

Региональные особенности синоптической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря по спутниковым данным

Ю. В. Артамонов*, Е. А. Скрипалева, А. В. Федирко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: artam-ant@yandex.ru*

Поступила в редакцию 30.10.2019 г., после доработки – 16.12.2019 г.

Цель. Уточнить региональные особенности синоптической изменчивости температуры на поверхности Черного моря, выявить ее внутригодовые и межгодовые изменения и оценить их связи с крупномасштабными атмосферными процессами – цель данной работы.

Методы и результаты. Используются данные спутниковых измерений температуры поверхности моря за период 1982–2018 г. из массива *Copernicus* со среднесуточным разрешением по времени и $0,04^\circ$ – по пространству. На основе этих данных показано, что максимальная синоптическая изменчивость температуры поверхности моря наблюдается в прибрежной части северо-западного шельфа от Днепро-Бугского лимана до дельты Дуная, в Каркинитском заливе и в Керченском проливе. В глубоководной части моря высокий уровень синоптической изменчивости прослеживается в областях Восточного циклонического круговорота и Батумского антициклона. Установлено, что наибольший вклад синоптической изменчивости в общую дисперсию поля температуры наблюдается в Керченском проливе и южнее Керченского п-ова. Уровень среднегодовой синоптической изменчивости ниже или сопоставим с уровнем межгодовой изменчивости на большей части акватории, за исключением Керченского пролива, северо-западного и прибосфорского шельфов. Выявлено, что в климатическом внутригодовом цикле основной максимум синоптической изменчивости наблюдается в мае, за месяц до наступления максимума скорости прогрева поверхностных вод, второй максимум – в октябре, за месяц до наступления максимума скорости выхолаживания вод. Минимумы наблюдаются в феврале – марте, в период максимального охлаждения поверхностных вод, и в августе, в период их максимального прогрева. Выявлены заметные межгодовые изменения уровня синоптической изменчивости температуры, которые варьируют в пределах $-0,3 \dots 0,3^\circ\text{C}$.

Выводы. Синоптическая изменчивость температуры поверхности Черного моря характеризуется заметными внутригодовыми и межгодовыми изменениями. Ее климатический внутригодовой цикл носит полугодовую периодичность, обусловленную процессами выхолаживания и прогрева вод. Максимальное повышение уровня синоптической изменчивости на межгодовом масштабе наблюдается после 2003 г. на северо-западном шельфе. Значимая корреляционная связь с индексами Североатлантического, Восточноатлантического колебаний и колебания Восточная Атлантика – Западная Россия не выявлена.

Ключевые слова: Черное море, температура поверхности моря, данные спутниковых измерений, синоптическая и межгодовая изменчивость, индексы атмосферной циркуляции.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0003 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования».

Для цитирования: Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В. Региональные особенности синоптической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря по спутниковым данным // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 202–213. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-202-213

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В., 2020

Regional Features of the Temperature Field Synoptic Variability on the Black Sea Surface from Satellite Data

Yu. V. Artamonov*, E. A. Skripaleva, A. V. Fedirko

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

**e-mail: artam-ant@yandex.ru*

Purpose. The aim of the work is to clarify the regional features of synoptic variability of the Black Sea surface temperature, to reveal its intra- and inter-annual changes and to assess the features' relations with the large-scale atmospheric processes.

Methods and Results. The satellite-derived data on the sea surface temperature in 1982–2018 from the *Copernicus* array were used; their temporal resolution was daily average and the spatial one – 0.04 degrees. These data showed that the maximum of temperature synoptic variability was observed in the coastal part of the northwestern shelf from the Dnieper-Bug estuary to the Danube delta, in the Karkinit Bay and in the Kerch Strait. In the deep sea, strong synoptic variability can be observed in the regions of the Eastern cyclonic gyre and the Batumi anticyclone. The greatest contribution of synoptic variability to the total temperature dispersion was observed in the Kerch Strait and to the south of the Kerch Peninsula. The level of multi-year average synoptic variability is lower or comparable with the level of the interannual variability in most of the water area, except for the Kerch Strait, the northwestern and the Bosphorus shelves. It is revealed that in the climatic annual cycle the main maximum of synoptic variability is observed in May, a month before the maximum rate of surface water heating is achieved, the second maximum – in October, a month before the maximum rate of water cooling. The minimums are observed in February–March, during the period of maximum cooling of surface waters, and in August, during their maximum heating. Noticeable interannual changes of the level of temperature synoptic variability varying from -0.3°C to 0.3°C , were revealed.

Conclusions. Synoptic variability of the Black Sea surface temperature is characterized by noticeable intra-annual and interannual variations. Its climatic annual cycle is of a semi-annual periodicity due to the processes of water cooling and heating. The maximum increase of the synoptic variability level on the interannual scale is observed after 2003 on the northwestern shelf. Significant correlation with the indices of the North Atlantic, East Atlantic and the East Atlantic–West Russia oscillations was not revealed.

Keywords: Black Sea, sea surface temperature, satellite measurements, synoptic and interannual variability, atmospheric circulation indices.

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task on theme No. 0827-2019-0003 "Fundamental studies of oceanological processes that determine state and evolution of marine environment affected by natural and anthropogenic factors, based on the observation and modeling methods".

For citation: Artamonov, Yu. V., Skripaleva, E. A. and Fedirko, A. V., 2020. Regional Features of the Temperature Field Synoptic Variability on the Black Sea Surface from Satellite Data. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(2), pp. 186-196. doi:10.22449/1573-160X-2020-2-186-196

Введение

Современные задачи, связанные с рациональным использованием ресурсов Черного моря и сохранением его экосистемы, требуют дальнейшего уточнения пространственно-временной изменчивости структуры вод. Наиболее репрезентативный мониторинг изменчивости температуры на поверхности моря (ТПМ) осуществляется с помощью спутниковых измерений с высокой пространственно-временной дискретностью. В современных публикациях основное внимание уделяется изменчивости ТПМ на временных масштабах от сезонного до междекадного. Показана доминирующая роль сезонных изменений в общем спектре изменчивости ТПМ Черного моря [1–5], оценены

тенденции межгодовой изменчивости ТПМ и ее связь с крупномасштабными атмосферными процессами [1–11].

Кроме процессов сезонного и межгодового масштабов в изменчивости термохалинной структуры и динамики вод Черного моря важную роль играют процессы синоптического характера [4, 12–19]. Некоторые оценки особенностей синоптической и мезомасштабной изменчивости вод Черного моря на основе анализа различных типов экспериментальных данных, результатов математического моделирования и спутниковых измерений можно найти в работах [4, 13, 17–19]. Показано, что в целом уровень синоптической изменчивости температуры в прибрежной зоне выше, чем в открытой части моря, при этом наблюдается его увеличение от зимы к лету [4]. В то же время авторы отмечают, что в связи с недостаточным количеством длительных многосуточных станций нельзя надежно оценить характеристики внутригодового хода синоптической изменчивости в открытой части моря. Анализ пространственных особенностей распределения уровня синоптической изменчивости ТПМ вдоль северной части разреза Херсонес – Босфор показал, что к северу от климатического положения стрежня Основного Черноморского течения (ОЧТ) уровень синоптической изменчивости уменьшается, а непосредственно в стрежне ОЧТ – заметно возрастает [17]. По данным численного моделирования, синоптическая изменчивость гидрофизических полей наиболее выражена тогда, когда интенсифицируется ОЧТ, т. е. в зимне-весенний период [18]. По данным спутниковых измерений ТПМ установлено, что на северо-западном шельфе минимальная синоптическая изменчивость ТПМ наблюдается в феврале – марте, максимальная – в мае [19].

В настоящей работе на основе современного массива спутниковых данных ТПМ с высоким пространственно-временным разрешением уточняются региональные особенности синоптической изменчивости температуры на поверхности Черного моря, ее внутригодовые и межгодовые изменения и оценивается их связь с крупномасштабными атмосферными процессами.

Материалы и методы

В работе использованы данные спутниковых измерений ТПМ за период 1982–2018 гг. из массива *Black Sea – High Resolution LA Sea Surface Temperature Reprocessed* (http://marine.copernicus.eu/interactive_catalogue/SST_BS_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_022), полученные с помощью радиометра высокого разрешения *AVHRR Pathfinder Version 5.2 (PFV5.2)* Национального центра океанографических данных *NOAA*. Используемые регулярные среднесуточные спутниковые данные ТПМ в узлах сетки $0,04^\circ \times 0,04^\circ$ получены по единой методике для всей акватории моря с помощью современных алгоритмов обработки [20, 21]. Согласно [22], временной период более 35 лет является достаточным для получения статистически значимых климатических норм и позволяет оценить тенденции межгодовой изменчивости, а среднесуточное разрешение дает возможность проанализировать синоптическую изменчивость ТПМ на внутримесячном масштабе.

Для анализа уровня синоптической изменчивости и оценки его соотношения с другими типами изменчивости в каждом узле сетки рассчитывались общие, межгодовые и синоптические (внутримесячные) среднеквадратиче-

кие отклонения (СКО) ТПМ. Общее $СКО_{общ}$ ТПМ рассчитывалось по всему 37-летнему временному ряду среднесуточных значений ТПМ. Уровень межгодовой изменчивости ТПМ оценивался по $СКО_{меж}$, рассчитанным по временным рядам из 37 среднемесячных значений ТПМ для января, февраля и т. д., которые затем осреднялись за все 12 месяцев. Внутримесячные СКО вычислялись по среднесуточным рядам ТПМ для каждого месяца каждого года и далее осреднялись за 37 лет для января, февраля и т. д. (климатические $СКО_{син}$) и за все 444 месяца (среднепогодное $СКО_{син}$).

Межгодовые вариации синоптической изменчивости ТПМ анализировались в каждом узле сетки по временным рядам, которые содержат 37 значений $СКО_{син}$ ТПМ, осредненных для каждого года за период 1982–2018 гг. Кроме того, для оценки связи синоптических вариаций ТПМ с крупномасштабными атмосферными модами рассчитывались взаимно-корреляционные функции (на 95%-ном уровне статистической значимости) между временными рядами, состоящими из 444 значений $СКО_{син}$ ТПМ и индексов Североатлантического (САК), Восточноатлантического (ВАК) колебаний и колебания Восточная Атлантика – Западная Россия (ВА/ЗР) (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>).

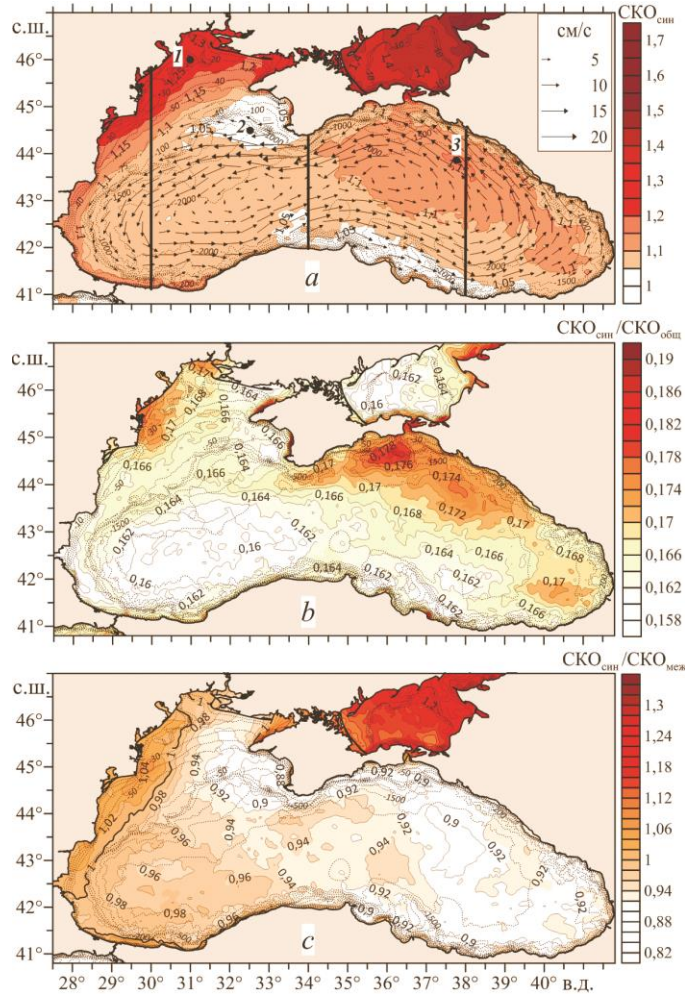
Для интерпретации региональных особенностей пространственных распределений $СКО_{син}$ анализировалась структура крупномасштабной геострофической циркуляции вод относительно отсчетной поверхности 300 дбар по данным климатического массива термохалинных полей, созданного в Морском гидрофизическом институте [23].

Результаты исследования

Пространственные распределения среднепогодных $СКО_{син}$ ТПМ (рис. 1, *a*) показали, что их максимальные значения ($\sim 1,25\text{--}1,35^\circ\text{C}$) наблюдаются над глубинами моря менее 20–30 м в прибрежной части северо-западного шельфа от Днепро-Бугского лимана до дельты Дуная, в Каркинитском заливе и в Керченском проливе. Повышение уровня синоптической изменчивости ($СКО_{син} \sim 1,1\text{--}1,25^\circ\text{C}$) отмечается также вдоль всего западного шельфа и в прибосфорском районе почти до м. Олюдже над глубинами моря менее 75 м. В глубоководной части моря высокие значения $СКО_{син}$ (до $1,1\text{--}1,2^\circ\text{C}$) прослеживаются в областях Восточного циклонического круговорота (ВЦК) и Батумского антициклона, который более четко проявляется по данным фактических съемок, спутниковой альтиметрии и по модельным расчетам [4, 12, 15, 24]. Минимум значений $СКО_{син}$ (ниже 1°C) наблюдается в прибрежной полосе вдоль Анатолийского побережья между м. Олюдже и м. Фенер, а также в области минимума сезонной изменчивости ТПМ [5, 25] к западу от берегов Крыма.

Величины отношения $СКО_{син}/СКО_{общ}$ на всей акватории изменяются в относительно узком интервале $0,158\text{--}0,182$ (рис. 1, *b*). Наибольший вклад синоптической изменчивости в общую дисперсию поля ТПМ ($СКО_{син}/СКО_{общ} = 0,176\text{--}0,182$) наблюдается в Керченском проливе и над свалом глубин южнее Керченского п-ова. Повышение величин $СКО_{син}/СКО_{общ}$ (выше $0,17$) прослеживается также на северо-западном шельфе между Днепро-Бугским лиманом и дельтой Дуная, в северо-восточной части моря и в области Батум-

ского антициклона. Минимальный вклад синоптической изменчивости в общую дисперсию поля ТПМ ($СКО_{\text{син}}/СКО_{\text{общ}}$ ниже 0,16) выявлен в области Западного циклонического круговорота (ЗЦК), где отмечено повышение уровня сезонной изменчивости [5, 25].

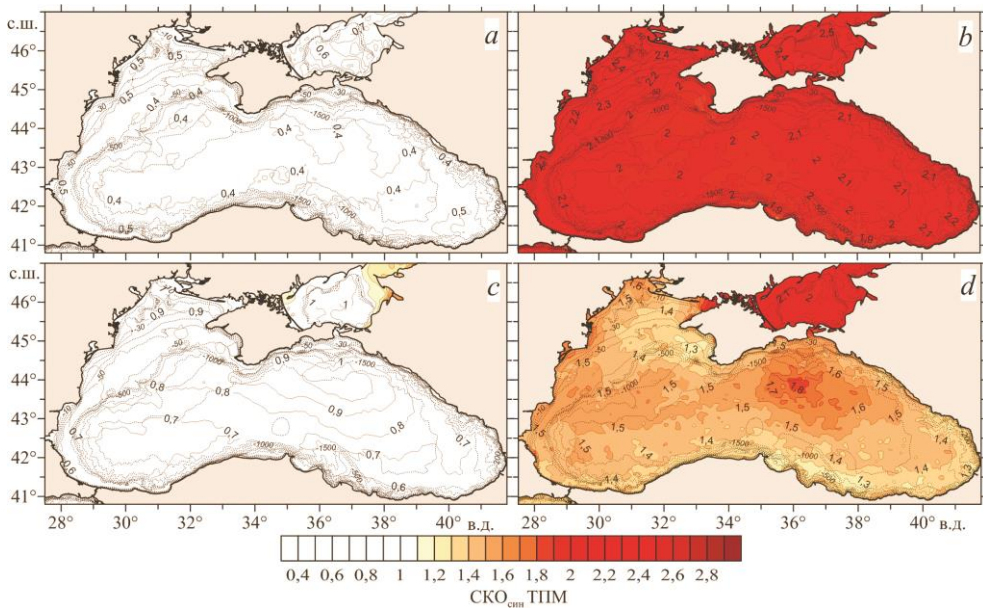


Р и с. 1. Распределение среднееголетних величин $СКО_{\text{син}}$ ТПМ (a), $СКО_{\text{син}}/СКО_{\text{общ}}$ (b), $СКО_{\text{син}}/СКО_{\text{меж}}$ (c). Стрелками показаны векторы среднегодовых геострофических течений на поверхности, пунктирными линиями – изобаты; точки 1, 2, 3 – узлы сетки, для которых на рис. 3, d приводятся графики внутригодовых распределений величин $СКО_{\text{син}}$ ТПМ

F i g. 1. Distribution of the long-term average values of SST $RMSD_{\text{syn}}$ (a), $RMSD_{\text{syn}}/RMSD_{\text{tot}}$ (b), $RMSD_{\text{syn}}/RMSD_{\text{interann}}$ (c). The arrows indicate the vectors of the annual average geostrophic currents on the surface; the dotted lines are isobaths; points 1, 2 and 3 are the grid nodes for which the graphs of intra-annual distributions of the SST $RMSD_{\text{syn}}$ values are represented on Fig. 3, d

На большей части акватории моря уровень синоптической изменчивости ниже или сопоставим с межгодовой и величины $СКО_{\text{син}}/СКО_{\text{меж}}$ изменяются в пределах 0,88–1 (рис. 1, c). Синоптическая изменчивость ТПМ превышает межгодовую ($СКО_{\text{син}}/СКО_{\text{меж}} > 1$) в прибрежных районах западной части мо-

ря, где выявлены максимальные значения $СКО_{\text{син}}$, – в Каркинитском заливе, в районе Днепро-Бугского лимана, на западном шельфе от Днестровского лимана до Бургасского залива, на прибосфорском шельфе. В восточной части моря синоптические вариации ТПМ ниже межгодовых и превышают их только в Керченском проливе. Несмотря на высокий уровень синоптической изменчивости в зонах ВЦК и Батумского антициклона, $СКО_{\text{син}}/СКО_{\text{меж}}$ здесь ниже 0,92, что связано с высоким уровнем межгодовой изменчивости ТПМ в этих районах [5].



Р и с. 2. Пространственное распределение климатических величин $СКО_{\text{син}}$ ТПМ в феврале (a), мае (b), августе (c), октябре (d)
F i g. 2. Spatial distribution of the SST RMSD_{syn} climatic values in February (a), May (b), August (c), October (d)

Из анализа пространственных распределений значений $СКО_{\text{син}}$ для каждого месяца и их внутригодового хода вдоль отдельных меридианов следует, что минимальная синоптическая изменчивость ТПМ наблюдается в феврале – марте (рис. 2, a; 3, a – c), в период максимального охлаждения поверхностных вод. В эти месяцы величины $СКО_{\text{син}}$ на всей акватории не превышают 0,3–0,4°C. В апреле, когда начинается интенсивный прогрев, происходит резкое повышение уровня синоптической изменчивости, который достигает максимума в мае (рис. 2, b; 3, a – c). В этом месяце величины $СКО_{\text{син}}$ ТПМ на акватории изменяются в пределах 1,8–2,6°C. В июне скорость прогрева поверхностных вод максимальна [25], при этом уровень синоптической изменчивости резко понижается. В июле скорость прогрева замедляется, а уровень синоптической изменчивости продолжает понижаться и достигает минимума в августе (рис. 2, c; 3, a – c), когда ТПМ максимальна на всей акватории. В этом месяце величины $СКО_{\text{син}}$ не превышают 0,7–0,9°C. В сентябре, с началом осеннего охлаждения вод, уровень синоптической изменчивости начина-

ет повышаться, и в октябре наблюдается его второй максимум с величинами $СКО_{\text{син}} \sim 1,2-1,9^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, *d*). В ноябре, когда наблюдается максимум скорости осенне-зимнего выхолаживания поверхностных вод, уровень синоптической изменчивости ТПМ снова уменьшается и продолжает постепенно понижаться до февраля – марта (рис. 3, *a – c*).

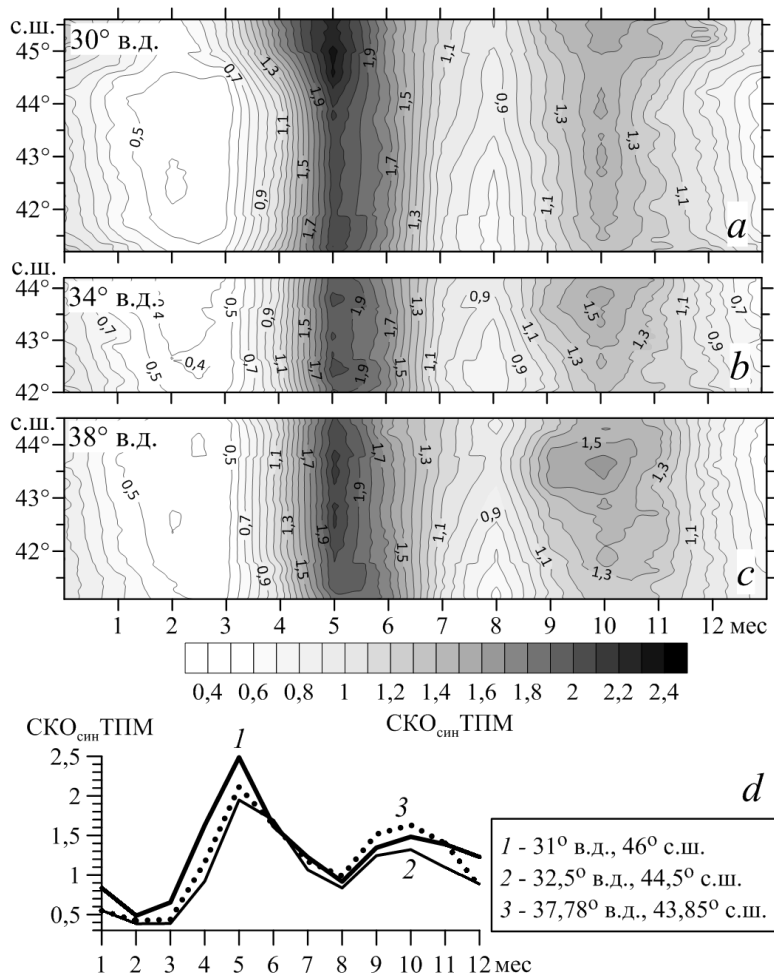


Рис. 3. Внутригодовой ход климатических величин $СКО_{\text{син}}$ ТПМ вдоль 30° в. д. (*a*), 34° в. д. (*b*), 38° в. д. (*c*) и в отдельных узлах 1, 2, 3 (*d*)

Fig. 3. Intra-annual cycle of the SST RMSD_{syn} climatic values along 30° E (*a*), 34° E (*b*), 38° E (*c*), and in separate grid nodes 1, 2, 3 (*d*)

Характер сезонного сигнала уровня синоптической изменчивости ТПМ не изменяется по пространству даже в районах с экстремальными значениями среднееголетних $СКО_{\text{син}}$. Из рис. 3, *d* видно, что сезонный сигнал $СКО_{\text{син}}$ в точке 1 (в области максимума среднееголетних значений $СКО_{\text{син}}$ на северо-западном шельфе), в точке 2 (к западу от Крыма, где прослеживается минимум $СКО_{\text{син}}$) и в точке 3 (на северо-восточной периферии ВЦК, где наблюдаются повышенные значения $СКО_{\text{син}}$) одинаков.

Несмотря на заметные внутригодовые изменения уровня синоптической изменчивости ТПМ, основные пространственные особенности, выявленные для распределения среднемноголетних величин $СКО_{\text{син}}$, наблюдаются во все месяцы. Максимальные значения $СКО_{\text{син}}$ в течение всего года прослеживаются на северо-западном шельфе (рис. 3, *a*). Повышенные значения $СКО_{\text{син}}$ наблюдаются на прибосфорском шельфе (рис. 3, *a*) и в восточной части моря на северной периферии ВЦК (рис. 3, *b*). Уменьшение значений $СКО_{\text{син}}$ отмечается над прибрежной частью Анатолийского побережья (рис. 3, *c*).

Анализ межгодовых вариаций $СКО_{\text{син}}$ ТПМ за период 1982–2018 гг. выявил заметные изменения уровня синоптической изменчивости ТПМ Черного моря от года к году. Значения межгодовых аномалий среднегодовых $СКО_{\text{син}}$ ($АнСКО_{\text{син}}$) на всей акватории изменяются в интервале $-0,3 \dots 0,3^{\circ}\text{C}$. При этом особенности пространственного распределения, выявленные для среднемноголетних величин $СКО_{\text{син}}$ (см. рис. 1, *a*), проявляются во все годы: максимальные среднегодовые значения $СКО_{\text{син}}$ всегда прослеживаются на северо-западном шельфе (рис. 4, *a*), повышенные значения $СКО_{\text{син}}$ – в области прибосфорского шельфа и на северной периферии ВЦК, пониженные – в прибрежной части Анатолийского побережья и у западных берегов Крыма.

В отличие от климатического внутригодового хода величин $СКО_{\text{син}}$ ТПМ, характер которого не изменяется на всей акватории моря, распределения межгодовых $АнСКО_{\text{син}}$ ТПМ в разных районах моря различаются (рис. 4, *b*). Так, на северо-западном шельфе (точка 1) величины среднегодовых $СКО_{\text{син}}$ ТПМ в период 1982–2002 гг. были преимущественно ниже или близки к их среднемноголетнему значению, при этом наибольшие отрицательные аномалии $СКО_{\text{син}}$ (до $-0,15^{\circ}\text{C}$) отмечались в 1989 и 1998 гг. К западу от Крыма (точка 2) и на северо-восточной периферии ВЦК (точка 3) в эти годы величины $СКО_{\text{син}}$ были близки к климатической норме.

Начиная с 2003 г. на всей акватории среднегодовые $СКО_{\text{син}}$ ТПМ были преимущественно выше среднемноголетнего значения, за исключением 2009 и 2017 гг. Максимальные положительные аномалии $СКО_{\text{син}}$ наблюдались на северо-западном шельфе (точка 1), в 2007, 2011, 2012 и 2016 гг. они достигали $0,25, 0,18, 0,2, 0,17^{\circ}\text{C}$ соответственно (рис. 4, *b*). Во временных рядах межгодовых аномалий $СКО_{\text{син}}$ в точке 1 и среднегодовых значений индекса ВАК прослеживается значимый положительный линейный тренд, а индекса ВА/ЗР – отрицательный тренд (рис. 4, *b, c*). Вместе с тем в распределениях межгодовых аномалий среднегодовых $СКО_{\text{син}}$ и индексов ВАК, САК и ВА/ЗР общие периодичности явно не проявляются (рис. 4, *b, c*). Так, высокие отрицательные аномалии $СКО_{\text{син}}$ ($-0,2 \dots -0,3^{\circ}\text{C}$) в 2009 г. наблюдались при положительной фазе ВАК, отрицательной фазе САК и близком к нулю значении индекса ВА/ЗР, тогда как в 2017 г. – при положительной фазе ВАК, отрицательной фазе ВА/ЗР и близком к нулю значении индекса САК (рис. 4, *b, c*).

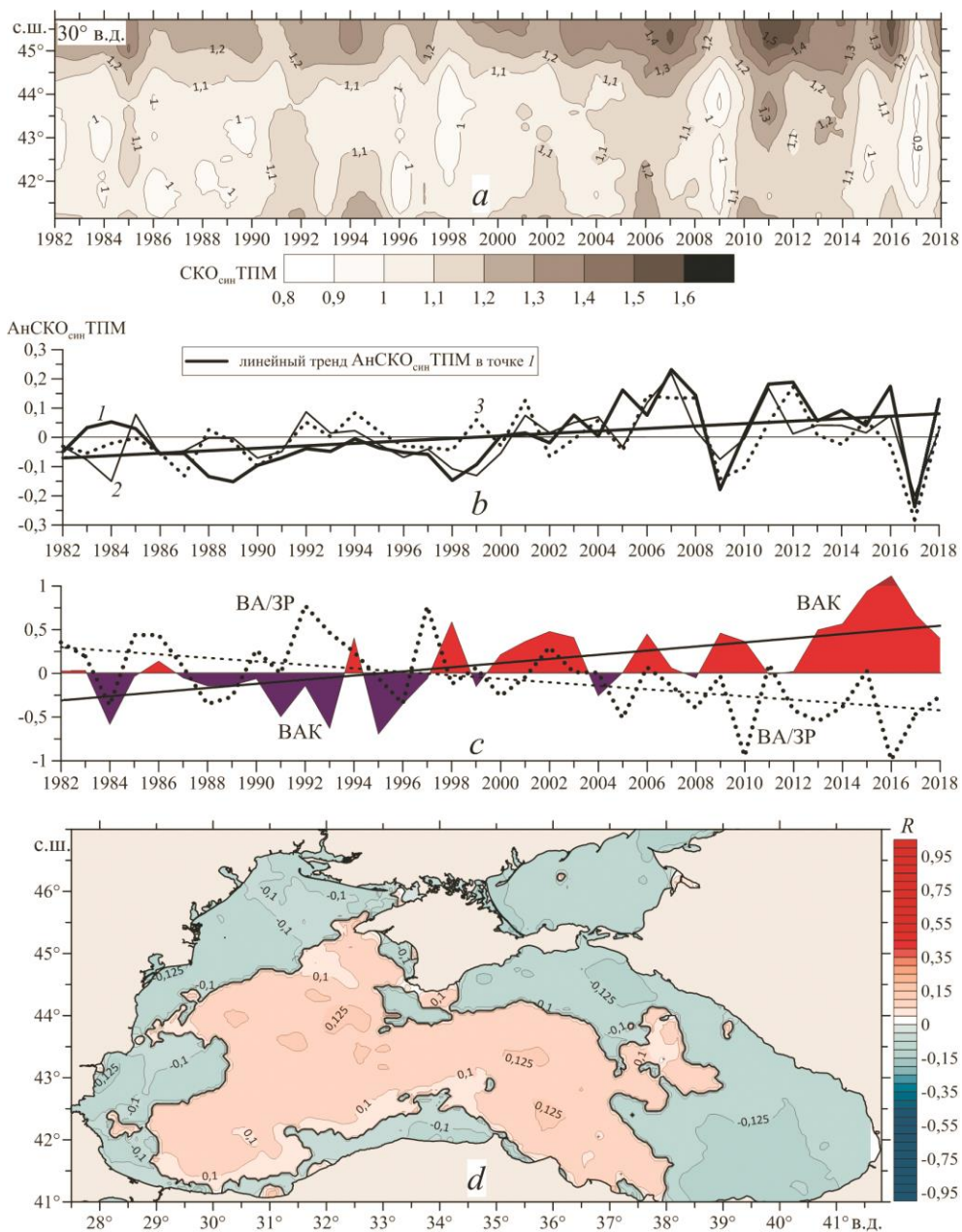


Рис. 4. Межгодовой ряд среднегодовых величин $SKO_{\text{син}} \text{ТПМ}$ вдоль 30° в. д. (a), межгодовые аномалии $АнSKO_{\text{син}} \text{ТПМ}$ в узлах 1, 2, 3 (b), межгодовой ряд среднегодовых величин индексов ВАК и ВА/ЗР и их линейные тренды (c), пространственное распределение максимумов R взаимно-корреляционных функций между значениями $SKO_{\text{син}} \text{ТПМ}$ и индекса ВА/ЗР (d)

Fig. 4. Inter-annual time series of the annual average values of the SST $RMSD_{\text{syn}}$ along $30^\circ E$ (a), interannual anomalies of the SST $RMSD_{\text{syn}}$ at the grid nodes 1, 2 and 3 (b), the inter-annual time series of annual average values of the EAO and EA/WR indices and their linear trends (c), spatial distribution of the maximum R of the cross-correlation functions between the values of the SST $RMSD_{\text{syn}}$ and EA/WR index (d)

Распределения максимумов R взаимно-корреляционных функций, рассчитанных в каждом узле сетки между временными рядами среднемесячных значений $СКО_{\text{син}}$ и индексов ВАК, САК и ВА/ЗР за период 1982–2018 гг., показали, что на всей акватории моря между этими параметрами нет значимой связи. Самые высокие значения максимумов R были выявлены для взаимно-корреляционных функций между $СКО_{\text{син}}$ и индексом ВА/ЗР (рис. 4, d), но даже они не превышают по абсолютной величине 0,125. Отметим, что для межгодовой изменчивости самой ТПМ, наоборот, выявлена значимая корреляционная связь с индексом САК [5, 7].

Заключение

На основе анализа спутниковых данных за период 1982–2018 гг. показано, что максимальная среднемноголетняя синоптическая изменчивость ТПМ ($СКО_{\text{син}} \sim 1,25\text{--}1,35^\circ\text{C}$) наблюдается над глубинами моря менее 20–30 м в прибрежной части северо-западного шельфа от Днепро-Бугского лимана до дельты Дуная, в Каркинитском заливе и в Керченском проливе. Повышение уровня синоптической изменчивости ($СКО_{\text{син}} \sim 1,1\text{--}1,25^\circ\text{C}$) отмечается вдоль всего западного шельфа, в прибосфорском районе над глубинами моря менее 75 м и в областях Восточного циклонического круговорота и Батумского антициклона. Минимальные значения $СКО_{\text{син}}$ (ниже 1°C) наблюдаются в узкой прибрежной полосе вдоль Анатолийского побережья и к западу от берегов Крыма.

Наибольший вклад синоптической изменчивости в общую дисперсию поля ТПМ наблюдается в Керченском проливе и южнее Керченского п-ова, минимальный – в юго-западной части моря в области ЗЦК. На большей части акватории моря уровень среднемноголетней синоптической изменчивости ТПМ ниже или сопоставим с уровнем межгодовой изменчивости. Синоптические вариации ТПМ превышают межгодовые только в Керченском проливе, на северо-западном и прибосфорском шельфах.

Во внутригодовом цикле уровень синоптической изменчивости ТПМ характеризуется полугодовой периодичностью, обусловленной крупномасштабными процессами выхолаживания и прогрева вод. Максимумы наблюдаются в мае и октябре, за месяц до наступления максимумов скорости прогрева и охлаждения поверхностных вод, минимумы – в феврале – марте и в августе, в периоды максимального охлаждения и прогрева.

На всей акватории моря значения межгодовых аномалий среднегодовых $СКО_{\text{син}}$ ТПМ изменяются в пределах $-0,3 \dots 0,3^\circ\text{C}$. Во все годы максимальные среднегодовые значения $СКО_{\text{син}}$ ТПМ прослеживаются на северо-западном шельфе, минимальные – в прибрежной части Анатолийского побережья и у западных берегов Крыма.

В распределениях межгодовых аномалий среднегодовых $СКО_{\text{син}}$ и индексов атмосферной циркуляции ВАК, САК и ВА/ЗР общие периодичности явно не прослеживаются. Отмечено только наличие положительного линейного тренда временных рядов межгодовых аномалий среднегодовых значений $СКО_{\text{син}}$ на северо-западном шельфе, при этом в межгодовых распределениях среднегодовых значений индекса ВАК также прослеживается положительный линейный тренд, а индекса ВА/ЗР – отрицательный тренд. Между вре-

менными рядами значений $SKO_{\text{син}}$ и индексов ВАК, САК и ВА/ЗР значимая корреляционная связь не выявлена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data (1982–2000) // *Journal of Marine Systems*. 2004. Vol. 52, iss. 1–4. P. 33–50. doi:10.1016/j.jmarsys.2004.05.002
2. *Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A.* Sea Surface Temperature Variability / The Black Sea Environment // *The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. Vol. 5, Part Q. P. 255–275. doi:10.1007/698_5_067
3. *Tuzhilkin V. S.* Thermohaline Structure of the Sea / The Black Sea Environment // *The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. Vol. 5, part Q. P. 217–253. doi:10.1007/698_5_077
4. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
5. *Artamonov Yu. V., Skripaleva E. A., Fedirko A. V.* Regional Features of Long-term Variability of the Black Sea Surface Temperature // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2017. Vol. 42, iss. 2. P. 105–112. doi:10.3103/S1068373917020042
6. *Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z.* Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // *Journal of Marine Systems*. 2006. Vol. 60, iss. 3–4. P. 235–254. doi:10.1016/j.jmarsys.2005.11.011
7. *Kazmin A. S., Zatsepin A. G.* Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connection with the large-scale atmospheric forcing // *Journal of Marine Systems*. 2007. Vol. 68, iss. 1–2. P. 293–301. doi:10.1016/j.jmarsys.2007.01.002
8. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* Долговременная изменчивость температуры поверхности Черного моря и ее отклик на глобальные атмосферные воздействия // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Вып. 5, т. II. С. 76–83.
9. *Shapiro G. I., Aleynik D. L., Mee L. D.* Long term trends in the sea surface temperature of the Black Sea // *Ocean Science*. 2010. Vol. 6, iss. 2. P. 491–501. doi:10.5194/os-6-491-2010
10. *Interannual variability of Black Sea's hydrodynamics and connection to atmospheric patterns / A. Capet [et al.] // Deep-Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2012, Vol. 77–80. P. 128–142. doi:10.1016/j.dsr2.2012.04.010
11. *Sakalli A., Başusta N.* Sea surface temperature change in the Black Sea under climate change: A simulation of the sea surface temperature up to 2100 // *International Journal of Climatology*. 2018. Vol. 38, iss. 13. P. 4687–4698. doi:10.1002/joc.5688
12. *Mesoscale circulation and thermohaline structure of the Black Sea observed during Hydro-Black '91 / T. Oguz [et al.] // Deep-Sea Research*. 1994. Vol. 41, iss. 4. P. 603–628. doi:10.1016/0967-0637(94)90045-0
13. *Synoptic variability in the Black Sea: Analysis of hydrographic survey and altimeter data / E. Sokolova [et al.] // Journal of Marine Systems*. 2001. Vol. 31, iss. 1–3. P. 45–63. doi:10.1016/S0924-7963(01)00046-X
14. *Зацепин А. Г., Гинзбург А. И., Евдошенко М. А.* Вихревые структуры и горизонтальный водообмен в Черном море // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря*. М. : Наука, 2002. С. 55–81.
15. *Observation of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing / A. G. Zatsepin [et al.] // Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108, iss. C8. 3246. P. 1–27. doi:10.1029/2002JC001390
16. *Кубряков А. А., Станичный С. В.* Синоптические вихри в Черном море по данным спутниковой альтиметрии // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 1. С. 65–77. doi:10.7868/S0030157415010104

17. Hydrological Conditions in the Western Part of the Black Sea in November, 2015 (Based on the Data Obtained in the 81st Cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*) / Yu. V. Artamonov [et al.] // *Physical Oceanography*. 2016. Iss. 4. P. 57–70. doi:10.22449/1573-160X-2016-4-57-70
18. Восстановление синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря на основе реанализа за 1980–1993 годы / П. Н. Лишаев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 5. С. 49–68.
19. Изменчивость поля температуры и температурных фронтов в северо-западной части Черного моря по спутниковым данным / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14, № 3. С. 237–245. doi:10.21046/2070-7401-2017-14-3-237-245
20. A re-analysis of Black Sea surface temperature / B. B. Nardelli [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2010. Vol. 79, iss. 1–2. P. 50–64. doi:10.1016/j.jmarsys.2009.07.001
21. High and Ultra-High resolution processing of satellite Sea Surface Temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project / B. B. Nardelli [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 129. P. 1–16. doi:10.1016/j.rse.2012.10.012
22. *Монин А. С.* Гидродинамика атмосферы, океана и земных недр // СПб. : Гидрометеозидат, 1999. 524 с.
23. *Belokopytov V. N.* Retrospective Analysis of the Black Sea Thermohaline Fields on the Basis of Empirical Orthogonal Functions // *Physical Oceanography*. 2018. Vol. 25, iss. 5. P. 380–389. doi:10.22449/1573-160X-2018-5-380-389
24. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Dynamics of Batumi Anticyclone from the Satellite Measurements // *Physical Oceanography*. 2015. Iss. 2. P. 59–68. doi:10.22449/1573-160X-2015-2-59-68
25. Среднегодовое внутригодовое изменение гидрооптических характеристик, хлорофилла *a* и температуры на поверхности Черного моря по спутниковым данным / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16, № 1. С. 171–180. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-1-171-180

Об авторах:

Артамонов Юрий Владимирович, ведущий научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ResearcherID: AAC-6651-2020**, artam-ant@yandex.ru

Скрипалева Елена Александровна, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ResearcherID: AAC-6648-2020**, sea-ant@yandex.ru

Федирко Александр Викторович, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: AAC-6629-2020**, vault102@gmail.com