

Изменчивость температуры поверхности моря у берегов Крыма в 2022–2023 годах по данным экспедиционных и спутниковых измерений

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

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

По данным гидрологических измерений, выполненных у берегов Крыма в ходе рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2022–2023 гг., и спутниковым данным *Copernicus* исследована изменчивость поля температуры на поверхности моря на разных временных масштабах. По данным контактных измерений показано, что внутrigодовая амплитуда температуры в 2022 г. составила 18.2 °С, в 2023 г. – 16.6 °С. Максимальные диапазоны пространственных изменений температуры на полигоне (до 4–5 °С) наблюдались в периоды интенсивного прогрева и охлаждения поверхностных вод в апреле – мае и декабре 2022 г. и в октябре 2023 г. На синоптическом масштабе периоды повышения (понижения) температуры соответствовали периодам ослабления (усиления) локального ветра с запаздыванием реакции температуры на изменения скорости ветра на 10–12 ч. По спутниковым данным показаны отличия внутrigодового цикла температуры и уровня ее синоптической изменчивости в 2022 и 2023 гг. от климатических норм. В 2022 г. минимум и максимум температуры наблюдались на две недели позже, чем по климатическим данным, в 2023 г. время наступления минимума соответствовало климатическому, а максимум наблюдался на две недели раньше, чем по климатическим данным. Основной максимум уровня синоптической изменчивости температуры прослеживался в 2022 г. в ноябре, в 2023 г. – в декабре (по климатическим данным – в мае). Показано, что в период с 2022 по 2023 г. наблюдались преимущественно положительные среднемесячные аномалии температуры относительно климатических норм, отражающие тенденцию к повышению температуры в течение последних двух лет.

Ключевые слова: Черное море, температура поверхности моря, спутниковые измерения, контактные измерения, пространственно-временная изменчивость

Благодарности: работа выполнена в рамках в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014. Данные получены в Центре коллективного пользования «Научно-исследовательское судно „Профессор Водяницкий“» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН».

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

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

Для цитирования: Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В. Изменчивость температуры поверхности моря у берегов Крыма в 2022–2023 годах по данным экспедиционных и спутниковых измерений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 6–26. EDN QXGFKD.

Sea Surface Temperature Variability off the Crimea Coast in 2022–2023 According to *in situ* and Satellite Measurements

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

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The paper studies the variability of the temperature field at the sea surface on different time scales using hydrological measurements made off the coast of Crimea during 2022–2023 cruises of R/V *Professor Vodyanitsky* and *Copernicus* satellite data. It is shown that the intra-annual temperature amplitude according to *in situ* measurements in 2022 was 18.2 °C, whereas in 2023, it was 16.6 °C. The maximum ranges of spatial temperature changes at the polygon (up to 4–5 °C) were observed during periods of intense heating and cooling of surface waters in April–May and December 2022 and October 2023. On the synoptic scale, the periods of temperature increases (decreases) corresponded to those of local wind decreases (increases) with a delay in the temperature response to changes in the wind speed by 10–12 hours. Satellite data showed differences in the temperature intra-annual cycle and the level of its synoptic variability in 2022 and 2023 from climate norms. In 2022, the minimum and maximum temperatures in the intra-annual cycle were observed two weeks later than according to climate data. In 2023, the time of occurrence of the minimum corresponded to the climate one, and the maximum was observed two weeks earlier than it had been expected from the climate data. The main maximum in the level of synoptic temperature variability was observed in November 2022 and in December 2023, but not in May as it had been expected from the climate data. It is shown that from 2022 to 2023 predominantly positive average monthly temperature anomalies against the climate norms were observed. This reflects the upward tendency in temperature over the past two years.

Keywords: Black Sea, sea surface temperature, satellite measurements, *in situ* measurements, spatiotemporal variability

Acknowledgements: The work was carried out under FSBSI FRC MHI state assignment FNNN-2024-0014. The data were obtained at the Center for Collective Use R/V *Professor Vodyanitsky* of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS.

For citation: Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A. and Fedirko, A.V., 2024. Sea Surface Temperature Variability off the Crimea Coast in 2022–2023 According to *in situ* and Satellite Measurements. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 6–26.

Введение

Решение современных задач, связанных с рациональным использованием ресурсов Черного моря и сохранением его экосистемы, требует постоянного мониторинга состояния гидрологической структуры вод. Особое внимание уделяется исследованию изменчивости поля температуры, так как этот параметр относится к числу важнейших абиотических факторов, оказывающих влияние на экосистему моря. В работах¹⁾ [1–7] показано, что в общую изменчивость поля температуры поверхности моря (ТПМ) основной вклад вносят сезонные и межгодовые вариации. Показано, что сезонная изменчивость ТПМ определяется не только процессами прогрева и выхолаживания вод, но и в значительной степени адвекцией вод Основным Черноморским течением (ОЧТ). Перенос ОЧТ теплых вод с востока и юго-востока к берегам Крыма приводит к повышению ТПМ в зимне-весенний период, к ослаблению внутригодовых температурных контрастов и, как следствие, к минимальному уровню сезонной изменчивости ТПМ у Крымского побережья [6]. Установлено, что на межгодовую изменчивость ТПМ оказывают влияние крупномасштабные атмосферные процессы и изменение интенсивности ОЧТ [6, 8–10]. В работах [3, 11–17] показано, что в последние годы происходит заметное потепление вод Черного моря, которое наблюдается даже в холодном промежуточном слое.

В работах [5, 7, 18–26] показано, что, кроме процессов сезонного и межгодового масштабов, в изменчивости поля температуры Черного моря важную роль играют процессы, связанные с влиянием синоптических вихревых образований, локальных метеоусловий и апвеллингов. Интенсивное формирование синоптических меандров и круговоротов, приводящее к образованию температурных аномалий [24–26], а также вынос азовоморских вод через Керченский пролив [27] обусловили высокий уровень синоптической изменчивости ТПМ в прибрежной зоне Крыма от Керченского пролива до Гераклеяского п-ова [7]. Отметим, что в последнее десятилетие мониторинг состояния гидрологической структуры вод и оценка пространственно-временной эволюции поля температуры непосредственно у берегов Крыма, где наиболее выражено антропогенное воздействие [28, 29], проводились преимущественно по данным экспедиционных измерений на НИС «Профессор Водяницкий» с относительно большим расстоянием между станциями (20–30 км). В связи с этим особый интерес представляют результаты измерений, выполненных в 2022–2023 гг., когда гидрологические съемки у берегов Крыма проводились по учащенной сетке станций, при этом в ряде экспедиций съемки повторялись дважды. Данные повторных съемок, полученные в ходе 122-го и 123-го рейсов НИС «Профессор Водяницкий», совместно с данными спутниковых измерений температуры позволили детально проанализировать пространственную структуру поля ТПМ и особенности ее синоптической изменчивости у берегов Крыма в летний период 2022 г. [30].

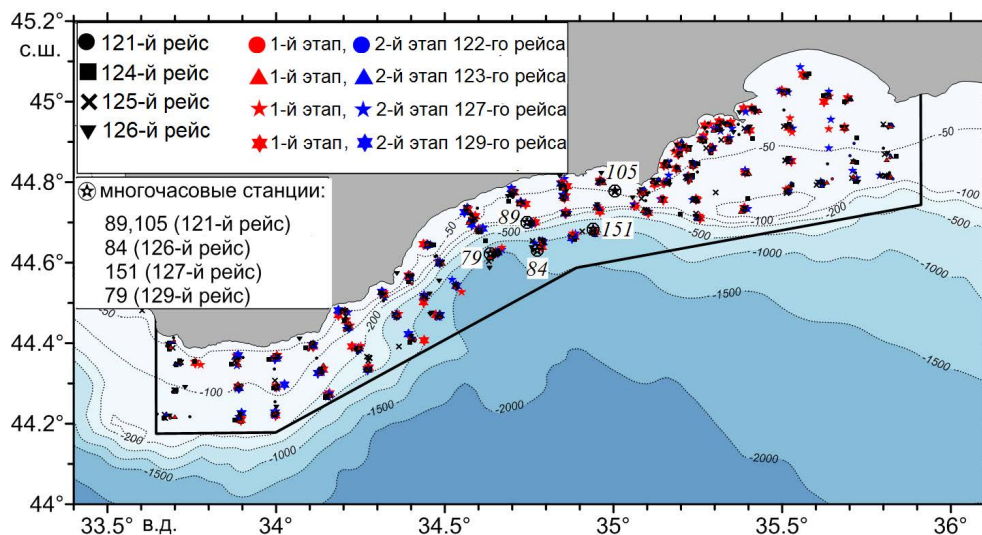
Цель настоящей работы – по данным измерений, выполненных в ходе восьми рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2022–2023 гг., и спутниковым данным *Copernicus* исследовать изменчивость поля ТПМ в северной части Черного моря у берегов Крыма на разных временных масштабах.

¹⁾ Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.]. Ленинград : Гидрометеоздат, 1984. 240 с.

Материалы и методика

Гидрологические измерения в 2022 и 2023 гг. проводились в 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127 и 129-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий» у берегов Крыма в пределах территориальных вод России (рис. 1). Сроки проведения измерений и количество выполненных станций в каждом рейсе представлены в таблице. Вследствие уменьшения площади акватории съемок в 2022–2023 гг. по сравнению с предыдущими экспедициями увеличилось количество гидрологических станций в пределах полигона и были получены более детальные пространственные распределения ТПМ в прибрежной зоне Крыма. Резерв экспедиционного времени дал возможность провести в четырех рейсах (122, 123, 127 и 129-м) повторные гидрологические съемки, при этом координаты станций в ходе всех этапов почти совпадали. В 2022 г. гидрологические измерения проводились во все сезоны, в 2023 г. – весной, летом и осенью, что дает возможность оценить сезонные изменения ТПМ. Температура морской воды измерялась на каждой станции с помощью зондирующего *CTD*-комплекса *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320PlusM* с погрешностью $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ и разрешением $0.0001\text{ }^{\circ}\text{C}$ (http://www.technopole.com.ru/downloads/doc_212.pdf) преимущественно в дневное время суток. Анализ распределения поля температуры проводился в поверхностном слое на горизонте 2 м. В ходе всех рейсов было выполнено пять многочасовых гидрологических станций, положение которых показано на рис. 1.

В работе также использовались среднесуточные данные спутниковых измерений ТПМ с 1 января 2008 г. по 31 декабря 2023 г. со сверхвысоким пространственным разрешением $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ из массива *Black Sea High Resolution*



Р и с . 1. Схема гидрологических станций, выполненных у берегов Крыма в 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127 и 129-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий»

F i g . 1. Map of hydrological stations carried out off the Crimea coast during the 121st, 122nd, 123rd, 124th, 125th, 126th, 127th and 129th cruises of R/V *Professor Vodyanitsky*

Сроки проведения измерений и количество выполненных станций на полигоне в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2022–2023 гг.

Timing of measurements and the number of stations carried out at the polygon during the cruises of R/V *Professor Vodyanitsky* in 2022–2023

№ рейса / Cruise number	Дата / Date	Количество станций / Number of stations
121	19.04.2022–14.05.2022	87
122		
1-й этап / 1 st stage	07.06.2022–13.06.2022	75
2-й этап / 2 nd stage	17.06.2022–23.06.2022	73
123		
1-й этап / 1 st stage	16.08.2022–23.08.2022	78
2-й этап / 2 nd stage	26.08.2022–31.08.2022	78
124	02.10.2022–22.10.2022	113
125	02.12.2022–25.12.2022	128
126	16.03.2023–07.04.2023	90
127		
1-й этап / 1 st stage	14.06.2023–20.06.2023	64
2-й этап / 2 nd stage	22.06.2023–05.07.2023	71
129		
1-й этап / 1 st stage	05.10.2023–17.10.2023	66
2-й этап / 2 nd stage	17.10.2023–25.10.2023	34

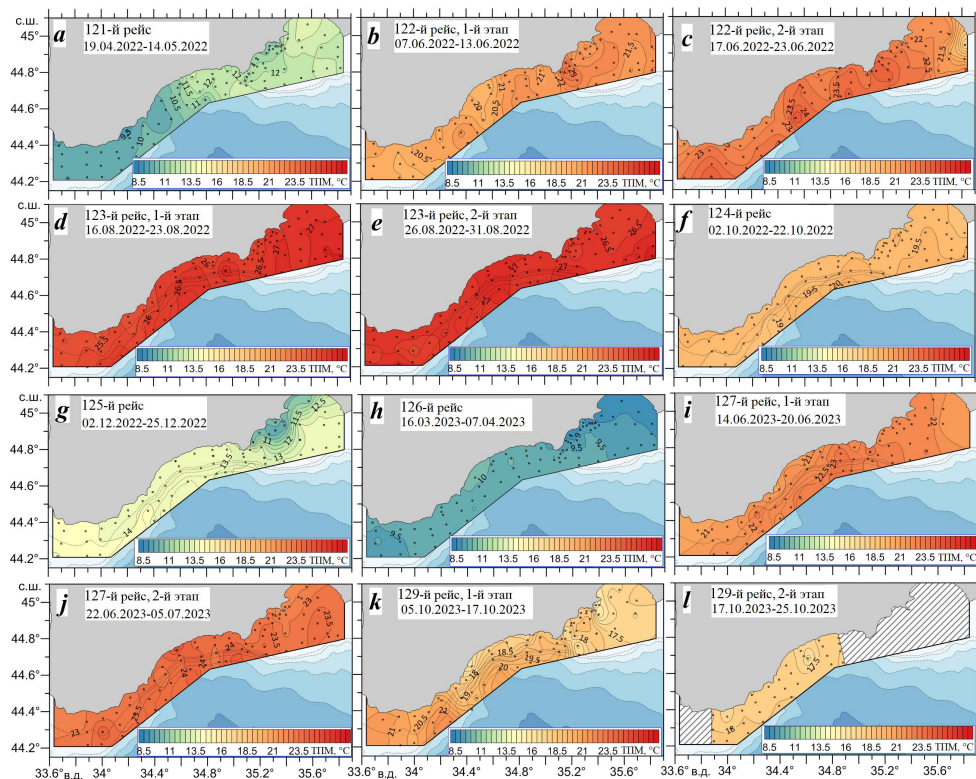
and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis² (продукт SST_BS_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_006) службы мониторинга морской среды *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)*, полученные с помощью современных алгоритмов обработки [31]. По этим данным рассчитывались статистические характеристики пространственно-временной изменчивости температуры.

Фактические значения скорости ветра выбирались из непрерывных записей, осуществляемых на каждой станции с помощью судовой метеостанции *AIRMAR-220WX*, и относились к началу срока выполнения гидрологических зондирований.

²⁾ Black Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis / E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/moi-00159> (date of access: 25.11.2024).

Основные результаты

Анализ данных контактных измерений, выполненных в 2022–2023 гг., показал сложную картину горизонтальных распределений фактической ТПМ (рис. 2), обусловленную совместным влиянием сезонной, синоптической и внутрисуточной изменчивости. Отметим, что корректный учет суточного хода ТПМ по контактным данным требует проведения непрерывных измерений на каждой гидрологической станции в течение суток и более, что в настоящее время в рамках выделяемого экспедиционного времени не реализуемо. Оценки суточного хода ТПМ, выполненные ранее по контактным и спутниковым данным [32, 33], показали, что он может достигать нескольких градусов и существенно зависит от района измерений, сезона и локальных синоптических условий (облачность и скорость ветра). Данные измерений ТПМ на многочасовых гидрологических станциях, выполненных в ходе 121, 126, 127 и 129-го рейсов, также показали, что суточный ход ТПМ заметно различался в разные сутки, сезоны и в разных районах полигона и мог достигать 1.6–2 °С, при этом в светлое время суток, когда проводились основные измерения на полигоне, изменения ТПМ не превышали 0.5 °С.



Р и с . 2 . Распределение ТПМ по данным измерений, выполненных в 121 (a), 122 (b, c), 123 (d, e), 124 (f), 125 (g), 126 (h), 127 (i, j) и 129-м (k, l) рейсах НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 2. SST distribution according to the measurements carried out in the 121st (a), 122nd (b, c), 123rd (d, e), 124th (f), 125th (g), 126th (h), 127th (i, j) and 129th (k, l) cruises of R/V *Professor Vodyanitsky*

Пространственное распределение ТПМ, по данным всех съемок, показало, что в полях ТПМ наиболее четко проявилась сезонная изменчивость. Так, по данным измерений в 2022 г., минимум ТПМ на полигоне наблюдался в апреле – мае (121-й рейс), когда ее значения изменялись в пределах 9.3–13.4 °С (рис. 2, *a*). В первой половине июня (122-й рейс, 1 этап) значения ТПМ возросли до 19.5–23.6 °С, в конце июня (122-й рейс, 2 этап) – до 17.5–24.5 °С (рис. 2, *b, c*). Во второй половине августа отмечались максимальные значения ТПМ, которые в ходе обоих этапов 123-го рейса достигали соответственно 24.9–27.5 и 25.6–27.5 °С (рис. 2, *d, e*). В октябре (124-й рейс) ТПМ заметно понизилась, ее значения изменялись в пределах полигона от 18.7 до 20.3 °С (рис. 2, *f*). В декабре (125-й рейс) отмечалось дальнейшее понижение значений ТПМ, которые не превышали 9.5–14.5 °С (рис. 2, *g*).

По данным измерений в 2023 г., самые низкие значения ТПМ (8.7–10.2 °С) наблюдались во второй половине марта и в начале апреля (126-й рейс) (рис. 2, *h*). Летом во второй половине июня отмечался заметный рост значений ТПМ, которые в ходе 1-го этапа 127-го рейса составляли 20.5–23.5 °С, а в ходе 2-го этапа возросли до 22.2–25.3 °С (рис. 2, *i, j*). Осенью в октябре ТПМ начала понижаться, и ее значения в период 1-го этапа 129-го рейса составляли 15.5–21.5 °С, в период 2-го этапа – 16.1–18.4 °С (рис. 2, *k, l*).

Таким образом, по данным всех съемок, минимальные значения ТПМ наблюдались весной 2022 г. (19 апреля – 14 мая) и 2023 г. (16 марта – 7 апреля), максимальные значения отмечались в конце августа 2022 г. и в конце июня – начале июля 2023 г. Внутригодовая амплитуда ТПМ, по данным измерений в 2022 г., составила 18.2 °С, в 2023 г. – 16.6 °С.

На фоне четко выраженных сезонных изменений в период каждой отдельной съемки распределение ТПМ на акватории полигона характеризовалось пространственной неоднородностью. Минимальные диапазоны пространственных изменений ТПМ на полигоне, не превышающие 1.5–2 °С, наблюдались в конце августа 2022 г. (2 этап 123-го рейса) (рис. 2, *e*) и во второй половине марта – начале апреля 2023 г. (126-й рейс) (рис. 2, *h*), когда на всей акватории отмечались соответственно наиболее теплые и холодные поверхностные воды. Максимальные пространственные изменения ТПМ на полигоне, достигающие 4–4.5 °С, наблюдались в апреле – мае (121-й рейс) и декабре (125-й рейс) 2022 г. и в первой половине октября 2023 г. (1-й этап 129-го рейса), когда происходили интенсивные прогрев и охлаждение поверхностных вод (рис. 2, *a, g, k*).

Выявленные изменения ТПМ на полигоне в период каждой отдельной съемки в условиях несинхронности ее выполнения представляют собой суперпозицию пространственной и временной изменчивости. Для корректной оценки соотношения уровней изменчивости различных типов использовались непрерывные среднесуточные данные спутниковых измерений. Пример распределения ТПМ по спутниковым данным за период с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г. вдоль изобаты 50 м, проходящей через весь полигон, представлен на рис. 3, *a*. Сопоставление значений ТПМ по контактными и спутниковым данным за одни и те же сутки в узлах сетки, наиболее приближенных к координатам гидрологических станций, показало, что изменение ТПМ по контактными данным в течение периода измерений хорошо коррелирует с изменением ТПМ по спутниковым данным (рис. 3, *b*). Коэффициент

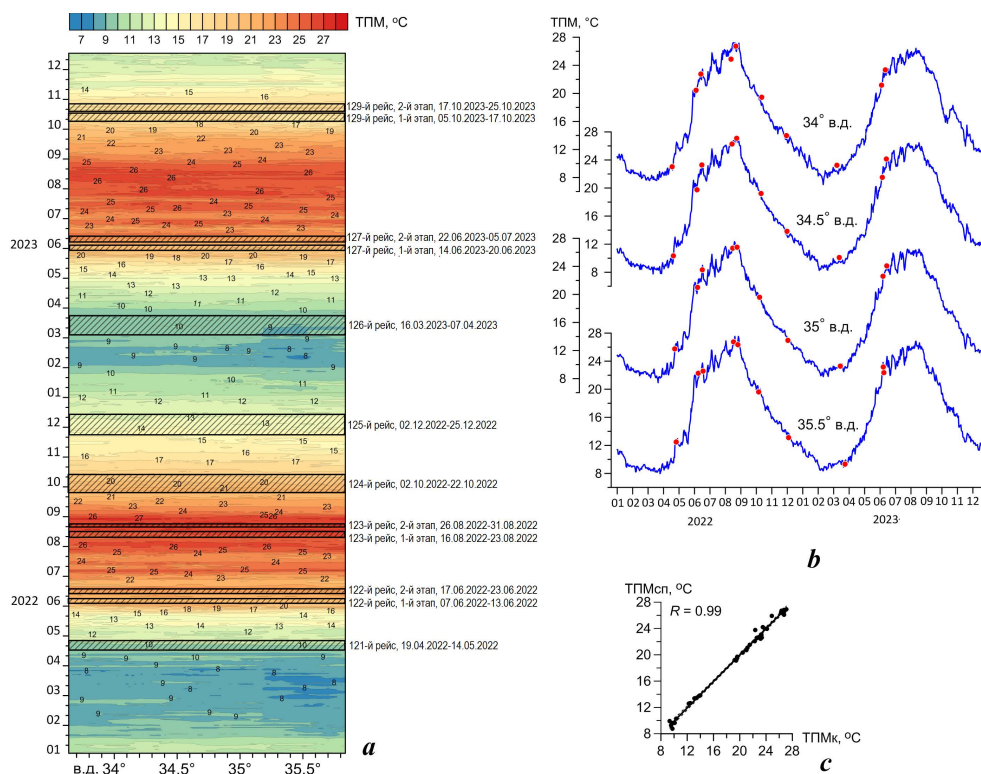
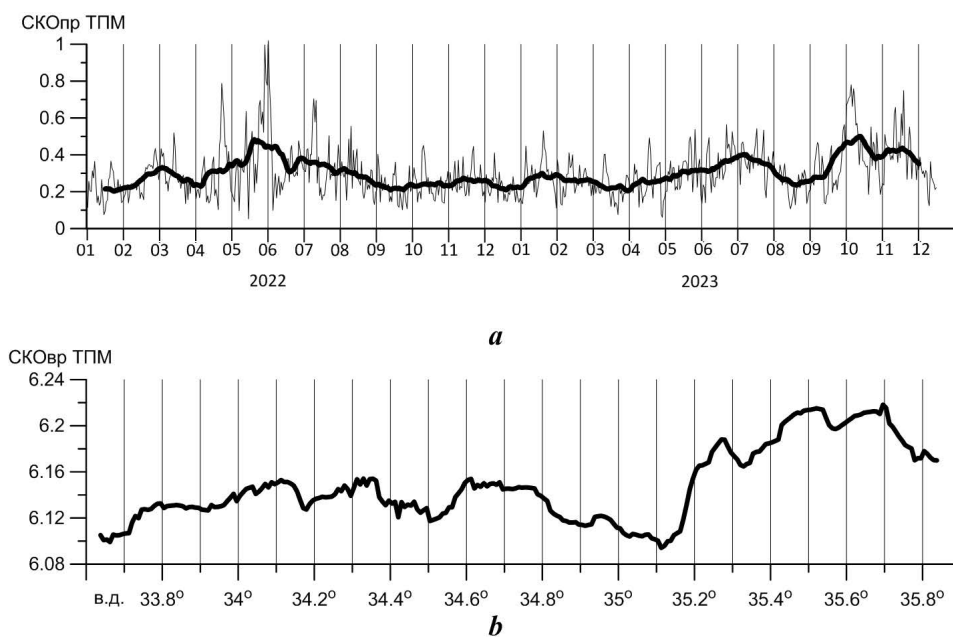


Рис. 3. Распределения среднесуточных значений ТПМ по спутниковым данным с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г. вдоль изобаты 50 м (периоды выполнения съемок оконтурены черными прямоугольниками) (а), среднесуточных значений спутниковой (синие кривые) и контактной ТПМ (красные точки) на отдельных меридианах в одни и те же сутки (b), график линейной связи между рядами спутниковой (ТПМсп) и контактной (ТПМк) температуры (штриховые линии – границы доверительного интервала 99%-ного уровня статистической достоверности) (c)

Fig. 3. Distributions of SST daily averaged values based on satellite data from 1 January 2022 to 31 December 2023 along the 50 m isobath (the periods of surveys are highlighted by black rectangles) (a), satellite SST daily averaged values on separate meridians (blue curves) and *in situ* SST values at these meridians on the same day (red dots) (b), a graph of the linear relationship between the satellite (SSTsat) and *in situ* (SSTis) temperature series (the dashed lines – 99% confidence interval boundaries) (c)

линейной корреляции R между рядами значений спутниковой и контактной ТПМ достигал 0.99 (рис. 3, *c*) с уровнем статистической значимости $\alpha = 0.01$ (99%-ный уровень статистической достоверности).

Высокое пространственно-временное разрешение спутниковых данных ТПМ и хорошая согласованность их с контактными значениями ТПМ позволяют использовать их для оценки соотношения временной и пространственной изменчивости температуры на полигоне. Примеры распределения значений пространственного среднеквадратичного отклонения ТПМ (СКОпр ТПМ) за каждые сутки и временного СКО ТПМ (СКОвр ТПМ), рассчитанного в каждом узле сетки с шагом 0.01° за период с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г., вдоль изобаты 50 м представлены на рис. 4. Среднесуточные значения пространственного СКОпр ТПМ в течение всего временного периода изменялись в пределах от 0.1 до 1.0 $^\circ\text{C}$ (рис. 4, *a*). Повышение уровня пространственной изменчивости ТПМ по спутниковым данным (до 0.7–0.8 $^\circ\text{C}$) во вторую половину апреля 2022 г. и в первую половину октября 2023 г. (рис. 5, *a*) согласуется с данными контактных измерений. В апреле – мае 2022 г. (121-й рейс) и в октябре 2023 г. (1-й этап 129-го рейса) также отмечалась высокая пространственная неоднородность поля ТПМ (рис. 2, *a, k*).



Р и с . 4 . Распределение среднесуточных значений пространственного СКО ТПМ (толстая кривая – сглаживание скользящим средним по 31 сут) (*a*) и значений временного СКО ТПМ за период с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г. (*b*) вдоль изобаты 50 м в пределах полигона измерений по спутниковым данным

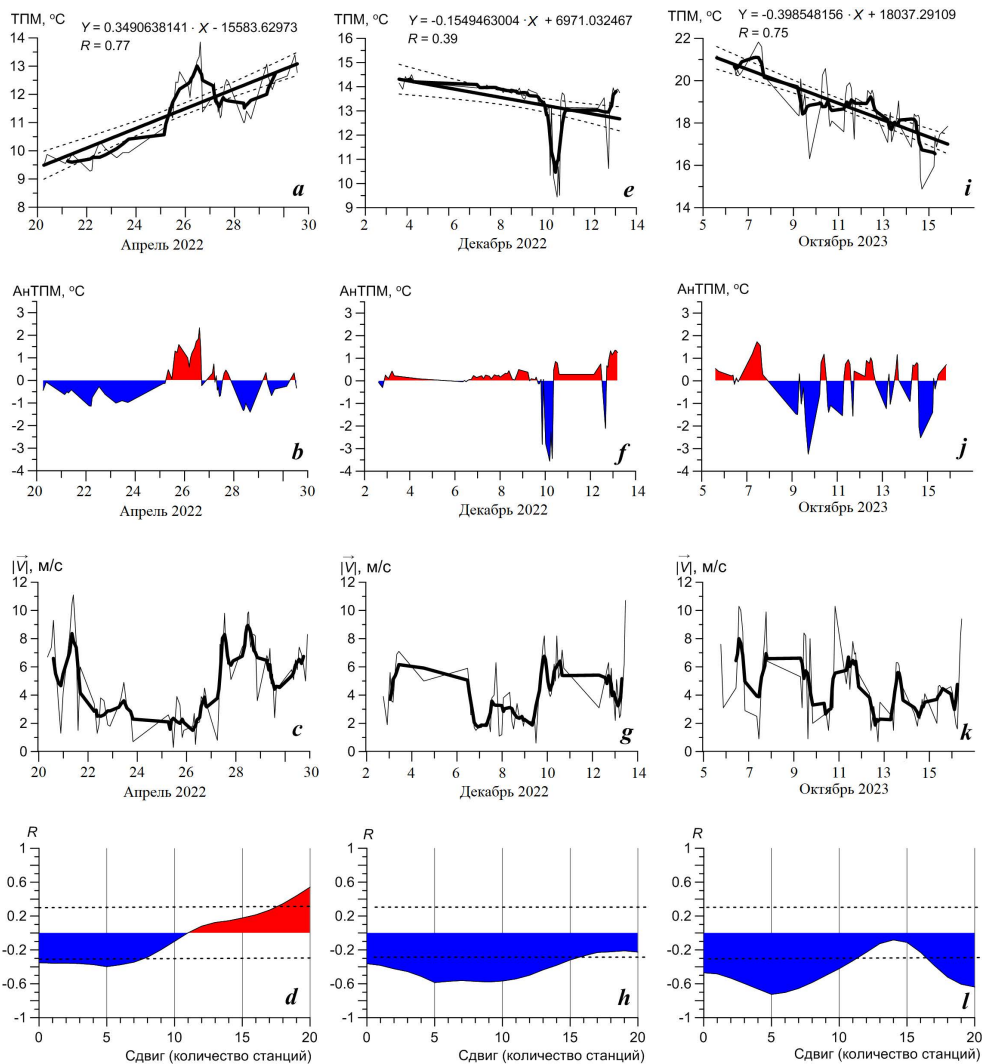
F i g . 4 . Distributions of daily averaged values of spatial SST RMSD (heavy curve – smoothing by a 31-day moving average) (*a*) and values of temporal SST RMSD for the period from 1 January 2022 to 31 December 2023 (*b*) along the 50 m isobath within the measurement polygon based on the satellite data

Распределение значений временного СКОвр ТПМ по спутниковым данным показало, что они слабо изменяются по пространству, например вдоль изобаты 50 м их изменения в пределах полигона составляют 6.10–6.22 °С (рис. 4, *b*). Наиболее высокие значения СКОвр ТПМ (выше 6.16 °С) выявлены восточнее м. Меганом в районе расширения прибрежного шельфа.

Таким образом, анализ спутниковых данных показал, что на акватории полигона уровень временной изменчивости ТПМ почти на порядок превосходит уровень ее пространственной изменчивости. Пространственная однородность распределения значений ТПМ на полигоне за каждые сутки и высокая согласованность спутниковых данных с данными контактных измерений дают основание полагать, что изменения ТПМ на акватории, выявленные по данным контактных измерений в период каждой отдельной съемки, в большей степени связаны с временной изменчивостью ТПМ, обусловленной синоптическими и сезонными колебаниями.

Отметим, что, по данным контактных измерений, на многочасовых станциях влияние внутрисуточной изменчивости на распределения ТПМ было минимальным, так как в дневное время, когда проводились измерения, изменения ТПМ не превышали 0.5 °С, в то время как ее сезонные изменения достигали 16.6–18.2 °С, а изменения ТПМ на полигоне в периоды отдельных съемок – 1.5–4.5 °С.

Рассмотрим более подробно особенности распределения ТПМ в зависимости от времени выполнения станций в периоды тех съемок, когда наблюдались максимальные изменения температуры на полигоне. Это апрель – май (121-й рейс) и декабрь (125-й рейс) 2022 г. и первая половина октября 2023 г. (1-й этап 129-го рейса) (рис. 5, *a, e, i*). По данным 121-го рейса в апреле – мае 2022 г. распределение ТПМ характеризовалось заметным повышением ее значений на станциях с запада на восток. Это повышение отражалось в значимом на 95%-ном уровне статистической достоверности ($\alpha = 0.05$) положительном тренде, который показывает интенсивный прогрев поверхностных вод, т. е. проявление сезонного сигнала в период выполнения съемки (рис. 5, *a*). Измерения на востоке полигона выполнялись почти на две недели позже, чем в западной части полигона. Распределение аномалий ТПМ относительно тренда (АнТПМ), отражающее более короткопериодные колебания синоптического масштаба, показало, что в апреле – мае 2022 г. (121-й рейс) наблюдалось чередование событий понижения и повышения ТПМ с периодом 3–4 дня. В начале и конце съемки отмечались отрицательные аномалии ТПМ относительно тренда (до 1.5 °С), в середине периода – высокие положительные аномалии (до 2.5 °С) (рис. 5, *b*). В период выполнения измерений не наблюдалось резкого локального понижения ТПМ на несколько градусов, сопровождающегося повышением солености, что характерно для апвеллинга [34, 35]. Кроме того, анализ метеорологических данных показал, что в ходе этого рейса не наблюдались явные атмосферные аномалии, которые могли бы повлиять на изменение ТПМ (например, длительные интенсивные осадки, холодное атмосферное вторжение с резким понижением температуры воздуха, прохождение циклонов). Эти факты дают основание предположить, что в данных условиях основное влияние на изменения ТПМ на синоптическом масштабе оказывал локальный ветер, вызывающий перемешивание



Р и с . 5 . Распределения ТПМ (тонкие кривые) на станциях в зависимости от времени их выполнения (толстые прямые – линейный тренд) (*a*, *e*, *i*); аномалий ТПМ относительно тренда (*b*, *f*, *j*); модуля скорости ветра (тонкие кривые) (*c*, *g*, *k*); графики взаимно-корреляционных функций между значениями ТПМ и модулем скорости ветра (*d*, *h*, *l*) по данным 121-го (*a* – *d*), 125-го (*e* – *h*) рейсов и 1-го этапа 129-го (*i* – *l*) рейса. Толстые кривые – сглаживание скользящим средним по семи станциям, штриховые кривые – границы доверительного интервала 99%-ного уровня статистической достоверности

Fig. 5. Distributions of SST (fine lines) at stations depending on the time of their execution (bold lines – linear trend) (*a*, *e*, *i*); SST anomalies relative to the trend (*b*, *f*, *j*); wind speed modulus (*c*, *g*, *k*); cross-correlation functions between SST values and the wind speed module (*d*, *h*, *l*) according to the data from the 121st (*a* – *d*), 125th (*e* – *h*), 1st stage of the 129th (*i* – *l*) cruises. The heavy curves – smoothing by moving average over 7 stations, the dashed curves – 99% confidence interval boundaries

поверхностного слоя вод. Согласно распределению модуля скорости приводного ветра $|\vec{V}|$ (рис. 5, *c*), периоды с положительными с аномалиями ТПМ примерно соответствовали периодам ослабления ветра и, наоборот, усиление ветра приводило к появлению отрицательных аномалий ТПМ. Для количественных оценок связи изменений ТПМ с изменениями скорости ветра на станциях были рассчитаны взаимно-корреляционные функции между значениями ТПМ и модулем скорости ветра с уровнем статистической значимости $\alpha = 0.01$ (99%-ный уровень статистической достоверности). Отметим, что для корректного расчета кросскорреляционной функции ряды ТПМ и скорости ветра формировались в зависимости от номера станции без учета различия во временных интервалах между выполнением соседних станций. Это связано с тем, что расстояние между соседними станциями на полигоне в большинстве случаев примерно одинаково, тогда как временной интервал между выполнением соседних станций может различаться (до нескольких часов), а при расчете требуется одинаковый шаг сдвига. Анализ взаимно-корреляционной функции между значениями ТПМ и модулем скорости ветра показал, что наиболее высокий уровень обратной связи с коэффициентом корреляции R до -0.35 наблюдался на фазовом сдвиге около пяти станций (рис. 5, *d*). Время выполнения пяти станций в среднем составляет 10–12 ч, так как среднее время выполнения соседних станций, рассчитанное как отношение общего количества часов в периоде измерений к количеству выполненных станций, составляет 2–2.5 ч. Аналогичное запаздывание реакции ТПМ на изменения скорости ветра примерно на 10–12 ч было получено по данным 122-го и 123-го рейсов летом 2022 г. [30].

В декабре 2022 г. (125-й рейс) в распределении ТПМ наблюдался относительно слабый, но значимый отрицательный тренд, связанный с сезонным выхолаживанием вод (рис. 5, *e*). Во второй половине периода съемки, когда измерения проводились в мелководной части полигона к востоку от м. Меганом (рис. 2, *g*), прослеживались высокие отрицательные аномалии ТПМ (до $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 5, *f*). В этот период преобладал южный и юго-западный ветер ($180\text{--}225^{\circ}$), который с учетом конфигурации береговой линии был сгонным и мог бы вызвать развитие апвеллинга. В то же время анализ вертикальных распределений температуры и солености на станциях в районе понижения ТПМ показал, что это понижение не прослеживалось глубже 25 м, при этом воды пониженной температуры характеризовались минимумом солености. Если бы понижение ТПМ было вызвано апвеллингом, т. е. подъемом глубинных холодных и более соленых вод, то в данном районе отмечалось бы повышение солености во всем подповерхностном слое, а не ее понижение. Вероятнее всего, это понижение ТПМ было связано с перемешиванием верхнего слоя под влиянием заметного усиления скорости ветра (рис. 5, *g*). В конце периода измерений у восточной границы полигона отмечалась положительная аномалия ТПМ (до $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$), при этом наблюдалось понижение скорости ветра (рис. 5, *f*, *g*). Так же, как и по данным 121-го рейса, была выявлена значимая связь между ТПМ и модулем скорости ветра с запаздыванием реакции ТПМ на изменения скорости ветра примерно на 10–12 ч, при этом максимальные значения коэффициента R достигали -0.6 (рис. 5, *h*).

В первой половине октября 2023 г. (1-й этап 129-го рейса) (рис. 5, *i*) в распределении ТПМ прослеживался хорошо выраженный отрицательный тренд, характеризующий выхолаживание поверхностных вод. Наблюдалось чередование положительных и отрицательных аномалий ТПМ относительно тренда (рис. 5, *j*). Максимальные отрицательные аномалии ($-2.5...-3.3$ °C) отмечались в прибрежной зоне к востоку от м. Аю-Даг и в Феодосийском заливе, максимальные положительные аномалии (до 1.5 °C) – на мористой станции на траверзе м. Ай-Годор (рис. 5, *j*). Распределение модуля скорости ветра (рис. 5, *k*) показало также чередование периодов усиления и ослабления скорости ветра на синоптическом масштабе, соответствующее периодам понижения и повышения ТПМ, при этом максимальное значение R составило -0.7 при сдвиге примерно $10-12$ ч (рис. 5, *l*).

Таким образом, выявленная изменчивость ТПМ на полигоне в период каждой отдельной съемки была связана как с проявлением сезонных изменений на внутримесячном масштабе при несинхронном выполнении измерений, так и с синоптическими вариациями ТПМ, обусловленными изменениями скорости локального ветра.

Несмотря на то что экспедиционные измерения проводились во все сезоны, они носят дискретный характер с большим временным интервалом между съемками. Эти фрагментарные данные не дают представления о непрерывной эволюции поля ТПМ, не показывают, в какую фазу внутригодового цикла ТПМ проводились рейсовые измерения. Для уточнения этих особенностей анализировались непрерывные ряды среднесуточных данных спутниковых измерений.

Пространственная однородность распределения среднесуточных значений ТПМ по спутниковым данным обуславливает квазисинхронность ее внутригодовых изменений на акватории всего полигона. Это иллюстрирует сезонный цикл ТПМ в разных районах исследуемой акватории, полученный по среднесуточным значениям за период с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г. и по климатическим значениям, осредненным посуточно за период с 1 января 2008 г. по 31 декабря 2023 г. Примеры внутригодовых распределений ТПМ в разных районах акватории показывают, что внутригодовой цикл ТПМ в 2022 и в 2023 гг. (рис. 6, *a*) и ее климатический внутригодовой цикл (рис. 6, *b*) почти не изменяются в пределах полигона. Некоторые отличия выявлены только для климатических значений ТПМ, которые в восточной части полигона (35.5° в. д.) в период охлаждения поверхностных вод с декабря по март понижаются почти на 1.5 °C по сравнению с остальной частью акватории (рис. 6, *b*). Более низкая температура поверхностных вод на обширном шельфе в восточной части полигона наблюдалась также по контактными экспедиционным данным в декабре 2022 г. (рис. 2, *g*) и в конце марта – начале апреля 2023 г. (рис. 2, *h*). Минимальные климатические значения ТПМ ($6.5-8$ °C) наблюдаются с середины февраля до середины марта, максимальные значения ТПМ (25 °C) – в середине августа (рис. 6, *b*).

Сопоставление сезонного цикла ТПМ в 2022 г. (рис. 6, *a*) с ее климатическим сезонным циклом (рис. 6, *b*) показало, что минимум и максимум ТПМ в этом году наблюдались во второй половине марта и в конце августа, т. е. примерно на две недели позже, чем по климатическим данным. Максимальные (27.5 °C) и минимальные ($8-9$ °C) значения ТПМ были выше климатических

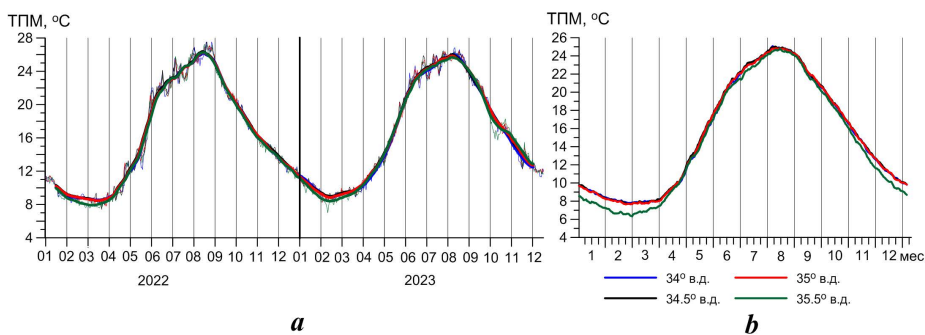


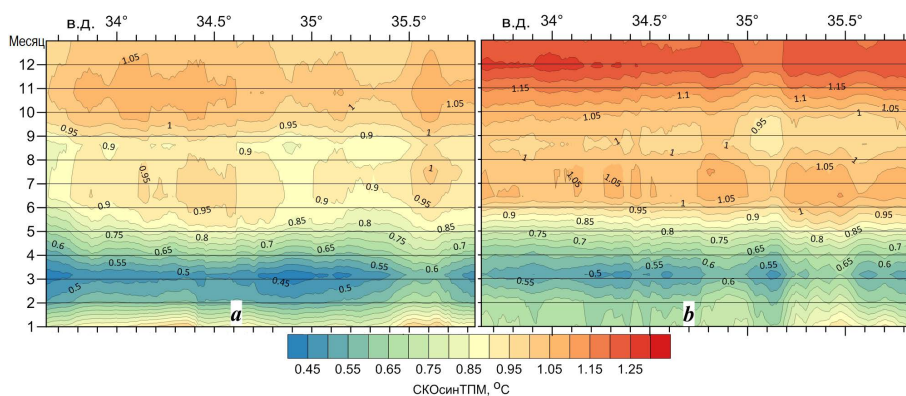
Рис. 6. Распределение среднесуточных значений ТПМ за период с 1 января 2022 по 31 декабря 2023 г. (толстые кривые – сглаживание скользящим средним по 31 сут) (а) и ее среднесуточных климатических значений с 1 января по 31 декабря (б) на разных меридианах в узлах сетки, расположенных над изобатой 50 м, по спутниковым данным.

Fig. 6. Distribution of SST daily averaged values for the period from 1 January 2022 to 31 December 2023 (the heavy curves are smoothed by a 31-day moving average) (a) and its daily mean climate values from 1 January to 31 December (b) at different meridians at grid nodes located above the 50 m isobath, according to the satellite data

почти на 2.5 и 1–1.5 °С соответственно (рис. 6). Отметим, что, по данным контактных экспедиционных измерений, в 2022 г. максимальные значения ТПМ также отмечались во второй половине августа и достигали 27.5 °С (рис. 2, d, e).

В 2023 г. время наступления минимума ТПМ, по спутниковым данным, соответствовало климатическому, а значения ТПМ так же, как и в 2022 г., были выше климатических на 1–1.5 °С и составляли 8–9 °С (рис. 6). Максимальные значения ТПМ (26.5 °С) наблюдались в конце июля – начале августа, примерно на две недели раньше, чем по климатическим данным, и были почти на 1 °С ниже, чем в 2022 г., и на 1.5 °С выше климатических значений (рис. 6).

Среднесуточные спутниковые данные позволили оценить синоптическую (внутримесячную) изменчивость ТПМ в 2022 и 2023 гг. и выявить ее отличия от климатических норм. Согласно работам [7, 22], климатический годовой цикл уровня синоптической изменчивости ТПМ, т. е. значений среднеквадратических отклонений ТПМ на синоптическом масштабе (СКОсин ТПМ), в северной части Черного моря характеризуется полугодовой периодичностью с максимумами в мае (основной максимум) и октябре и минимумами в феврале – марте (основной минимум) и августе. По нашим данным, в 2022 г. основной максимум значений СКОсин ТПМ прослеживался не в мае, как по климатическим данным, а в ноябре (1–1.1 °С) (рис. 7, a), в 2023 г. – в декабре (1.2–1.25 °С) (рис. 7, b). Второе, более слабое повышение уровня синоптической изменчивости ТПМ в 2022 и 2023 гг. отмечалось не в октябре, как по климатическим данным, а в июле, при этом значения СКОсин ТПМ в 2022 г. достигали 0.95–1.05 °С, в 2023 г. – 1–1.1 °С (рис. 7). Отметим, что выявленный по данным контактных измерений высокий диапазон изменчивости ТПМ на полигоне в первой половине октября 2023 г. (рис. 2, k) согласуется с повышением уровня синоптической изменчивости ТПМ в октябре 2023 г. по спутниковым данным (рис. 7, b).

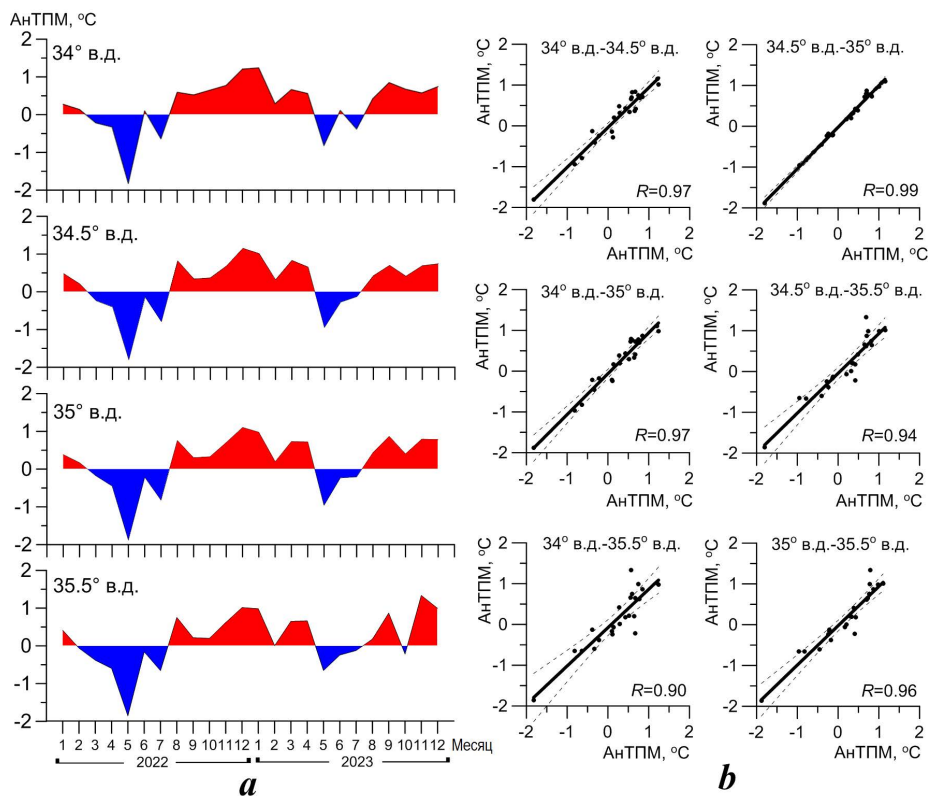


Р и с . 7. Внутригодовой ход значений СКОсин ТПМ по спутниковым данным в 2022 (a) и 2023 гг. (b) вдоль изобаты 50 м в пределах полигона съемок

F i g . 7. Intra-annual variation of the SST RMSDsyn values based on the satellite data in 2022 (a) and 2023 (b) along the 50 m isobath within the survey area

Минимальные значения СКОсин ТПМ (0.4–0.5 °С) в 2022 и 2023 гг. наблюдались в марте. Второе понижение уровня синоopticической изменчивости отмечалось в августе – сентябре (СКОсин ТПМ ~ 0.85–0.9 °С в 2022 г. и 0.9–0.95 °С в 2023 г.) (рис. 7). В целом периоды понижения уровня синоopticической изменчивости ТПМ, по спутниковым данным, в 2022 и 2023 гг. соответствовали климатическому внутригодовому циклу и соответствовали периодам максимального охлаждения и прогрева поверхностных вод. По данным контактных измерений, минимальные диапазоны изменений ТПМ на полигоне, связанных с синоopticическими вариациями, также наблюдались в конце августа 2022 г. и во второй половине марта – начале апреля 2023 г., когда на всей акватории отмечались соответственно наиболее теплые и холодные поверхностные воды (рис. 2, e, h).

Помимо особенностей сезонной и синоopticической изменчивости непрерывные ряды спутниковых данных дали возможность оценить проявление межгодовых изменений ТПМ в течение двух лет. Так как уровень межгодовой изменчивости ТПМ в исследуемом районе сопоставим с уровнем ее синоopticической изменчивости [7], среднесуточные значения ТПМ осреднялись помесячно для каждого месяца 2022 и 2023 гг., что позволило минимизировать проявление синоopticической изменчивости. Затем рассчитывались среднемесячные аномалии ТПМ (АнТПМ) для 2022 и 2023 гг. как разность фактического значения ТПМ и климатического среднееголетнего значения ТПМ для этого месяца. Распределение этих аномалий, исключая проявление сезонной и синоopticической изменчивости, позволило выявить отличия среднемесячных значений ТПМ в 2022 и в 2023 гг. от климатической нормы и оценить межгодовые изменения ТПМ. Распределения АнТПМ в разных районах полигона показали, что межгодовые изменения ТПМ, так же как и ее внутригодовой цикл, качественно одинаковы на всей акватории (рис. 8, a). Оценки линейной связи рядов АнТПМ в разных узлах сетки показали их высокую пространственную согласованность с коэффициентами корреляции $R \sim 0.90–0.99$ с уровнем статистической значимости $\alpha = 0.01$ (рис. 8, b).



Р и с . 8 . Распределение АнТПМ с января 2022 г. по декабрь 2023 г. в отдельных узлах сетки над изобатой 50 м (а); графики линейной связи между рядами АнТПМ на разных меридианах (штриховые линии – границы доверительного интервала 99%-ного уровня статистической достоверности) (b)

F i g . 8 . Distribution of AnSST from January 2022 to December 2023 at separate grid nodes above the 50 m isobath (a), graphs of the linear relationship between AnSST series on different meridians (the dashed lines – 99 % confidence interval boundaries) (b)

Распределения АнТПМ показали, что отличия среднемесячных значений ТПМ по спутниковым данным в период с 2022 по 2023 гг. от климатических норм достигали почти 2 °С по абсолютной величине. Значения ТПМ были выше климатических в январе – феврале 2022 г., с августа 2022 г. по апрель 2023 г. и с августа по декабрь 2023 г. Максимальные положительные аномалии ТПМ (1–1.3 °С) прослеживались в декабре 2022 г. и январе 2023 г., а также ноябре – декабре 2023 г. (рис. 8, а). Значения ТПМ были ниже климатических только с марта по июль 2022 г. и с мая по июль 2023 г. Максимальные (по абсолютной величине) отрицательные аномалии ТПМ в течение 2022 и 2023 гг. наблюдались в мае, при этом их значения в 2023 г. (–0.7...–1 °С) уменьшились почти вдвое по сравнению с 2022 г. (–1.8...–2 °С) (рис. 8, а). В целом ряды среднемесячных аномалий ТПМ за 2022–2023 гг. с преобладанием их положительных значений отражают тенденцию к повышению ТПМ в течение последних двух лет (рис. 8, а).

Выводы

По данным гидрологических измерений, выполненных у берегов Крыма в ходе рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2022–2023 гг., и спутниковым данным *Copernicus* оценена изменчивость ТПМ на разных временных масштабах. Показано, что минимальные значения ТПМ по данным съемок наблюдались в апреле – мае 2022 г. и марте – апреле 2023 г., максимальные значения отмечались в конце августа 2022 г. и в конце июня – начале июля 2023 г. Внутригодовая амплитуда ТПМ в 2022 г. составила 18.2 °С, в 2023 г. – 16.6 °С.

Показано, что минимальные диапазоны изменений ТПМ на полигоне (1.5–2 °С) наблюдались в конце августа 2022 г. и во второй половине марта – начале апреля 2023 г., когда на всей акватории отмечались соответственно наиболее теплые и холодные поверхностные воды. Максимальные изменения ТПМ (до 4–4.5 °С) наблюдались в апреле – мае и декабре 2022 г. и в первой половине октября 2023 г., когда происходили интенсивные прогрев и охлаждение поверхностных вод.

Выявлено, что пространственная неоднородность поля ТПМ была связана с сезонным прогревом или охлаждением вод, проявляющимся на внутримесячном масштабе, и с синоптическими вариациями ТПМ, обусловленными локальными атмосферными условиями. Периоды повышения (понижения) ТПМ на синоптическом масштабе соответствовали периодам ослабления (усиления) локального ветра, при этом реакция ТПМ на изменения скорости ветра запаздывала на 10–12 ч.

Выявлена высокая согласованность данных спутниковых и контактных измерений ТПМ с коэффициентом корреляции $R \sim 0.99$. Выявлены отличия внутригодового цикла среднесуточных значений ТПМ по спутниковым данным в 2022 и 2023 гг. от климатических норм. В 2022 г. минимальные и максимальные значения ТПМ были выше климатических почти на 2.5 и 1.5 °С соответственно и наблюдались примерно на две недели позже, чем по климатическим данным. В 2023 г. максимальные и минимальные значения ТПМ были выше климатических почти на 1.5 °С, при этом время наступления минимума ТПМ соответствовало климатическому, а максимум ТПМ наблюдался примерно на две недели раньше, чем по климатическим данным.

Выявлены отличия от климатической нормы во внутригодовых циклах уровня синоптической изменчивости ТПМ. В 2022 г. основной максимум прослеживался не в мае, как следует из климатических данных, а в ноябре, в 2023 г. – в декабре. Второе повышение уровня синоптической изменчивости в 2022 и 2023 гг. отмечалось в июле, а не в октябре, как показывают климатические данные. Периоды понижения уровня синоптической изменчивости ТПМ в 2022 и 2023 гг. соответствовали климатическому внутригодовому циклу и наблюдались в марте (основной минимум) и августе – сентябре. По данным контактных рейсовых измерений, в 2022–2023 гг. минимальные синоптические вариации ТПМ также наблюдались в конце августа 2022 г. и во второй половине марта – начале апреля 2023 г.

По спутниковым данным показано, что среднемесячные аномалии ТПМ относительно климатических норм с 2022 по 2023 г. были преимущественно положительными. Максимальные положительные аномалии ТПМ (1–1.3 °С) наблюдались с декабря 2022 г. по январь 2023 г. и в ноябре – декабре 2023 г.

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. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.05.002>
2. *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. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.11.011>
3. *Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A.* Sea surface temperature variability // *The Black Sea Environment / A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev (eds.)*. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2008. P. 255–275. (The Handbook of Environmental Chemistry ; vol. 5Q). https://doi.org/10.1007/698_5_067
4. *Tuzhilkin V. S.* Thermohaline Structure of the Sea // *The Black Sea Environment / A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev (eds.)*. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2008. P. 217–253. (The Handbook of Environmental Chemistry ; vol. 5Q). https://doi.org/10.1007/698_5_077
5. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
6. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В.* Региональные особенности климатической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 2. С. 56–67. EDN XWUADV.
7. *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. EDN UXHNYT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-2-202-213>
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, № 2. С. 76–83. EDN NDPVON.
9. *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. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.01.002>
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. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.010>
11. *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. P. 491–501. <https://doi.org/10.5194/os-6-491-2010>
12. *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. <https://doi.org/10.1002/joc.5688>
13. Climate signals in the Black Sea from a multidecadal eddy-resolving reanalysis / L. Lima [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. 710973. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.710973>
14. *Подымов О. И., Зацепин А. Г., Очередник В. В.* Рост солености и температуры в деятельном слое северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 год // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 3. С. 279–287. EDN GVAYYQ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-279-287>

15. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Анализ долговременной изменчивости гидродинамических полей в верхнем 200-метровом слое Черного моря на основе результатов реанализа // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 5. С. 617–630. EDN PILFWG.
16. *Stanev E. V., Peneva E., Chtirkova B.* Climate change and regional ocean water mass disappearance: case of the Black Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. Vol. 124, iss. 7. P. 4803–4819. <https://doi.org/10.1029/2019JC015076>
17. *Морозов А. Н., Маньковская Е. В.* Холодный промежуточный слой Черного моря по данным экспедиционных исследований 2016–2019 годов // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 5–16. EDN RALEUS. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-5-16>
18. 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. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(01\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(01)00046-X)
19. Observation of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing / A. G. Zatsepin [et al.] // *Journal of Geophysical Researches*. 2003. Vol. 108, iss. C8. 3246. <https://doi.org/10.1029/2002JC001390>
20. Синоптическая термохалинная изменчивость в Российской прибрежной зоне Черного моря / В. С. Тужилкин [и др.] // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2012. № 6. С. 46–53. EDN PUZPJP.
21. 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. EDN TECAXL.
22. *Новиков А. А., Тужилкин В. С.* Сезонные и региональные вариации синоптических аномалий температуры воды в северо-восточной части прибрежной зоны Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 1. С. 42–52. EDN VBUSPJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-1-42-52>
23. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. Vol. 97. P. 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.12.002>
24. Thermohaline structure, transport and evolution of the Black Sea eddies from hydrological and satellite data / A. A. Kubryakov [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2018. Vol. 167. P. 44–63. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2018.07.007>
25. Сезонные и синоптические изменения структуры вод к юго-западу от Крымского полуострова в осенне-зимний период 2017 г. (98-й и 101-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2019. Вып. 3. С. 4–18. EDN RKBEUX. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-3-4-18>
26. Циркуляция вод в северной части Черного моря летом-зимой 2018 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 1. С. 69–90. EDN CИHJZC. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-69-90>
27. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алескерова [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 6. С. 53–64. EDN YLLPXN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-53-64>
28. *Иванов В. А., Катунина Е. В., Совга Е. Е.* Оценки антропогенных воздействий на экосистему акватории Гераклеийского полуострова в районе расположения глубинных стоков // *Процессы в геосредах*. 2016. Т. 1, № 5. С. 62–68. EDN VTPRWP.

29. Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова / В. Г. Бондур [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 103–115. EDN FGPURM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-103-1115>
30. Синоптическая изменчивость температуры воды у берегов Крыма летом 2022 года по данным контактных и спутниковых измерений / Ю. В. Артамонов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 6. С. 851–866. EDN WWPBEI.
31. High and ultra-high resolution processing of satellite sea surface temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project / V. B. Nardelli [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 129. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.012>
32. Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Сезонный и суточный ход температуры вод Черного моря по данным термопрофилирующих дрейфующих буев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 5. С. 268–281. EDN CIQYLL. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-268-281>
33. Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Сезонная изменчивость суточного хода температуры поверхностного слоя Черного моря по данным сканера SEVIRI // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 171–184. EDN BGXSET. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-171-184>
34. Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе спутникового мониторинга / Р. В. Боровская [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2008. № 2. С. 26–36. EDN IJUSQN.
35. Ломакин П. Д. Апвеллинг в Керченском проливе и прилегающей акватории Черного моря на базе контактных и спутниковых данных // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 123–133. EDN VLPZBG. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-2-123-133>

Поступила 9.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 22.07.2024 г.;
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

Об авторах:

Артамонов Юрий Владимирович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **SPIN-код: 9350-8966**, **ResearcherID: AAC-6651-2020**, artam-ant@yandex.ru

Скрипалева Елена Александровна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 6064-4860**, **ResearcherID: AAC-6648-2020**, sea-ant@yandex.ru

Федирко Александр Викторович, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2496-1715**, **ResearcherID: AAC-6629-2020**, vault102@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Артамонов Юрий Владимирович – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, разработка методик, качественный анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы, формулирование выводов

Скрипалева Елена Александровна – обзор литературы по проблеме исследования, качественный анализ результатов и их интерпретация, обработка и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, подготовка текста статьи, доработка текста

Федирко Александр Викторович – разработка и отладка компьютерных программ для обработки данных, компьютерная реализация алгоритмов, построение графиков и схем, участие в обсуждении материалов статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.