

Синоптическая изменчивость температуры воды у берегов Крыма летом 2022 года по данным контактных и спутниковых измерений

Ю. В. Артамонов , Е. А. Скрипалева, А. В. Федирко,
Н. В. Никольский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 artam-ant@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.06.2023; одобрена после рецензирования 01.09.2023;
принята к публикации 06.09.2023.

Аннотация

Цель. Цель данной работы – уточнить особенности изменения температуры на поверхности Черного моря у берегов Крыма летом 2022 г. на синоптическом масштабе по данным контактных и спутниковых измерений температуры воды и приводного ветра.

Методы и результаты. Использовались данные гидрологических измерений, выполненных в ходе 122-го (7–23 июня 2022 г.) и 123-го (16–31 августа 2022 г.) рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в северной части Черного моря. Температура воды измерялась с помощью CTD-комплекса *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 PlusM*, скорость и направление ветра – с помощью судовой метеостанции *AIRMAR-220WX*. Также использовались среднесуточные данные спутниковых измерений температуры поверхности моря из массива *Black Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis* с пространственным разрешением $0,01^\circ \times 0,01^\circ$ и скорости ветра из массива *Global Ocean Hourly Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model* с пространственным разрешением $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ службы мониторинга морской среды *Copernicus*. По данным контактных и спутниковых измерений рассчитывались статистические характеристики распределений температуры воды и скорости ветра. Показано, что отличия в распределениях температуры по данным двух этапов съемок в указанных рейсах были обусловлены особенностями сезонного цикла температуры и синоптическими вариациями приводного ветра. Выявлена значимая обратная корреляция между модулем скорости ветра и температурой, максимальный уровень которой наблюдался в западной части полигона примерно между м. Айя и м. Сарыч.

Выводы. Показано, что летом 2022 г. наибольшие значения синоптических аномалий температуры на поверхности моря по контактным и спутниковым измерениям наблюдались в районах расширения прибрежного шельфа – в Феодосийском заливе и между м. Сарыч и м. Аю-Даг. Синоптические изменения температуры были обусловлены преимущественно изменением скорости локального ветра.

Ключевые слова: побережье Крыма, Феодосийский залив, синоптическая изменчивость, температура поверхности моря, поле ветра

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования». Авторы выражают глубокую благодарность В. В. Давыдову, А. В. Гармашову, С. А. Шутову, Д. В. Дерюшкину, Р. О. Шаповалову, С. В. Щербаченко, А. Г. Кушнеру за проведение гидрологических и метеорологических измерений в ходе 122-го и 123-го рейсов НИС «Профессор Водяницкий».

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В., Никольский Н. В., 2023

Для цитирования: 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.

Original article

Synoptic Variability of Water Temperature off the Crimea Coast in Summer 2022 Based on the Contact and Satellite Data

Yu. V. Artamonov , E. A. Skripaleva, A. V. Fedirko, N. V. Nikolsky

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

 artam-ant@yandex.ru

Abstract

Purpose. The aim of the study is to specify the features in changes of the Black Sea surface water temperature off the Crimea coast on a synoptic scale in summer 2022 based on the contact and satellite measurements of water temperature and surface wind.

Methods and Results. The data of hydrological measurements carried out during the 122nd (June 7–23, 2022) and 123rd (August 16–31, 2022) cruises of the R/V *Professor Vodyanitsky* in the northern part of the Black Sea were used. Sea water temperature was measured by the CTD complex *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 PlusM*, and the wind speed and direction – by the *AIRMAR-220WX* ship meteorological station. The study also included the daily averaged satellite-derived data on sea surface temperature taken from the *Black Sea – High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed* with the $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ spatial resolution, as well as the data on wind speed taken from the *Global Ocean Hourly Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model* with the $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ spatial resolution (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*). Based on the contact and satellite measurements, statistical characteristics of the water temperature and wind speed distributions were calculated. It was shown that the differences in temperature distributions revealed from the data of the two-stage surveys in the above-mentioned cruises had been conditioned by the features of a temperature seasonal cycle and by the synoptic variations of surface wind. A significant inverse correlation was found between the wind speed modulus and the temperature, the maximum level of which was observed in the western part of the survey area, approximately between the Cape Aiya and the Cape Sarych.

Conclusions. It is shown that based on the contact and satellite measurement, in summer 2022, the values of synoptic temperature anomalies on the sea surface were the highest in the area of noticeable coastal shelf expansion, i. e., in the Feodosiya Bay and between the Sarych and Ayu-Dag capes. The temperature synoptic changes were conditioned mainly by the variations in the local wind speed.

Keywords: Crimea coast, Feodosiya Bay, synoptic variability, sea surface temperature, wind field

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2021-0004 “Fundamental studies of oceanological processes that determine the state and evolution of marine environment under the influence of natural and anthropogenic factors, based on the methods of observation and modeling”. The authors are deeply grateful to V. V. Davydov, A. V. Garmashov, S. A. Shutov, D. V. Deryushkin, R. O. Shapovalov, S. V. Shcherbachenko, A. G. Kushner for performing hydrological and meteorological measurements during the 122nd and 123rd cruises of the R/V *Professor Vodyanitsky*.

For citation: Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A., Fedirko, A.V. and Nikolsky, N.V. 2023. Synoptic Variability of Water Temperature off the Crimea Coast in Summer 2022 Based on the Contact and Satellite Data. *Physical Oceanography*, 30(6), pp. 811-825.

Введение

В многочисленных исследованиях синоптической изменчивости в Черном море в основном анализируются изменения характеристик, положения

и количества антициклонических и циклонических вихрей, формирующихся в зоне Основного Черноморского течения (ОЧТ) и играющих важную роль в водообмене между глубоководной частью моря и прибрежным шельфом^{1, 2} [1–17]. Обработка данных инструментальных измерений течений и дистанционного зондирования поверхности моря [2–5, 7–12], а также результаты математического моделирования [13–17] показывают, что синоптические вихри характеризуются высокой пространственно-временной изменчивостью. Согласно альтиметрическим данным и модельным расчетам [6, 9–11, 16, 17], вихреобразование более активно в весенне-летний сезон, когда ослабевает ОЧТ, при этом увеличивается количество антициклонических вихрей в прибрежной зоне. По данным инструментальных измерений течений и гидрологических съемок, выполненных в ходе трех экспедиций на НИС «Профессор Водяницкий» в течение 2018 г. (09–30.06, 28.08–20.09 и 18.11–10.12), показано, что меандрирование ОЧТ ослабевало от лета к концу осени – началу зимы, что влияло на количество и местоположение синоптических круговоротов. Максимальное количество вихрей наблюдалось летом, минимальное – в осенне-зимний период [8].

Анализ данных спутниковой альтиметрии и гидрологических измерений за 1992–2015 гг. показал, что термохалинные аномалии в вихрях обоих знаков, характеризующие синоптическую изменчивость, максимальны летом и ослабевают зимой [10]. Согласно [6], уровень синоптической изменчивости температуры в прибрежной зоне выше, чем в открытой части моря, при этом наблюдается его увеличение от зимы к лету. В то же время, по результатам численного моделирования, синоптическая изменчивость гидрофизических полей наиболее выражена тогда, когда интенсифицируется ОЧТ, т. е. в зимне-весенний период [15]. Помимо влияния синоптических вихревых образований синоптическая изменчивость термохалинных полей может быть связана с локальными метеоусловиями или апвеллингами. Так, анализ экспедиционных наблюдений в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря (в районе г. Геленджик) показал, что в июне – июле 2009 г. наблюдалась интенсивная синоптическая изменчивость температуры поверхности моря (ТПМ) с временным масштабом около нескольких суток/недель с размахом 14°C, обусловленная апвеллингом холодных и соленых подповерхностных вод [18]. По данным многолетних наблюдений 1977–2005 гг., на гидрометеорологических станциях в северо-восточной части Черного моря [19] климатический годовой цикл среднеквадратических значений синоптических аномалий температуры воды характеризуется их минимумами в декабре – феврале и августе и максимумами в июне – июле и сентябре – ноябре. Анализ рядов спутниковых измерений ТПМ из массива *Black Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis (BS HR UHR SST Analysis)* за период 1982–2015 гг. с высоким пространственным разрешением

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

² Латун В. С. Роль антициклонических круговоротов во внутрисезонной эволюции термохалинной структуры и геострофической циркуляции вод // Исследование и моделирование гидрофизических процессов в Черном море / А. В. Алексеев [и др.] ; под ред. С. П. Левикова. М. : Гидрометеоиздат, 1989. Раздел 2.1. С. 40–49.

0,04° × 0,04° показал, что на северо-западном шельфе Черного моря минимальная изменчивость ТПМ на синоптическом масштабе наблюдается в феврале – марте, максимальная – в мае, при этом максимальный уровень изменчивости прослеживается ближе к берегу [20]. По этим же данным было показано, что климатический годовой цикл уровня синоптической изменчивости ТПМ для всей акватории Черного моря одинаков и характеризуется полугодовой периодичностью с минимумами в феврале – марте и августе и максимумами в мае и октябре. Наибольший вклад синоптической изменчивости в общую дисперсию поля ТПМ выявлен в Керченском проливе и над свалом глубин южнее Керченского п-ова и далее на запад вдоль всего Южного берега Крыма [21]. Вместе с тем пространственная структура поля ТПМ и ее изменчивость на прибрежном мелководье у берегов Крыма на синоптическом масштабе исследованы слабо. Это связано прежде всего с большим шагом сетки используемых ранее данных контактных измерений. Летом 2022 г. в ходе 122-го и 123-го рейсов НИС «Профессор Водяницкий» были проведены экспедиционные исследования, представляющие особый интерес, поскольку они были выполнены по учащенной сетке станций в теплое время года, когда наблюдается усиление синоптической активности. Впервые гидрологические измерения у берегов Крыма в рамках каждого рейса были выполнены дважды по одному и тому же маршруту, что дает возможность уточнить особенности изменения фактической ТПМ на синоптическом масштабе.

Цель данной работы – уточнить особенности изменения температуры на поверхности Черного моря у берегов Крыма на синоптическом масштабе и оценить их связь с изменением поля ветра по данным контактных гидрологических измерений, выполненных в ходе двух экспедиций на НИС «Профессор Водяницкий» летом 2022 г., и данным спутниковых измерений температуры и приводного ветра *Copernicus*.

Материалы и методы

Гидрологические измерения летом 2022 г. проводились в 122-м (июнь) и 123-м (август) рейсах НИС «Профессор Водяницкий» и, в отличие от предшествующих лет, исключительно в пределах территориальных вод России (рис. 1). Уменьшение площади съемок при сохранении общего экспедиционного времени (25 сут) позволило увеличить количество гидрологических станций и получить детальные пространственные распределения гидрологических параметров, отражающие текущее состояние структуры вод в прибрежной зоне Крыма. Резерв экспедиционного времени в обоих рейсах позволил выполнить повторные гидрологические съемки. Положение станций показано на рис. 1, *a, b*.

В ходе каждого рейса повторные станции выполнялись практически в тех же координатах с последовательным продвижением с запада на восток примерно с одинаковым фазовым запаздыванием (рис. 1, врезки). В 122-м рейсе первый этап съемок выполнялся с 7 по 13 июня, второй этап – с 17 по 23 июня, в 123-м рейсе – с 16 по 23 августа и с 26 по 31 августа соответственно.

Температура морской воды измерялась на каждой станции с помощью гидролого-химического зондирующего CTD-комплекса *IDRONAUT OCEAN*

SEVEN 320 PlusM. Анализ распределения поля ТПМ проводился для верхнего квазиоднородного слоя на горизонте 2 м. Фактические значения скорости и направления ветра на станциях брались из журнала дежурного по экспедиции, которые, в свою очередь, выбирались из непрерывных записей, осуществляемых с помощью судовой метеостанции AIRMAR-220WX.

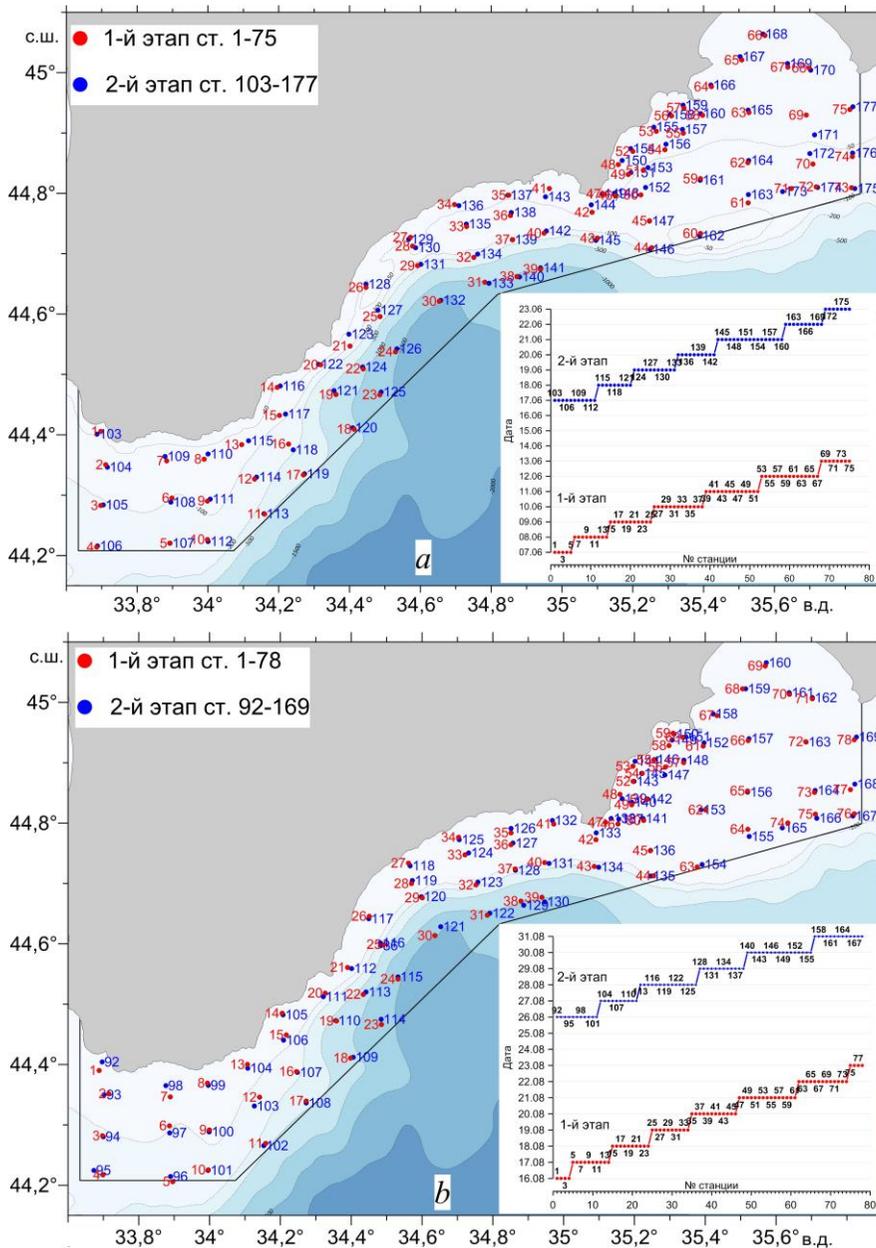


Рис. 1. Положение станций, выполненных в ходе 122-го (а) и 123-го (б) рейсов НИС «Профессор Водяницкий». На врезках – сроки и номера зондирований
Fig. 1. Layout of the stations performed during the 122nd (a) and 123rd (b) cruises of the R/V Professor Vodyanitsky. Insets show the dates and numbers of soundings

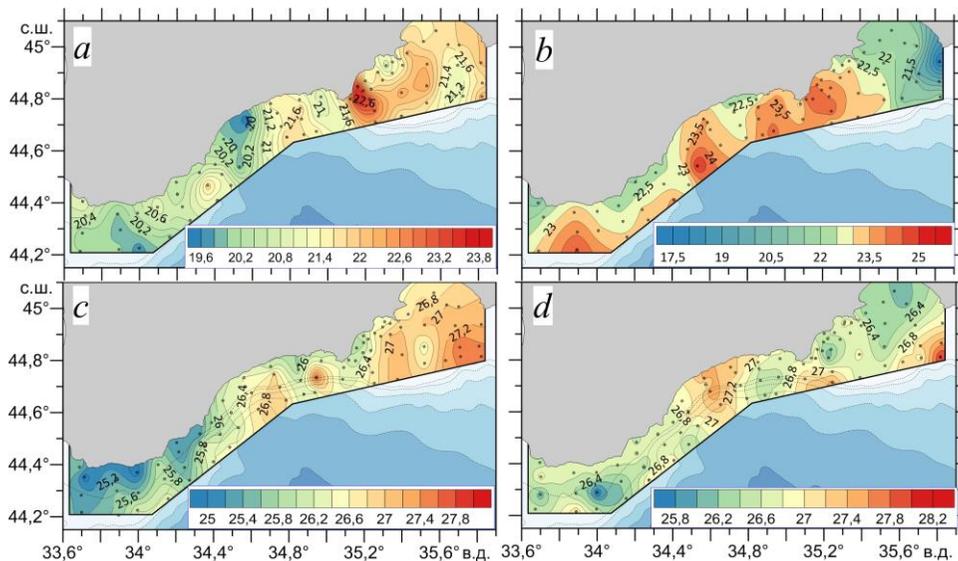
В работе также использованы среднесуточные данные спутниковых измерений ТПМ из массива *Black Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis* (<https://doi.org/10.48670/moi-00159>, <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SST-PUM-010-004-006-012-013.pdf>, продукт *SST_BS_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_006*) службы мониторинга морской среды *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)* со сверхвысоким пространственным разрешением $0,01^\circ \times 0,01^\circ$, полученные с помощью современных алгоритмов обработки [22].

Кроме этого, анализировались среднесуточные характеристики поля приводного ветра (скорость и направление) с пространственным разрешением $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ из массива *Global Ocean Hourly Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model* (<https://doi.org/10.48670/moi-00305>, продукт *WIND_GLO_PHY_L4_NRT_012_004*), входящего в *CMEMS*. Эти параметры были получены по наблюдениям скаттометрами *Metop-B* и *Metop-C ASCAT* и по данным операционной модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды *ECMWF*.

Изменчивость поля ТПМ и ее связь со скоростью ветра исследовались с помощью стандартных статистических методов дисперсионного и корреляционного анализа.

Результаты исследования

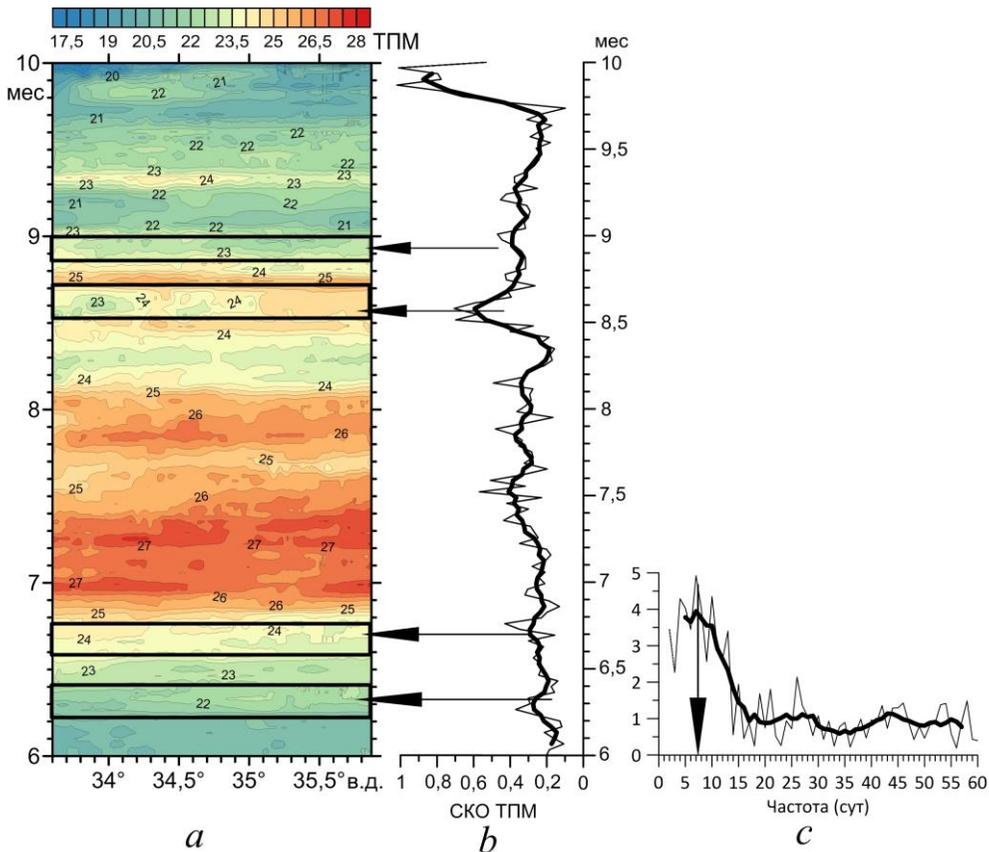
Анализ распределений ТПМ по данным двух этапов съемок в 122-м и 123-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий» указывает на их существенные отличия, которые, с одной стороны, обусловлены сезонным прогревом поверхностных вод, с другой – синоптическими вариациями приводного ветра. Сезонный прогрев отразился в общем увеличении значений температуры, которые на первом этапе съемки 122-го рейса не превышали 24°C , а на втором этапе достигали почти 26°C (рис. 2, *a, b*).



Р и с. 2. Распределение ТПМ ($^\circ\text{C}$) на первом (слева) и втором (справа) этапах 122-го (*a, b*) и 123-го (*c, d*) рейсов НИС «Профессор Водяницкий»

F i g. 2. SST ($^\circ\text{C}$) distribution at the first (left) and second (right) stages of the 122nd (*a, b*) and 123rd (*c, d*) cruises of the R/V *Professor Vodyanitsky*

В условиях летнего прогрева на пространственное распределение фактической ТПМ существенно повлияла несинхронность выполнения съемок. Это проявилось в повышении значений ТПМ по мере продвижения судна с запада на восток, которое занимало ~ 7 сут. Поскольку измерения проводились в основном в дневное время, влияние суточного хода ТПМ на ее пространственное распределение минимально.



Р и с. 3. Распределение среднесуточных значений ТПМ 1 июня – 30 сентября 2022 г. вдоль изобаты 50 м по спутниковым данным (*a*); временное распределение пространственного СКО ТПМ (жирная кривая – сглаживание скользящим средним по 5 сут) (*b*); функция спектральной плотности распределения СКО ТПМ (*c*) по спутниковым данным

F i g. 3. Distribution of the satellite derived SST daily average values along the 50 m isobath in June 1 – September 30, 2022 (*a*); temporal distribution of the spatial SST standard deviation (thick curve denotes smoothing by a 5 day moving average) (*b*); functions of spectral density of distribution of the SST standard deviation (*c*) based on satellite data

Для сравнения контактных измерений со среднесуточными спутниковыми измерениями, которые практически синхронно охватывали всю акваторию съемки, было построено распределение ТПМ по спутниковым данным вдоль изобаты 50 м, проходящей через всю акваторию полигона, за период 1 июня – 30 сентября 2022 г. (рис. 3, *a*, периоды выполнения съемок на первом и втором этапах двух рейсов выделены черными прямоугольниками). Во время

первого этапа съемки в 122-м рейсе диапазон пространственной изменчивости фактической температуры составлял почти 4°C ($20\text{--}24^{\circ}\text{C}$), тогда как по спутниковым данным – только $1,5^{\circ}\text{C}$ ($21\text{--}22,5^{\circ}\text{C}$) (рис. 2, *a*; 3, *a*). Тенденция к увеличению ТПМ в восточном направлении, наблюдаемая по данным контактных измерений, по спутниковым данным не проявлялась. На втором этапе съемки диапазон пространственной изменчивости фактической температуры по данным контактных измерений почти на всей акватории составлял $\sim 2^{\circ}\text{C}$ ($22\text{--}24^{\circ}\text{C}$). Исключением была крайняя восточная часть полигона, где фактические значения ТПМ резко понизились почти до 20°C . По спутниковым данным диапазон пространственной изменчивости ТПМ не превышал $0,5^{\circ}\text{C}$ ($23,5\text{--}24^{\circ}\text{C}$) (рис. 2, *b*; 3, *a*).

Двумя месяцами позже на первом этапе 123-го рейса фактические значения ТПМ на акватории полигона изменялись в пределах $25\text{--}27,5^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, *c*), при этом ее максимальные значения наблюдались в конце этапа на востоке полигона. Распределение ТПМ по спутниковым данным также показало повышение температуры до $25,5^{\circ}\text{C}$ на востоке полигона (рис. 3, *a*). Минимальные значения ТПМ по данным как контактных, так и спутниковых измерений наблюдались на западе полигона, при этом по спутниковым данным (23°C) они были почти на 2°C ниже, чем по контактными измерениями (25°C). Вероятно, эта разница связана в основном с методическими особенностями обработки данных разных типов измерений.

На втором этапе 123-го рейса значения ТПМ по контактными измерениями изменялись в пределах $26\text{--}27,4^{\circ}\text{C}$, что близко к диапазону пространственной изменчивости ТПМ на первом этапе (рис. 2, *d*). В отличие от первого этапа более низкие значения ТПМ ($< 26,4^{\circ}\text{C}$) отмечались не только в западной, но и в восточной части съемки, а в центральной части полигона и в отдельных локальных областях у его южной границы ТПМ повышалась до 27°C . По спутниковым данным значения ТПМ были заметно ниже и изменялись в диапазоне $22\text{--}23,5^{\circ}\text{C}$ (рис. 3, *a*). Судя по долготно-временному распределению ТПМ, в период выполнения второго этапа съемки температура монотонно понижалась, т. е. в конце августа уже наблюдалось охлаждение поверхностных вод (рис. 3, *a*). Таким образом, несинхронность контактных измерений при наличии сезонного сигнала может существенно влиять на пространственное распределение фактической ТПМ. Частично справиться с этой проблемой можно путем детрендрования исходных рядов контактных измерений, которое позволяет убрать более низкочастотную составляющую изменчивости с временным масштабом, превышающим период выполнения съемки. При наличии низкочастотного сигнала в рядах измеренной ТПМ должна наблюдаться значимая линейная связь между значением ТПМ на каждой станции и порядковым номером этой станции (фактически временным запаздыванием измерений). Оценки показали, что коэффициент корреляции R между значением ТПМ и порядковым номером станции в 122-м рейсе достигал 0,66 (рис. 4, *a*), в 123-м рейсе – 0,51 (рис. 4, *b*), т. е. в распределениях фактической ТПМ содержался значимый положительный тренд. Судя по спутниковым данным, положительный тренд в 122-м рейсе (июнь) был связан с устойчивым сезонным прогревом поверхностных вод (рис. 3, *a*; 4, *a*). Во время 123-го рейса (август) на фоне уже начавшегося общего осеннего пони-

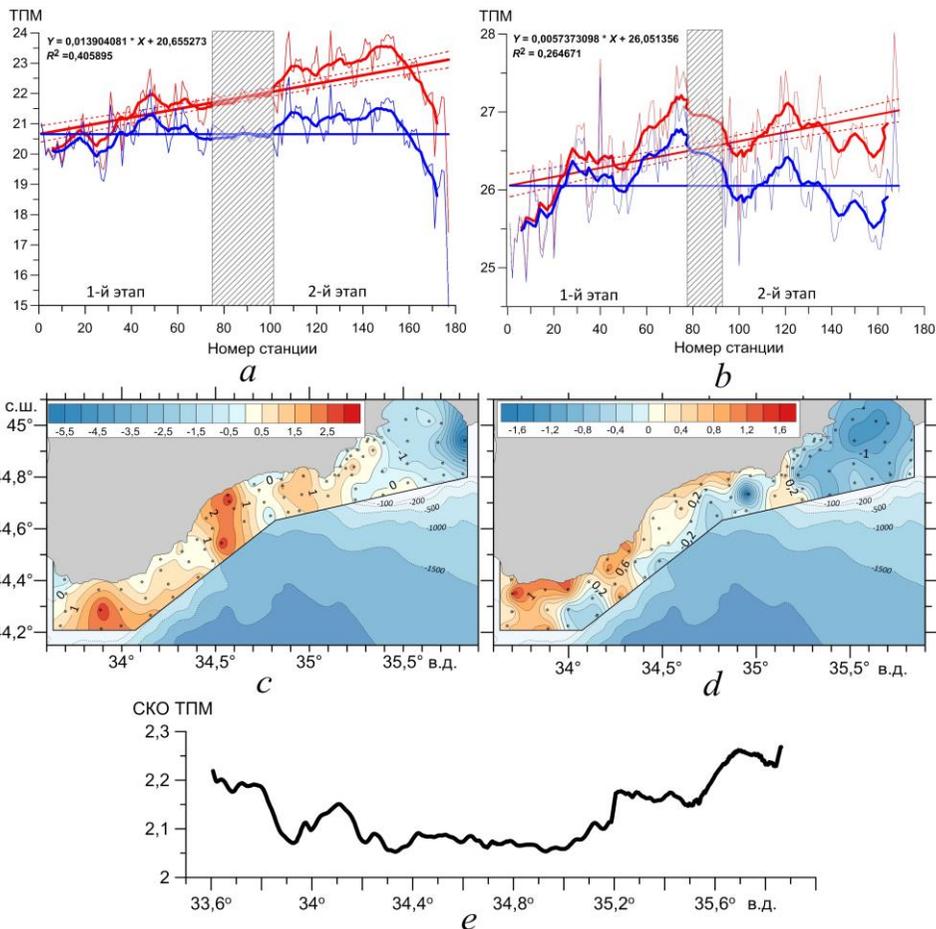
жения ТПМ наблюдались периоды прогрева и охлаждения поверхностных вод на синоптическом масштабе. Временное распределение среднесуточных значений пространственного среднеквадратического отклонения (СКО) ТПМ по спутниковым данным вдоль изобаты 50 м (рис. 3, *b*) показало, что его изменения особенно заметны в период первого этапа съемки 123-го рейса, когда контрасты ТПМ между западной и восточной частями полигона по контактными (рис. 2, *c*) и спутниковым (рис. 3, *a*) данным были наиболее выражены, что обусловило резкое повышение значений СКО. Отметим, что период выполнения каждого этапа съемки (6–8 сут) примерно совпадал с периодичностью, наблюдаемой во временном изменении пространственных СКО ТПМ, т. е. с периодичностью усиления синоптических возмущений ТПМ по спутниковым данным (рис. 3, *b*). Расчет функции спектральной плотности распределения СКО ТПМ по спутниковым данным показал, что эта периодичность составляет ~ 7 сут (рис. 3, *c*).

Отметим, что первый этап измерений в 123-м рейсе проходил в период понижения ТПМ по спутниковым данным в западной части полигона и ее слабого повышения в восточной части; второй этап измерений проходил в последнюю неделю августа, когда на всем полигоне отмечались пониженные значения ТПМ по спутниковым данным. Таким образом, контактные измерения в 123-м рейсе не всегда совпадали с теплой фазой синоптических изменений ТПМ, наблюдаемой по спутниковым данным (рис. 3, *b*). Вместе с тем в период всей съемки отмечался общий положительный тренд ТПМ (рис. 4, *b*), хотя он был заметно меньше выражен, чем в начале лета (122-й рейс), когда наблюдался устойчивый прогрев поверхностных вод (рис. 4, *a*).

Для минимизации влияния несинхронности измерений при наличии сезонного сигнала наблюдаемый положительный тренд был вычтен из исходных рядов ТПМ. Анализ аномалий ТПМ, рассчитанных как разность (ΔT) детрендрованных значений температуры между повторными съемками на каждой станции, позволил оценить особенности пространственной структуры ТПМ преимущественно синоптического масштаба в периоды прогрева и охлаждения поверхностных вод. В период проведения 122-го рейса наблюдались три области с повышенными положительными значениями ΔT ($> 2^\circ\text{C}$) и одна – с отрицательными значениями ΔT ($> -2^\circ\text{C}$) (рис. 4, *c*). При этом на большей части акватории съемки наблюдались положительные значения ΔT (рис. 4, *c*), что можно объяснить общим ослаблением скорости ветра на втором этапе съемки (рис. 5, *a*) и повышением значений ТПМ (рис. 2, *b*). В конце съемки происходило резкое усиление скорости ветра, понижение значений ТПМ и увеличение отрицательных значений ΔT почти до 6°C .

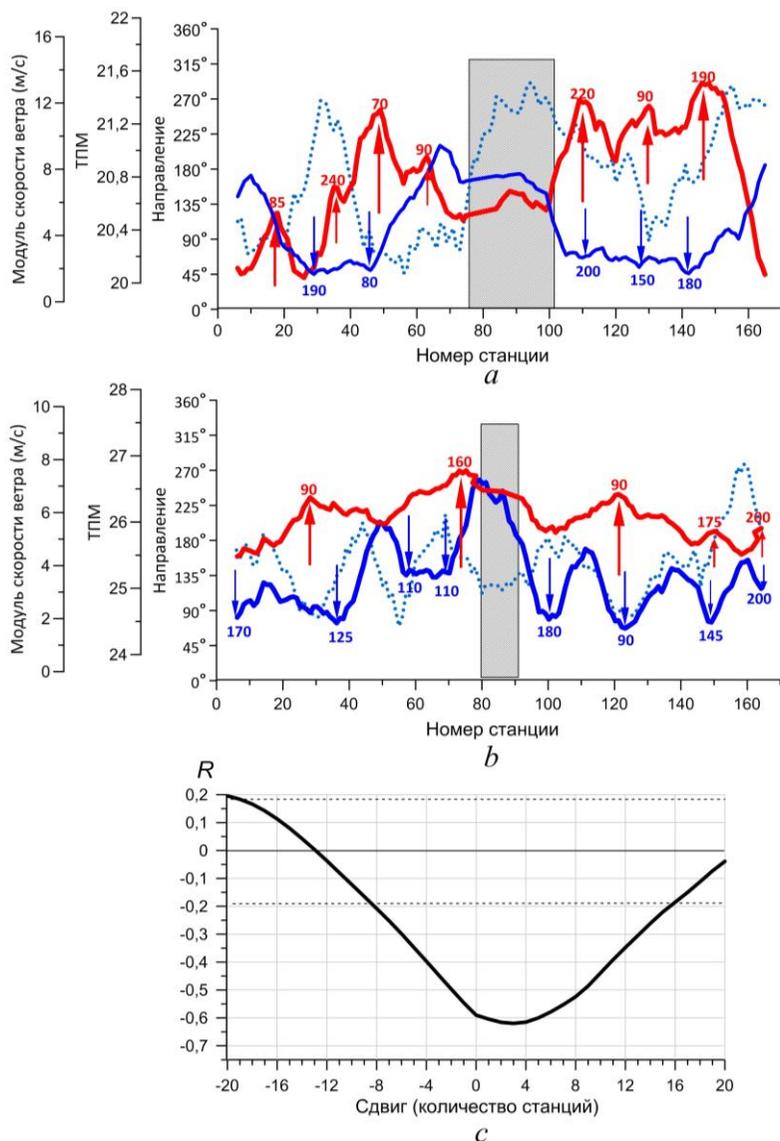
В период проведения 123-го рейса отмечалось увеличение положительных значений ΔT преимущественно на западе съемки (до $1,5^\circ\text{C}$) и отрицательных (до -2°C) – на востоке съемки (рис. 4, *d*). Как и в 122-м рейсе, увеличение значений ΔT (по абсолютной величине) наблюдалось в районах, где прибрежный шельф наиболее широкий, – в районе Феодосийского залива и у Южного берега Крыма между м. Сарыч и м. Аю-Даг. Качественно такая же картина прослеживается и по спутниковым данным, так как значения СКО ТПМ, рассчитанные по ряду среднесуточных значений ТПМ за четыре месяца (июнь – сентябрь 2022 г.) для каждой долготы с шагом $0,01^\circ$ вдоль

изобаты 50 м, заметно увеличиваются в районах, где изобата проходит над обширным шельфом (рис. 4, *e*). Это дает основание полагать, что на уровень пространственной дисперсии ТПМ оказывает влияние общая ширина шельфа, что проявляется даже в пределах полигона съемок (не более 12 миль от берега).



Р и с. 4. Распределение ТПМ (°С) в зависимости от порядкового номера станции (красные кривые – фактическая температура, синие – детрендированная температура; жирные кривые – сглаживание скользящим средним по 11 станциям, штриховые линии – границы доверительного интервала 95%-ного уровня статистической достоверности; промежуток между выполнением станций в ходе первого и второго этапов заштрихован) по данным 122-го (*a*) и 123-го (*b*) рейсов; разность детрендированных значений ТПМ между повторными съемками в 122-м (*c*) и 123-м (*d*) рейсах; изменение с долготой СКО ТПМ вдоль изобаты 50 м (*e*) по спутниковым данным

Fig. 4. SST(°C) distribution depending on the station serial number (red curves are the actual temperature, blue ones – the detrended temperature; thick curves are smoothing by a moving average over 11 stations, dashed ones – the boundaries of the 95% confidence interval of statistical significance; the interval between the stations performed during of the first and second stages) based on the data of the 122nd (*a*) and 123rd (*b*) cruises; difference between the detrended SST values obtained in the repeated surveys of the 122nd (*c*) and 123rd (*d*) cruises; change of the SST standard deviation with a longitude along the 50 m isobath (*e*) based on satellite data



Р и с. 5. Распределение детрендрованных значений ТПМ (°C) (красные кривые), модуля (синие сплошные кривые) и направления (синие пунктирные кривые) скорости ветра по данным 122-го (a) и 123-го (b) рейсов НИС «Профессор Водяницкий» (промежуток между выполнением станций в ходе первого и второго этапов заштрихован; красными стрелками показаны максимумы ТПМ, синими – минимумы скорости ветра; числа у стрелок – направление ветра в градусах); график взаимно-корреляционной функции ТПМ и модуля скорости ветра по данным 122-го рейса (штриховые линии – границы доверительного интервала 95%-ного уровня статистической достоверности) (c)

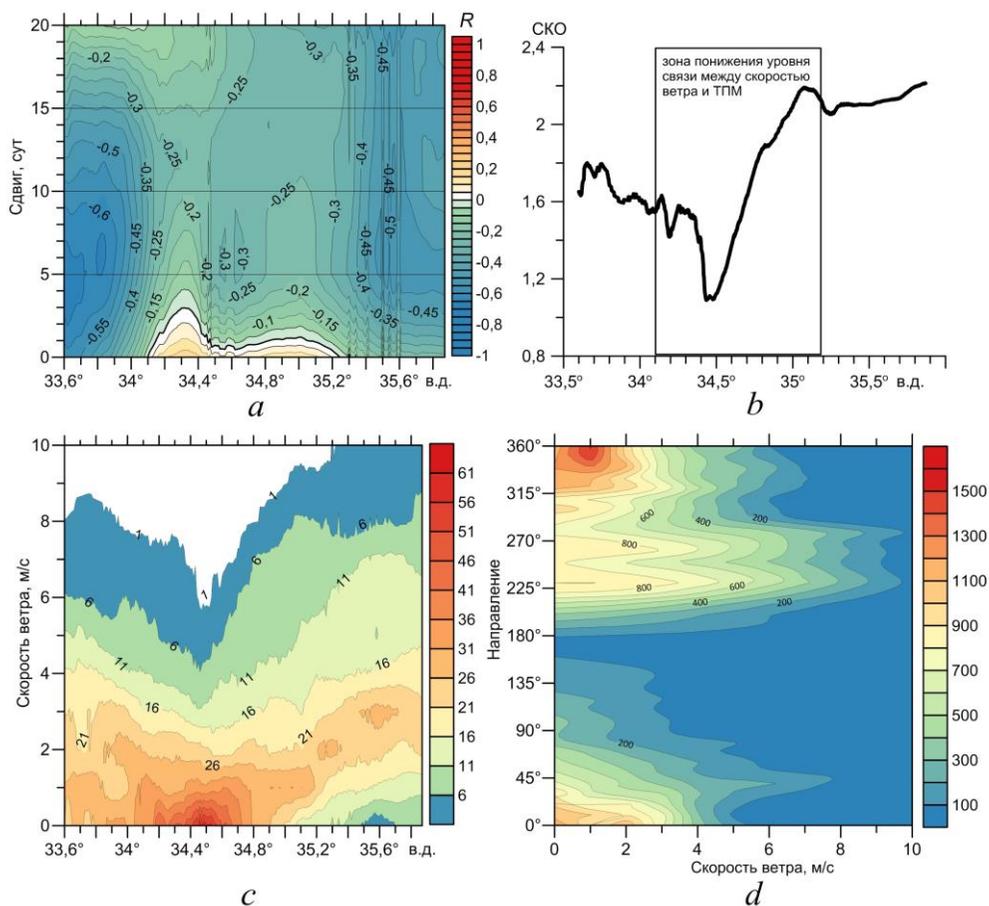
F i g. 5. Distribution of the detrended SST (°C) values (red curves), the absolute value (blue solid curves) and direction (blue dashed curves) of wind speed based on the data of the 122nd (a) and 123rd (b) cruises of the R/V *Professor Vodyanitsky* (the interval between the stations performed during the first and second stages is shaded; red arrows show the SST maximums, blue ones – the wind speed minimums; numbers beside the arrows indicate the wind direction in degrees); graph of the cross-correlation function of SST and wind speed module based on the 122nd cruise data (dashed lines are the boundaries of the 95% confidence interval of statistical significance) (c)

Как видно из рис. 5, на мелководье важнейшим фактором, определяющим значения ТПМ на синоптическом масштабе, является локальное ветровое воздействие. Ранее было показано, что при относительно слабом суточном ходе ТПМ, который в теплое время года в среднем составляет менее $0,5^{\circ}\text{C}$, доминирующую роль в изменении поля ТПМ играют синоптические вариации скорости приводного ветра [23, 24]. Наиболее четко связь поля ветра с изменением температуры прослеживалась по данным съемки 122-го рейса. Была выявлена закономерность: периоды роста температуры качественно совпадали с периодами ослабления ветра и наоборот – усиление ветра приводило к понижению значений ТПМ (рис. 5, *a*). Анализ взаимной корреляции между ТПМ и модулем скорости ветра по данным 122-го рейса показал, что наиболее высокий уровень обратной корреляции со значением R до $0,6-0,65$ наблюдался на сдвиге до 3–4 станций ($\sim 8-10$ ч) (рис. 5, *c*).

В 123-м рейсе максимальная скорость ветра заметно уменьшилась, периоды понижения ТПМ не всегда совпадали с периодами ослабления локального ветра (рис. 5, *b*), и корреляционная связь между этими параметрами была незначима. Можно предположить, что на изменение ТПМ в 123-м рейсе в большей степени оказывали влияние изменения не локального, а отдаленного ветра.

Для оценки связи ТПМ и скорости ветра также анализировались среднесуточные ряды спутниковых данных за период 1 июня – 31 августа 2022 г. вдоль изобаты 50 м в пределах полигона съемок, при этом данные скорости ветра были проинтерполированы в узлы температурной сетки с шагом $0,01^{\circ}$. Между модулем скорости ветра и ТПМ была выявлена значимая отрицательная корреляционная связь, уровень которой заметно изменялся по пространству (рис. 6, *a*). Так, высокие значения R ($-0,55 \dots -0,7$) были выявлены в западной части полигона примерно между м. Айя и м. Сарыч, при этом максимум отмечался на сдвиге 3–6 сут при лидировании изменения скорости ветра. Восточнее м. Ай-Тодор и примерно до м. Меганом наблюдались резкое понижение уровня обратной корреляции и смена ее знака на сдвигах 1–3 сут. Восточнее м. Меганом уровень корреляции начинал повышаться до значимого, и у Феодосийского залива значения R достигали $-0,45 \dots -0,5$ на сдвиге 4–7 сут (рис. 6, *a*).

Анализ распределения СКО среднесуточных значений модуля скорости ветра, рассчитанных за летний период 2022 г. на каждой долготе с шагом $0,01^{\circ}$ вдоль изобаты 50 м, показал, что минимальный уровень изменчивости модуля скорости ветра (СКО до 1,4 м/с) наблюдался в районе $34,4^{\circ}$ и $34,6^{\circ}$ в. д. (рис. 6, *b*), т. е. в зоне уменьшения уровня связи между скоростью ветра и ТПМ. Максимальные значения СКО скорости ветра (до 2–2,2 м/с) были выявлены к востоку от $34,9^{\circ}$ в. д. (рис. 6, *b*). При этом в районе Судакской бухты и м. Меганом связь скорости ветра и ТПМ была незначимой, а в районе Феодосийского залива, где прибрежный шельф заметно расширяется, отмечался высокий уровень связи между скоростью ветра и ТПМ (рис. 6, *a*).



Р и с. 6. Распределение значений экстремума R взаимно-корреляционной функции модуля скорости ветра и ТПМ ($^{\circ}\text{C}$) (*a*), СКО среднесуточных значений модуля скорости ветра (m/s) (*b*), повторяемость значений модуля скорости с дискретностью 1 m/s (*c*), повторяемость (сут) ветров определенной скорости в зависимости от направления (*d*) вдоль изобаты 50 м по спутниковым данным

Fig. 6. Distribution of the R extreme values of the cross-correlation function of wind speed module and SST ($^{\circ}\text{C}$) (*a*), standard deviation of the daily average values of wind speed module (m/s) (*b*), frequency of the speed module values with a resolution 1 m/s (*c*), frequency (day) of the winds of a certain speed depending on direction (*d*) along the 50 m isobath based on satellite data

В работе была проанализирована повторяемость среднесуточных значений модуля скорости с дискретностью 1 м/с (рис. 6, *c*) вдоль изобаты 50 м за период 1 июня – 31 августа 2022 г., а также общая повторяемость (количество суток) ветров определенной скорости в зависимости от направления (рис. 6, *d*). Анализ показал, что в районе незначимой связи скорости ветра и ТПМ отмечалась максимальная повторяемость ветров минимальной скорости (ниже $1,5 \text{ м/с}$) (рис. 6, *c*) северного и северо-западного направлений (рис. 6, *d*). Максимальная повторяемость слабых ветров основного северного направления на участке полигона примерно между 34° и 35° в. д. обусловлена экранирующим эффектом Крымских гор.

Заключение

По данным контактных гидрологических измерений, выполненных в ходе 122-го (7–23 июня 2022 г.) и 123-го (16–31 августа 2022 г.) рейсов НИС «Профессор Водяницкий», и данным спутниковых измерений температуры и приводного ветра *Copernicus* выявлены особенности изменчивости температуры поверхности моря у берегов Крыма на синоптическом масштабе. Показано, что отличия в распределениях ТПМ по данным двух этапов съемок в двух рейсах были обусловлены особенностями сезонного цикла температуры на поверхности и синоптическими вариациями приводного ветра. На пространственное распределение ТПМ существенно влияла несинхронность выполнения съемок, что проявилось в увеличении ТПМ по мере продвижения судна с запада на восток. Установлено, что в распределениях фактической ТПМ в периоды выполнения съемок содержался значимый положительный тренд. Согласно спутниковым данным, в 122-м рейсе (июнь) наблюдался устойчивый сезонный прогрев поверхностных вод. Во время выполнения 123-го рейса (август) отмечалось чередование периодов прогрева и охлаждения поверхностных вод продолжительностью около недели. Контактные измерения в этом рейсе не всегда совпадали с периодами повышения ТПМ, что занижало ее общий положительный тренд. В 123-м рейсе также отмечались максимальные изменения среднесуточных значений пространственного СКО ТПМ по спутниковым данным.

Во время выполнения 122-го рейса на большей части акватории съемки наблюдались положительные синоптические аномалии ТПМ, что связано с общим ослаблением скорости ветра и повышением температуры на втором этапе съемки. Значения аномалий ТПМ по фактическим измерениям и значения СКО ТПМ, рассчитанного по ее среднесуточному ряду за четыре месяца (июнь – сентябрь 2022 г.) по спутниковым данным, заметно увеличивались в районе Феодосийского залива и у Южного берега Крыма между м. Сарыч и м. Аю-Даг, где прибрежный шельф наиболее широкий.

Показано, что периоды роста фактической температуры качественно совпадали с периодами ослабления локального приводного ветра и наоборот – усиление ветра приводило к понижению значений ТПМ. Наиболее высокий уровень обратной корреляции между ТПМ и модулем скорости ветра со значением R до 0,6–0,65 при сдвиге 8–10 ч зафиксирован в 122-м рейсе. Спутниковые данные также показали наличие значимой обратной корреляционной связи между модулем скорости ветра и ТПМ, уровень которой заметно изменялся по пространству. Максимальный уровень связи со значениями коэффициента корреляции $-0,55 \dots -0,7$ наблюдался в западной части полигона съемки примерно между м. Ая и м. Сарыч. Восточнее м. Ай-Тодор и примерно до м. Меганом наблюдались резкое понижение уровня обратной корреляции и смена ее знака. Восточнее м. Меганом уровень корреляции начал повышаться до значимого, и у Феодосийского залива значения коэффициента корреляции достигали $-0,45 \dots -0,5$. Показано, что в летний период 2022 г. в зоне уменьшения уровня связи между скоростью ветра и ТПМ наблюдались минимальная изменчивость модуля скорости ветра и максимальная повторяемость ветров минимальной скорости северного и северо-западного направлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mesoscale circulation and thermohaline structure of the Black Sea observed during Hydro-Black '91 / T. Oguz [et al.] // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1994. Vol. 41, iss. 4. P. 603–628. doi:10.1016/0967-0637(94)90045-0
2. 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
3. Mesoscale eddies and related processes in the northeastern Black Sea / A. I. Ginzburg [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2002. Vol. 32, iss. 1–3. P. 71–90. doi:10.1016/S0924-7963(02)00030-1
4. *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.
5. Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing / A. G. Zatsepin [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C8. 3246. doi:10.1029/2002JC001390
6. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
7. 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. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-4-18
8. Циркуляция вод в северной части Черного моря летом – зимой 2018 г. / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 1. С. 69–90. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-69-90
9. *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
10. *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. doi:10.1016/j.dsr.2014.12.002
11. 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. doi:10.1016/j.pocean.2018.07.007
12. Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the Black Sea / A. Zatsepin [et al.] // *Ocean Dynamics*. 2019. Vol. 69, iss. 2. P. 253–266. doi:10.1007/s10236-018-1239-4
13. Rim current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving Black Sea general circulation model / J. V. Staneva [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2001. Vol. 31, iss. 1–3. P. 137–157. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(01\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(01)00050-1)
14. Hydrodynamic modelling of mesoscale eddies in the Black Sea / C. E. Enriquez [et al.] // *Ocean Dynamics*. 2005. Vol. 55, iss. 5–6. P. 476–489. doi:10.1007/s10236-005-0031-4
15. 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.
16. Трехмерная идентификация синоптических вихрей Черного моря по расчетам численной модели *NEMO* / А. А. Кубряков [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 1. С. 20–28. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-20-28
17. Mesoscale eddies in the Black Sea: Characteristics and kinematic properties in a high-resolution ocean model / E. Sadighrad [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2021. Vol. 223. 103613. doi:10.1016/j.jmarsys.2021.103613

18. 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 PUZPJР.
19. 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. doi:10.22449/0233-7584-2015-1-42-52
20. 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. EDN ZDGNQB. doi:10.21046/2070-7401-2017-14-3-237-245.
21. 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
22. High and Ultra-High resolution processing of satellite Sea Surface Temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project / В. В. Nardelli [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 129. P. 1–16. doi:10.1016/j.rse.2012.10.012
23. Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Сезонный и суточный ход температуры вод Чёрного моря по данным термопрофилирующих дрейфующих буёв // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 5. С. 268–281. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-5-268-281
24. 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. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-171-184

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

Никольский Николай Викторович, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: AAT-7723-2020**, nikolsky.geo@gmail.com