности, цифрами обозначены номера мод
Fig. 2. Vertical EOF of salinity, figures denote the mode numbers

Затем рассчитываются ряды временных коэффициентов вертикальных ЭОФ в каждом узле сетки для каждой вертикальной моды $\beta_{it} = x'_t \psi^i$. Существенным моментом является то, что в качестве исходных горизонтальных полей принимаются не аномалии температуры и солёности, а β_{it} , и для них рассчитывается E – матрица горизонтальных ЭОФ временных коэффициентов вертикальных мод ЭОФ.

На последнем этапе для каждого поля β_{it} рассчитываются временные коэффициенты для всех горизонтальных мод ЭОФ

$$\alpha_{it} = \beta_{it} e^i$$

и путем двух обратных процедур восстанавливаются вертикальные профили в каждом расчетном узле:

$$\beta_{ii} \approx \sum_{i=1}^M \hat{\alpha}_{ii} e^i,$$

$$x'_t \approx \sum_{i=1}^L \beta_{ii} \psi^i,$$

где M – количество горизонтальных мод; L – количество вертикальных мод [23, с. 97].

Модифицированный метод позволил лучше согласовать горизонтальную и вертикальную структуру полей и уменьшить количество грубых ошибок. Несмотря на некоторую усложненность общей схемы расчета (наличие двух разных наборов мод и их сопряжения), численная реализация алгоритма стала более эффективной. Уменьшение времени вычислений позволило провести большое количество численных экспериментов для подбора оптимального количества вертикальных и горизонтальных мод.

Спектры собственных чисел ЭОФ показали, что первые 10 мод обеспечивают 98% общей дисперсии для вертикальных ЭОФ и до 60% для горизонтальных ЭОФ временных коэффициентов вертикальных мод. По результатам серии вычислительных экспериментов было решено ограничиться для окончательного расчета пятью вертикальными модами ЭОФ и пятью горизонтальными модами временных коэффициентов вертикальных мод ЭОФ. Такое сочетание дает минимальное отклонение от базового массива оптимальной интерполяции при значительном снижении количества ошибок и существенной экономии времени вычислений.

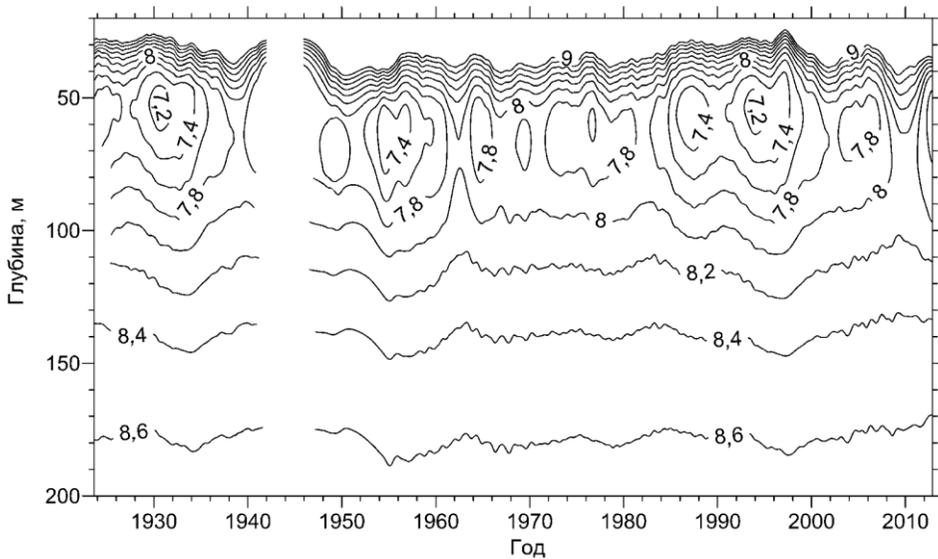


Рис. 3. Многолетний ход температуры воды Черного моря в слое 20–200 м, изотермы со значениями выше 9 °С не показаны

Fig. 3. Multi-year variation of the Black Sea water temperature in the 20–200 m layer, the isotherms exceeding 9 °C are not shown

В результате был рассчитан массив реанализа среднемесячных термохалинных полей для периода 1922–2015 гг., количество пропусков составило

13%. Пространственное разрешение массива по горизонтали $10' \times 15'$ (18,5 км по широте и 19–21 км по долготе), по вертикали – 67 горизонтов (в слое 0–100 м через 5 м, далее шаг изменяется от 10 до 200 м). После фильтрации выбросов по статистическим критериям было забраковано около 20% значений массива.

Восстановление данным методом непрерывного ряда среднемесячных гидрологических полей за весь период наблюдений в Черном море (с 1890 г.) не представляется возможным. Для адекватной реконструкции поля на всей акватории моря необходимы данные измерений в нескольких репрезентативных районах моря.

Массив реанализа в дальнейшем использовался для исследований различных аспектов межгодовой и многолетней изменчивости термохалинной структуры Черного моря (рис. 3, 4), плотностной стратификации, геострофической циркуляции и др. [26, 27].

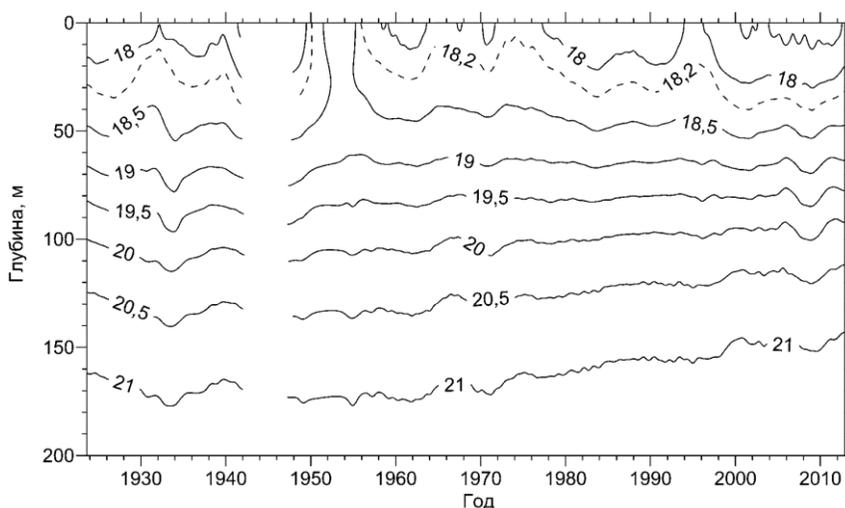


Рис. 4. Многолетний ход солености Черного моря в слое 0–200 м

Fig. 4. Multi-year variation of the Black Sea water salinity in the 20–200 m layer

Климатические массивы. Для расчета климатических полей температуры и солености применялось несколько методов. Наиболее простым и очевидным является арифметическое осреднение данных массива реанализа в узлах регулярной сетки для каждого месяца. Второй метод состоит в аппроксимации годовой и полугодовой гармониками осредненных значений массива реанализа или массива оптимальной интерполяции. Третий метод основан на описанном выше алгоритме реанализа термохалинных полей с коренным отличием в том, что вертикальные и горизонтальные ЭОФ рассчитываются не по межгодовым аномалиям, а по сезонным.

Сравнение климатических массивов, рассчитанных разными методами, показало, что при совпадении основных черт пространственной структуры полей существуют региональные различия внутригодовой эволюции термохалинных характеристик, в особенности солености. Тем не менее, пространственное распределение амплитудно-фазовых характеристик гидрологиче-

ского сезонного цикла сохраняет свои общие закономерности не только для различных массивов, но и для различных десятилетних периодов.

Одной из характерных особенностей сезонного цикла температуры является уменьшение фазы годовой гармоники при увеличении сезонной амплитуды. Амплитуда сезонного хода возросла после 1980-х гг. и к настоящему времени достигает максимальных значений (рис. 5).

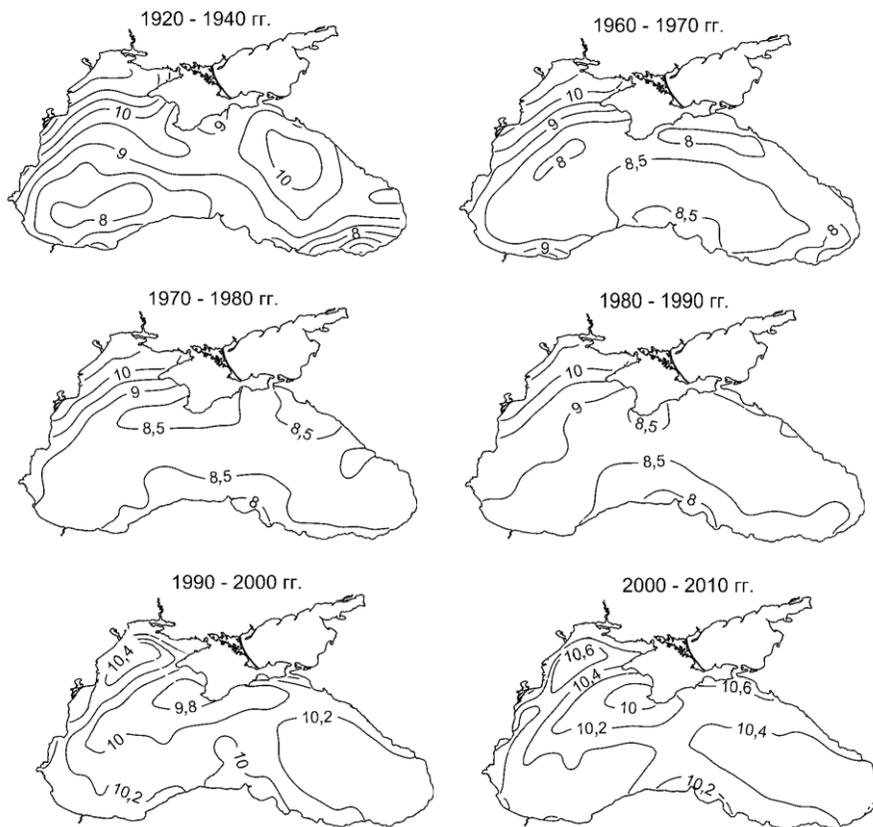


Рис. 5. Пространственное распределение амплитуды годовой гармоники сезонного хода температуры воды на поверхности моря ($^{\circ}\text{C}$) для различных десятилетних периодов

Fig. 5. Spatial distribution of the annual harmonic amplitude of the water temperature seasonal variation on the sea surface ($^{\circ}\text{C}$) for various decadal periods

Увеличение сезонной амплитуды солености происходит в периоды общего опреснения моря. Основная закономерность многолетних изменений амплитудно-фазовых характеристик солености – положительная корреляция фазы и амплитуды сезонного хода, что противоположно изменениям сезонного хода температуры воды.

Выводы. Применение нового, сочетающего в себе методы оптимальной интерполяции и разложения на ЭОФ-функции метода реконструкции термохалинных полей бассейна по нерегулярным наборам данных наблюдений

позволило рассчитать массив реанализа гидрологической структуры Черного моря за длительный период 1923–2015 гг. и климатические поля для отдельных десятилетних периодов. С учетом значительных пропусков наблюдений в отдельные годы и принятых критериев фильтрации ошибок результатов расчета относительная доля случаев полного восстановления среднемесячных полей составила около 70% от исследуемого периода.

Сопоставление климатических полей для отдельных десятилетних периодов показало, что сезонный гидрологической цикл в Черном море сохраняет свою устойчивость на протяжении всего XX в., пространственное распределение характеристик сезонной изменчивости сохраняет свои общие закономерности для различных десятилетних периодов. Общие тенденции многолетних изменений амплитудно-фазовых характеристик различны для температуры и солёности. При увеличении амплитуды сезонного хода температуры воды уменьшается фаза годовой гармоника, в то время как для солёности характерна обратная зависимость.

В перспективе данный массив реанализа термohалинных полей может применяться в качестве основы для более детального исследования многолетней изменчивости Черного моря, а также использоваться при ассимиляции данных наблюдений в работах по реконструкции гидрофизических полей с помощью гидродинамических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971–1993 гг. / В. В. Кныш [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 433–446.
2. *Дорофеев В. Л., Кортаев Г. К., Сухих Л. И.* Исследование долговременной изменчивости полей Черного моря с использованием междисциплинарной физико-биогеохимической модели // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 6. С. 676–687. doi:10.7868/S0002351513060059
3. *Мизюк А. И.* Реанализ гидрофизических полей Черного моря на основе ассимиляции данных измерений температуры и солёности в z-координатной модели // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 3. С. 30–47.
4. Реанализ сезонной и межгодовой изменчивости полей Черного моря за 1993–2012 гг. / Г. К. Кортаев. [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 4. С. 475–487. doi:10.7868/S0002351516040076
5. *Гандин Л. С.* Объективный анализ метеорологических полей. – Л. : Гидрометеоздат, 1963. – 287 с.
6. *Беляев В. И., Тимченко И. Е.* О применении объективного и четырехмерного анализа в океанографии // Морские гидрофизические исследования. Севастополь : МГИ НАНУ, 1972. № 2. С. 80–92.
7. *Нелепо Б. А., Тимченко И. Е.* Системные принципы анализа наблюдений в океане. Киев : Наукова Думка, 1977. 222 с.
8. Системный анализ морской среды / И. Е. Тимченко [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 1996. 224 с.
9. An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate / R. W. Reynolds [et al.] // Journal of Climate. 2002. Vol. 15, no. 13. P. 1609–1625. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISSAS>2.0.CO;2
10. Analyses of global sea surface temperature 1856–1991 / A. Kaplan [et al.] // Journal of Geophysical Research. 1998. Vol. 103, iss. C9. P. 18567–18589. doi:10.1029/97JC01736

11. *Beckers J. M., Rixen M.* EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets // *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 2003. Vol. 20, no. 12. P. 1839–1856. doi:10.1175/1520-0426(2003)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2
12. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century / N. A. Rayner [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108, iss. D14. 4407. doi:10.1029/2002JD002670
13. Improved analyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: the HadSST2 dataset / N. A. Rayner [et al.] // *Journal of Climate*. 2006. Vol. 19, no. 3. P. 446–469. doi:10.1175/JCLI3637.1
14. *Kaplan A., Kushnir Y., Cane M. A.* Reduced space optimal interpolation of historical marine sea level pressure: 1854–1992 // *Journal of Climate*. 2000. Vol. 13, no. 16. P. 2987–3002. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2987:RSOIOH>2.0.CO;2
15. Multivariate reconstruction of missing data in sea surface temperature, chlorophyll and wind satellite fields / A. Alvera-Azcárate [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2007. Vol. 112, iss. C3. C03008. doi:10.1029/2006JC003660
16. Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using empirical orthogonal functions: application to the Adriatic Sea surface temperature / A. Alvera-Azcárate [et al.] // *Ocean Modelling*. 2005. Vol. 9, iss. 4. P. 325–346. doi:10.1016/j.ocemod.2004.08.001
17. *Smith T. M., Reynolds R. W.* A high-resolution global sea surface temperature climatology for the 1961–90 base period // *Journal of Climate*. 1998. Vol. 11, no. 12. P. 3320–3323. doi:10.1175/1520-0442(1998)011<3320:AHRGSS>2.0.CO;2
18. Enhancing temporal correlations in EOF expansions for the reconstruction of missing data using DINEOF / A. Alvera-Azcárate [et al.] // *Ocean Science*. 2009. Vol. 5, iss. 4. P. 475–485. doi:10.5194/os-5-475-2009
19. A numerically efficient data analysis method with error map generation / M. Rixen [et al.] // *Ocean Modelling*. 2000. Vol. 2, iss. 1–2. P. 45–60. doi:10.1016/S1463-5003(00)00009-3
20. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
21. *Григорьев А. В., Иванов В. А., Капустина Н. А.* Корреляционная структура термохалинных полей Черного моря в летний сезон // *Океанология*. 1996. Т. 36, № 3. С. 364–369.
22. *Полонский А. Б., Шокурова И. Г.* Статистическая структура крупномасштабных полей температуры и солёности в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2008. № 1. С. 51–65.
23. *Белокопытов В. Н.* О методе восстановления термохалинной структуры Черного моря на основе эмпирических ортогональных функций // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 17. С. 94–99.
24. *Белокопытов В. Н.* Метод расчета сезонного цикла термохалинных полей на основе ЭОФ-разложения // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 19. С. 116–121.
25. *Белокопытов В. Н.* Климатические изменения гидрологического режима Черного моря : автореф. дисс. ... докт. геогр. наук : 25.00.28. Севастополь, 2017. 42 с.
26. *Белокопытов В. Н.* Межгодовая изменчивость обновления вод холодного промежуточного слоя Черного моря в последние десятилетия // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 5. С. 33–41.
27. *Белокопытов В. Н.* О климатической изменчивости термохалинной структуры Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 226–230.

Об авторе:

Белокопытов Владимир Николаевич, заведующий отделом океанографии, ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4699-9588**, **Scopus Author ID: 6602381894**, v.belokopytov@gmail.com
 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 34 № 5 2018 421