

**Синоптическая изменчивость
биооптических и гидрологических параметров
у берегов Крыма
по данным экспедиционных измерений летом 2023 года**

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

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

По данным гидрологических и биооптических измерений, выполненных у берегов Крыма в ходе 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» летом 2023 г., исследована синоптическая изменчивость показателя ослабления направленного света и интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* на поверхности моря и ее связь с распределениями гидрологических параметров. Измерения проводили по учащенной сетке станций с продвижением судна с запада на восток дважды с недельным интервалом (14–20 июня и 22–28 июня). Показано, что проникновение потока Основного Черноморского течения на полигон во время 2-го этапа измерений привело к более интенсивному поступлению на акваторию полигона азово-керченских вод. Это сопровождалось понижением прозрачности и солёности вод и повышением температуры, на которую также оказывал влияние продолжающийся сезонный прогрев. На большей части полигона, по данным обоих этапов измерений, выявлена значимая тенденция к увеличению интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* в областях вод с повышенными значениями показателя ослабления направленного света. Показано, что изменения вертикальной термохалинной и биооптической структуры вод на масштабе около недели наблюдались во всем слое измерений и проявлялись в изменении количества и значений максимумов интенсивности флуоресценции хлорофилла *a*, показателя ослабления направленного света, вертикальных градиентов температуры и солёности, а также глубин залегания этих параметров. Основным максимумом показателя ослабления направленного света прослеживался или в поверхностном слое, или в слое сезонных термоклина и галоклина, а максимум интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* располагался под слоем сезонных термоклина и галоклина. Выявлена значимая линейная корреляция между глубиной залегания сезонного термоклина и глубинами локализации максимумов показателя ослабления направленного света и интенсивности флуоресценции хлорофилла *a*, а также между глубинами залегания сезонного галоклина и максимума интенсивности флуоресценции хлорофилла *a*.

Ключевые слова: Черное море, гидрологические станции, показатель ослабления направленного света, флуоресценция хлорофилла, температура морской воды, солёность воды, циркуляция вод, синоптическая изменчивость

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Латушкин А. А., Федирко А. В., 2025



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

Благодарности: работа выполнена в рамках тем государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014 «Взаимодействие океана и атмосферы» и FNNN-2024-0012 «Оперативная океанология». Данные получены в Центре коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН».

Для цитирования: Синоптическая изменчивость биооптических и гидрологических параметров у берегов Крыма по данным экспедиционных измерений летом 2023 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 6–24. EDN QEZZHL.

Synoptic Variability of Bio-Optical and Hydrological Parameters off the Crimea Coast According to Data from *in situ* Measurements in Summer 2023

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

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The paper studies the synoptic variability of the light beam attenuation coefficient and intensity of chlorophyll a fluorescence on the sea surface and its relationship with the distributions of hydrological parameters based on the hydrological and bio-optical measurements carried out off the coast of Crimea during the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky* in summer 2023. The measurements were carried out on a finer station grid with the vessel moving from west to east twice with a weekly interval (14–20 June and 22–28 June). It is shown that due to Rim Current penetration into the polygon during the 2nd stage of measurements, the Azov-Kerch waters flew into the polygon water area more intensely. This was accompanied by a decrease in waters transparency and salinity, and an increase in temperature, which was also influenced by the ongoing seasonal heating. In most of the study area, data from both measurement stages revealed a significant tendency of increasing chlorophyll a fluorescence intensity in water areas with a higher beam attenuation coefficient. Changes of the vertical thermohaline and biooptical waters structure on a scale of about a week were observed in the entire measurement layer and were manifested in changes in the number and values of the maxima of the chlorophyll a fluorescence intensity, the light beam attenuation coefficient, temperature and salinity vertical gradients, as well as their depths. The main maximum of the light beam attenuation coefficient was observed either in the surface layer or in the layer of seasonal thermocline and halocline, while the maximum of the chlorophyll a fluorescence intensity was located under the layer of seasonal thermocline and halocline. The study found a significant linear correlation between the distributions of the depth of the seasonal thermocline and the depths of the maximum of the light beam attenuation coefficient and chlorophyll a fluorescence intensity, as well as between the depths of the seasonal halocline and the maximum intensity of chlorophyll a fluorescence.

Keywords: Black Sea, hydrological stations, light beam attenuation coefficient, chlorophyll fluorescence, sea water temperature, salinity, water circulation, synoptic variability

Acknowledgements: The work was carried out under FSBSI FRC MHI state assignment FNNN-2024-0014 “Ocean and atmosphere interaction” and FNNN-2024-0012 “Operational Oceanology”. 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., Latushkin, A.A. and Fedirko, A.V., 2025. Synoptic Variability of Bio-Optical and Hydrological Parameters off the Crimea Coast According to Data from *in situ* Measurements in Summer 2023. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 6–24.

Введение

В последние годы антропогенная нагрузка на прибрежную часть акватории Черного моря заметно возрастает, что повышает актуальность оценки экологического состояния его вод, которое в значительной степени отражается в их гидрооптической структуре [1, 2]. Для оценки изменения экологического состояния вод под влиянием различных природных и антропогенных факторов широко используется показатель ослабления направленного света (ПОС), отражающий содержание общего взвешенного вещества (ОВВ) и характеризующий прозрачность вод¹⁾ [3–7]. Важной характеристикой оценки первичной биопродуктивности вод является содержание фотосинтетически активного пигмента хлорофилла *a* (*Chl-a*) в морском фитопланктоне, определяемое по данным измерений флуоресценции *Chl-a* (*F*) или по данным прямых измерений [8–13]. В связи с этим важным элементом экологического мониторинга является исследование изменчивости ПОС и содержания *Chl-a* на разных временных масштабах и связи этой изменчивости с особенностями гидрологической структуры вод.

Эффективный мониторинг гидрологической и биооптической структуры поверхностных вод моря осуществляется с помощью дистанционных методов [2, 14–18]. Использование спутниковых данных позволило выявить особенности изменчивости биооптических характеристик на различных временных масштабах в поверхностных водах Черного моря [19–22], а также исследовать связь биооптических параметров с термохалинной структурой и динамикой водных масс [23, 24].

Так, по данным сканеров цвета океана *SeaWiFS* и *MODIS-Aqua* из атласа *Bio-optical characteristics of the Russian seas from satellite ocean color data*, в сезонном цикле концентрация *Chl-a* имеет два основных максимума – весенний (март – май) и осенний (октябрь – ноябрь). При этом показатель рассеяния света назад взвешенными частицами имеет четко выраженный максимум в июне [20]. Анализ климатического сезонного цикла концентрации *Chl-a*, показателя диффузного ослабления света $K_d(490)$ и коэффициента яркости моря $R_{rs}(555)$ по данным спутниковых сканеров *MODIS-Aqua* и *NPP-VIIRS* из массива *Copernicus* показал, что основные максимумы концентрации *Chl-a* и показателя $K_d(490)$ на северо-западном шельфе наблюдаются в период самой высокой скорости прогрева вод в мае. В южной части западного шельфа и в глубоководной части моря эти максимумы отмечаются в ноябре, когда наблюдается максимальная скорость охлаждения вод. Максимум значений $R_{rs}(555)$ на большей части акватории Черного моря фиксируется в июне, когда воды наиболее быстро прогреваются [21]. По данным сканера цвета *MODIS-Aqua* показано, что влияние Основного Черноморского течения (ОЧТ)

¹⁾ Маньковский В. И., Маньковская Е. В., Соловьев М. В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2009. С. 41.

на распределение коэффициента яркости моря отмечается в апреле в виде полосы повышенных значений R_{rs} над континентальным склоном [23]. По данным *Copernicus*, к югу от берегов Крыма влияние ОЧТ на пространственное распределение среднемесячных климатических полей концентрации $Chl-a$ и $R_{rs}(555)$ проявляется в формировании языков вод с повышенными значениями концентрации $Chl-a$, $R_{rs}(555)$ и температуры и пониженными значениями солености. Максимальное распространение вод, переносимых ОЧТ на запад (почти до 32° в. д.), в климатических полях биооптических и термохалинных параметров наблюдается в феврале, в период увеличения зональной геострофической скорости ОЧТ [24]. В работе [22] по данным спутниковых измерений *SeaWiFS* и *MODIS* проанализированы тенденции межгодовой изменчивости концентрации хлорофилла на шельфе северной части Черного моря у Кавказского и Крымского побережий за период с 1997 по 2015 г. Показано, что при высокой вариабельности среднегодовой концентрации хлорофилла в различные годы в распределении этих значений отсутствовал многолетний тренд и выраженных межгодовых тенденций не выявлено [22].

Информацию о биооптической структуре вод в глубинных слоях моря позволяют получить только контактные методы, при этом проведение гидрологических и биооптических наблюдений квазисинхронно с инструментальными измерениями течений существенно расширяет возможности интерпретации особенностей распределения биооптических полей. Регулярные экспедиционные исследования в северной части Черного моря позволили оценить состояние биооптических и гидрологических полей и их изменчивость на различных пространственно-временных масштабах [11, 13, 24–34].

Так, обобщение подробных гидрооптических съемок, выполненных в рамках программы экспедиционных исследований МГИ РАН в 2016–2020 гг. на НИС «Профессор Водяницкий», показало, что основными источниками повышенной концентрации ОВВ в поверхностном слое моря у берегов Крыма являются низкосолёные и мутные воды, поступающие из Керченского пролива, воды стоков рек Кавказского побережья и распресненные воды северо-западного шельфа. В глубоководной части моря были выявлены локальные области мутных вод, сформировавшиеся под влиянием вертикальной циркуляции в зонах циклонических круговоротов и меандров ОЧТ. Показано, что вертикальная структура концентрации ОВВ характеризовалась верхним квазиоднородным слоем, обычно совпадающим по толщине с верхним квазиоднородным слоем в полях термохалинных параметров. В пределах этого слоя между распределениями значений концентрации ОВВ и значений температуры и солености была выявлена значимая линейная отрицательная корреляция, между распределениями значений концентрации ОВВ и плотности – положительная. Глубже, в слое сезонных термоклина и пикноклина, прослеживался подповерхностный максимум концентрации ОВВ. Ниже ядра холодного промежуточного слоя в слое основных термоклина, галоклина и пикноклина прослеживался промежуточный минимум концентрации ОВВ. Под этим минимумом располагался еще один слой повышенной мутности, глубина которого совпадала с глубиной верхней границы сероводородной зоны [28].

В июне 2023 г. в ходе 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в прибрежной части Черного моря непосредственно у берегов Крыма была выполнена

комплексная гидролого-биооптическая съемка, результаты которой представляют особый интерес. В ходе этого рейса гидрологические и биооптические измерения проводили по учащенной сетке станций и повторяли дважды с временным интервалом около недели. Координаты станций, выполненных в ходе двух этапов измерений, почти совпадали, что позволило сопоставить распределения измеряемых на этих этапах параметров и оценить различия, обусловленные синоптической изменчивостью.

Цель работы – проанализировать изменчивость распределения показателя ослабления направленного света и флуоресценции *Chl-a* у берегов Крыма на синоптическом масштабе летом 2023 г. и оценить связь этой изменчивости с изменениями гидрологической структуры вод.

Материалы и методика

Гидрологические измерения в ходе 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в июне 2023 г. проводили в пределах территориальных вод России непосредственно у берегов Крыма от м. Сарыч до м. Чауда (рис. 1). При сохранении общего экспедиционного времени (25 сут) в связи с административными ограничениями площадь полигона измерений уменьшилась по сравнению с предшествующими рейсами. Это позволило увеличить количество гидрологических станций и получить детальные пространственные распределения гидрооптических параметров, отражающие текущее состояние структуры вод в прибрежной зоне Крыма. Первый этап измерений выполнялся с 14 по 20 июня (64 станции) (рис. 1, а), второй этап – с 22 по 28 июня (62 станции) (рис. 1, б), при этом координаты станций в ходе двух этапов почти совпадали.

Температуру (°C) и соленость (ЕПС) морской воды измеряли с помощью зондирующего CTD-комплекса *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 PlusM²⁾*, скорости и направления течений (см/с) – с помощью акустического доплеровского измерителя течений *Workhorse Monitor 300 kHz ADCP³⁾*,

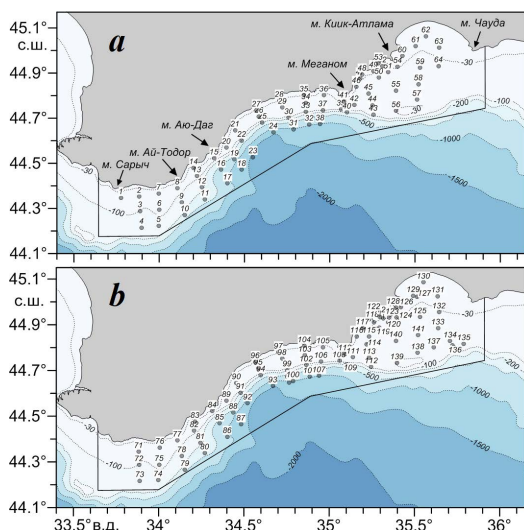


Рис. 1. Схема гидрологических станций, выполненных у берегов Крыма в ходе 1-го (14.06.2023–20.06.2023) (а) и 2-го (22.06.2023–28.06.2023) (б) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 1. Map of hydrological stations surveyed near Crimean coasts during the 1st (14–20 June 2023) (a) and 2nd (22–28 June 2023) (b) cruises of R/V *Professor Vodyanitsky*

²⁾ URL: http://www.technopolecom.ru/downloads/doc_212.pdf (дата обращения: 08.08.2025).

³⁾ URL: https://www.bodc.ac.uk/data/documents/nodb/pdf/workhorse_monitor.pdf (дата обращения: 08.08.2025).

интенсивность флуоресценции хлорофилла *a* (*F Chl-a*, усл. ед.) и показатель ослабления направленного света на длине волны 660 нм (ϵ_{660} , м^{-1}) – с помощью гидробиофизического мультипараметрического погружного автономного комплекса «КОНДОР»⁴⁾ преимущественно в дневное время суток. Кроме того, на каждой станции непрерывно записывали значения скорости приземного ветра W (м/с) с помощью судовой метеостанции *AIRMAR-220WX*.

При количественных оценках согласованности распределений значений биооптических параметров и глубин залегания их максимумов и сезонных термоклина и галоклина статистическая достоверность коэффициентов линейной корреляции R оценивалась с уровнем статистической значимости $\alpha = 0.01$ (99%-ный уровень достоверности) согласно методике⁵⁾.

Результаты

Во время первого этапа измерений значения показателя ослабления направленного света изменялись на акватории съемки в пределах $0.6\text{--}0.83 \text{ м}^{-1}$ (рис. 2, *a*). Самые мутные воды (значения $\epsilon_{660} > 0.77 \text{ м}^{-1}$) наблюдались в прибрежной части Феодосийского залива, юго-восточнее м. Аю-Даг и у западной

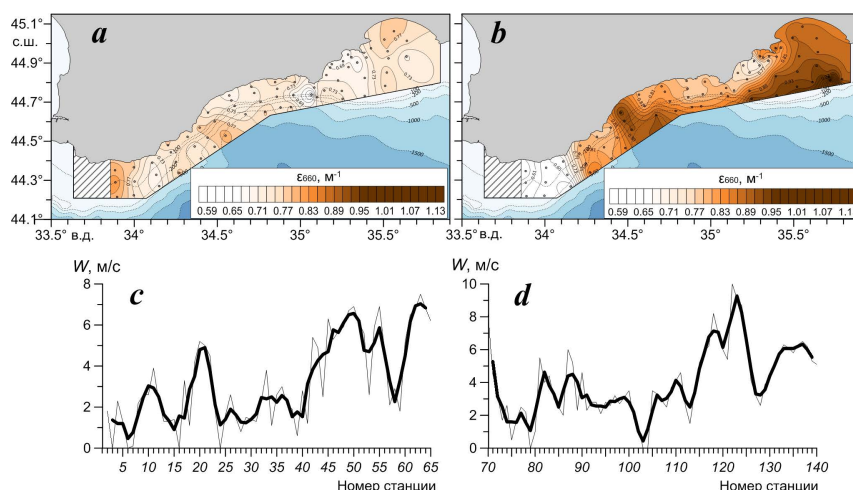


Рис. 2. Распределения значений ϵ_{660} на поверхности (*a, b*) и скорости ветра W (м/с) (*c, d*) на станциях по данным 1-го (*a, c*) и 2-го (*b, d*) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Жирные кривые на фрагментах *c, d* – сглаживание скользящим средним по трем станциям

Fig. 2. Distributions of ϵ_{660} values on the surface (*a, b*) and wind speed W (m/s) (*c, d*) at stations according to data from the 1st (*a, c*) and 2nd (*b, d*) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. Bold curves in fragments *c, d* – smoothing by a moving average over three stations

4) URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (date of access: 27.08.2025).

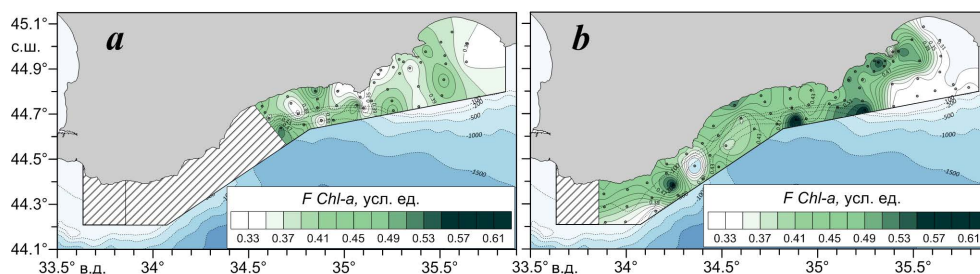
5) Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации, Санкт-Петербург : Изд-во РГГМУ, 2008. 408 с. EDN RBVBMH.

границы полигона. Повышение мутности в мелководной части Феодосийского залива с глубинами менее 30 м было связано с заметным усилением скорости ветра на ст. 61–63 (рис. 2, с), что привело к взмучиванию донной и береговой взвеси. Самые прозрачные воды (значения $\epsilon_{660} < 0.67 \text{ м}^{-1}$) наблюдались на траверзе м. Меганом.

Во время второго этапа, неделей позже, на большей части полигона мутность воды на поверхности заметно возросла. Значения ϵ_{660} на большей части акватории полигона составили $0.65\text{--}1.15 \text{ м}^{-1}$ (рис. 2, b). Самые высокие значения ϵ_{660} ($> 0.91 \text{ м}^{-1}$) отмечались восточнее м. Аю-Даг и у южной границы на востоке полигона. Заметное повышение значений ϵ_{660} (до $0.83\text{--}0.89 \text{ м}^{-1}$) наблюдалось у берега в районе м. Киик-Атлама, где в период 1-го этапа измерений значения ϵ_{660} не превышали 0.73 м^{-1} . Как и в прибрежной части Феодосийского залива на ст. 61–63, это повышение мутности было связано с усилением скорости ветра на ст. 120–128 (рис. 2, d). Воды наибольшей прозрачности ($\epsilon_{660} < 0.63 \text{ м}^{-1}$) располагались у западной границы полигона, где во время 1-го этапа наблюдалась максимальная мутность вод.

Распределение интенсивности $F \text{ Chl-}a$ на поверхности моря во время выполнения двух этапов измерений также было весьма неоднородным. По техническим причинам измерения интенсивности $F \text{ Chl-}a$ на первом этапе выполняли, начиная со ст. 24 (рис. 3). Вследствие этого сопоставление распределения интенсивности $F \text{ Chl-}a$ проводили только для центральной и восточной частей полигона. В период 1-го этапа измерений значения интенсивности $F \text{ Chl-}a$ изменялись в диапазоне $0.32\text{--}0.53$ усл. ед., а их пространственное распределение носило «пятнистый» характер: максимальные значения ($0.47\text{--}0.53$ усл. ед.) наблюдались у южной границы полигона примерно между 34.6° и 34.8° в. д., а минимальные (менее 0.35 усл. ед.) – у берега в районе м. Меганом и в восточной части Феодосийского залива (рис. 3, a).

В период 2-го этапа измерений наблюдалось общее увеличение интенсивности $F \text{ Chl-}a$ почти на всей акватории полигона (рис. 3, b). Ее максимальные значения достигали $0.59\text{--}0.61$ усл. ед., а минимум (не превышающий 0.33 усл. ед.), как и на 1-м этапе, отмечался у восточной границы полигона. В прибрежной зоне в районе м. Меганом, где в период 1-го этапа прослеживался минимум интенсивности $F \text{ Chl-}a$, на 2-м этапе фиксировалось заметное ее увеличение



Р и с. 3. Распределение интенсивности $F \text{ Chl-}a$ во время 1-го (a) и 2-го (b) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 3. Distributions of chlorophyll a fluorescence intensity during the 1st (a) and 2nd (b) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*

(до 0.45–0.50 усл. ед.) (рис. 3, *b*). Отметим, что в период 2-го этапа измерений у восточной границы полигона воды с пониженной интенсивностью *F Chl-a* характеризовались повышенной мутностью (рис. 2, *b*; 3, *b*).

В целом, несмотря на наблюдаемые различия распределения показателя ослабления направленного света и интенсивности *F Chl-a* в периоды 1-го и 2-го этапов, на большей части полигона выявлена значимая тенденция к увеличению интенсивности *F Chl-a* в областях вод повышенной мутности (рис. 4). Исключение составляет область вод у восточной границы полигона, характеризующаяся повышенной мутностью в период 2-го этапа. В этой области наблюдалось понижение интенсивности *F Chl-a* (рис. 2, *b*; 3, *b*; 4, *c*).

Анализ распределения векторов течений по данным инструментальных измерений показал, что различия между распределением значений ϵ_{660} в периоды двух этапов измерений были связаны с заметными изменениями циркуляции вод (рис. 5). Так, основной поток западного направления, характеризующий ОЧТ, в период 1-го этапа наиболее четко прослеживался только в западной части полигона, а к востоку от м. Ай-Тодор наблюдался поток противоположного восточного направления (рис. 5, *a*). В восточной части полигона наблюдались хорошо выраженные синоптические вихри – циклонический к югу от Феодосийского залива (Феодосийский циклон) и антициклонический несколько западнее на траверзе Карадага (Карадагский антициклон). Подобная структура циркуляции вод свидетельствует о том, что на большей части акватории восточнее м. Ай-Тодор основной поток ОЧТ располагался южнее, вне пределов полигона.

В период 2-го этапа структура циркуляции заметно изменилась (рис. 5, *b*). На основной части акватории, за исключением Феодосийского залива, прослеживались течения западного направления, соответствующие потоку ОЧТ.

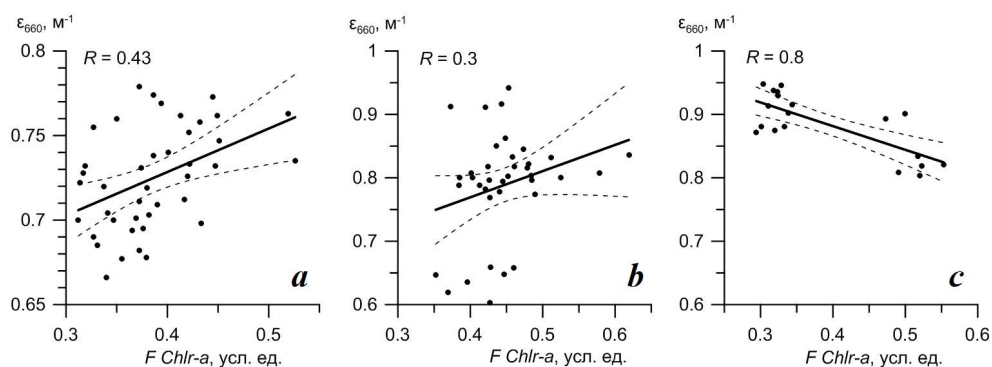


Рис. 4. Графики линейной корреляции между значениями интенсивности *F Chl-a* и ϵ_{660} , по данным 1-го этапа на ст. 24–65 (*a*), 2-го этапа на ст. 71–119 (*b*) и 120–141 (*c*). Штриховые линии – границы доверительного интервала 99%-ного уровня статистической достоверности

Fig. 4. Graphs of the linear correlation between the values of *F Chl-a* and ϵ_{660} according to the data of the 1st stage at stations 24–65 (*a*), the 2nd stage at stations 71–119 (*b*) and 120–141 (*c*). Dashed lines are the boundaries of the 99% confidence interval

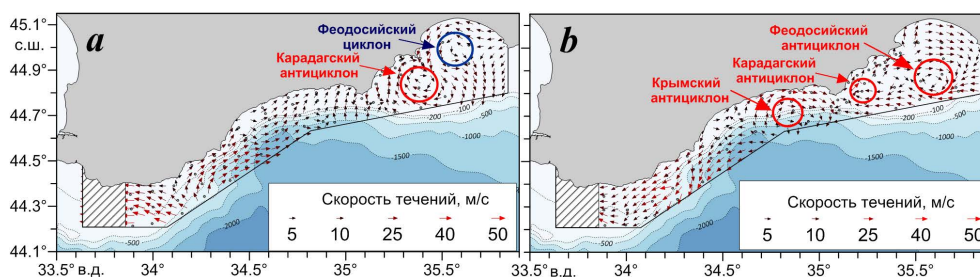


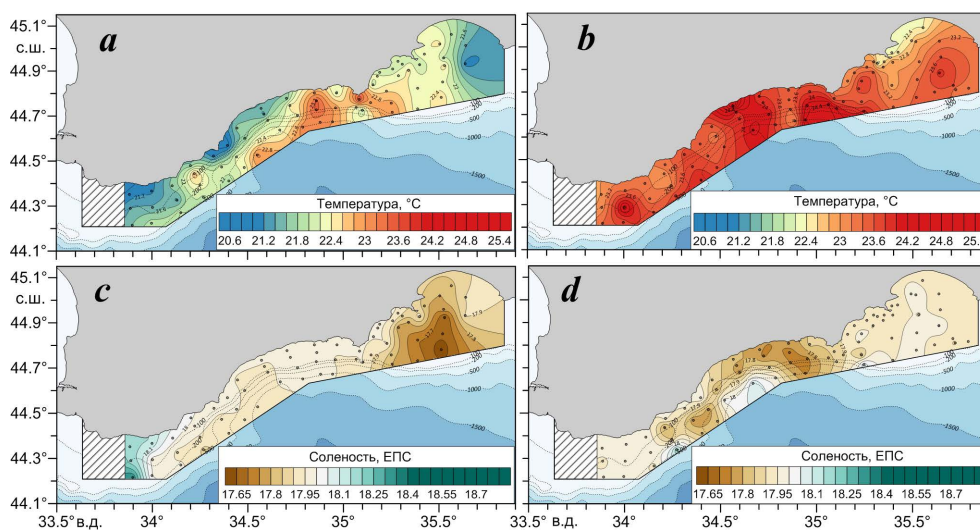
Рис. 5. Распределение векторов инструментально измеренных течений (см/с) в поверхностном слое, по данным 1-го (а) и 2-го (б) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Антициклонические вихри показаны красным цветом, циклонические – синим

Fig. 5. Distributions of vectors of instrumentally measured currents (cm/s) in the surface layer according to data from the 1st (a) and 2nd (b) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. Anticyclonic eddies are shown in red, cyclonic eddies are shown in blue

В центральной части полигона одна часть потока ОЧТ разворачивалась на север, затем на северо-восток и формировала Крымский антициклон, а другая часть продолжала следовать в западном направлении. В восточной части полигона сохранялся Карадагский антициклон. Вместо Феодосийского циклона ближе к южной границе полигона сформировался антициклонический вихрь, условно названный Феодосийским антициклоном (рис. 5, b).

Распределения температуры (ТПМ) и солёности (СПМ) на поверхности моря во время двух этапов измерений также заметно различались (рис. 6). Временные изменения на масштабе недели проявились в заметном увеличении значений ТПМ (до 22.6–25.3 °C) в период 2-го этапа по сравнению с 1-м этапом, когда значения ТПМ составляли 20.6–23.4 °C (рис. 6, a, b). Это повышение ТПМ было связано как с продолжающимся сезонным прогревом поверхностных вод, поскольку 2-й этап выполнялся на неделю позже, так и с поступлением на акваторию полигона вод, переносимых потоком ОЧТ с юго-востока к берегам Крыма. Эти воды характеризуются повышенной температурой и пониженной солёностью [24], что связано с влиянием азово-керченского распреснения, при котором азовоморские воды проникают через Керченский пролив и перемещаются вдоль северной периферии ОЧТ на запад [24, 35]. Влияние азово-керченского распреснения в поле солёности на поверхности моря (рис. 6, c, d) наиболее четко проявилось в период 2-го этапа измерений в центральной части полигона. Распресненные воды со значениями СПМ ниже 17.9 ЕПС, переносимые потоком ОЧТ, распространялись вдоль периферии Крымского антициклона на северо-восток, затем следовали вдоль берега в восточном направлении и далее на юго-восток (рис. 6, d).

Азово-керченские воды, помимо пониженной солёности, характеризуются также повышенной мутностью [24, 35], что привело к повышению значений E_{660} в период 2-го этапа измерений, наиболее четко проявляющемуся в юго-восточной и центральной частях полигона (рис. 2, b). Отметим, что в восточной части полигона, в области вод повышенной мутности, на 2-м этапе измерений зафиксировано заметное снижение интенсивности $F\ Chl-a$.



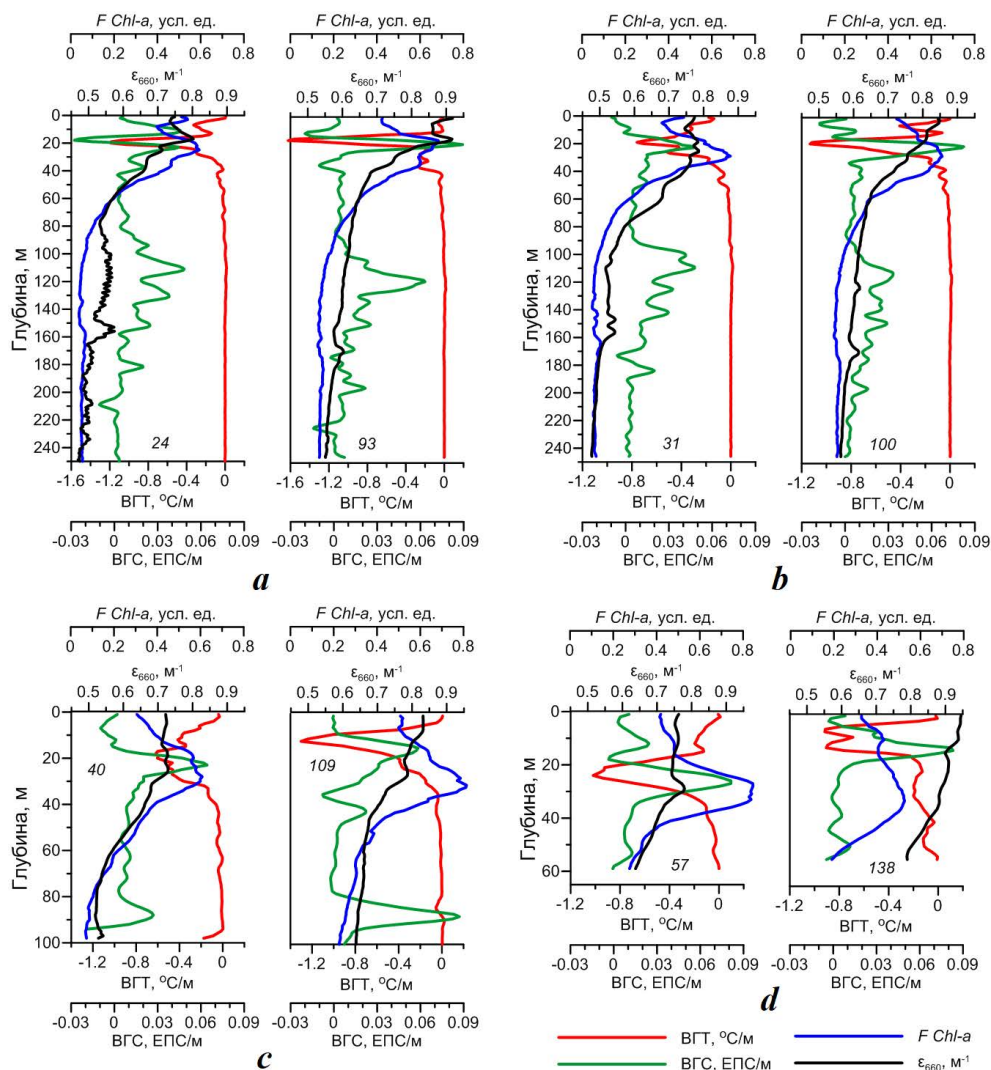
Р и с . 6 . Распределения температуры (*a, b*) и солёности (*c, d*) на горизонте 2 м, по данным 1-го (*a, c*) и 2-го (*b, d*) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий»

F i g . 6 . Distributions of temperature (*a, b*) and salinity (*c, d*) at the 2 m horizon according to data from the 1st (*a, c*) and 2nd (*b, d*) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*

По-видимому, это также может быть связано с проникновением в юго-восточную часть полигона азово-керченских вод, которые затем вдоль периферии Феодосийского антициклона распространялись на всю восточную часть акватории. Согласно [36], в период проведения измерений (июнь) концентрация *Chl-a* в Азовском море достигает минимальных значений.

Таким образом, изменения распределения значений показателя ослабления направленного света, температуры и солёности в поверхностных водах на синоптическом временном масштабе (около недели) были обусловлены в основном изменчивостью циркуляции вод. Проникновение потока ОЧТ на полигон в период 2-го этапа измерений привело к более интенсивному поступлению на акваторию полигона азово-керченских вод, что сопровождалось понижением прозрачности и солёности и повышением температуры, на которую оказывал также влияние продолжающийся сезонный прогрев.

Вертикальное распределение значений показателя ослабления направленного света, интенсивности *F Chl-a*, температуры и солёности показало, что термохалинные и биооптические поля характеризовались хорошо выраженной летней вертикальной стратификацией. Примеры вертикальных профилей ε_{660} , интенсивности *F Chl-a* и вертикальных градиентов температуры (ВГТ) и солёности (ВГС) на станциях, выполненных в одной и той же точке с недельным интервалом в разных частях полигона, представлены на рис. 7. Синоптические изменения вертикальной биооптической и термохалинной структуры вод на масштабе около недели наблюдались во всем слое измерений и проявлялись в изменении количества и значений максимумов ε_{660} , интенсивности *F Chl-a*, ВГТ (по абсолютной величине) и ВГС, а также глубин их залегания.



Р и с . 7 . Вертикальные распределения значений интенсивности $F Chl-a$, ϵ_{660} , ВГТ и ВГС, зарегистрированных на станциях в тех же точках с интервалом в неделю в разных частях полигона. Номера станций указаны в нижней части графиков

F i g . 7 . Vertical distributions of $F Chl-a$, ϵ_{660} , VTG and VSG values at stations carried out at the same point with a weekly interval in different parts of the polygon. The station numbers are indicated at the bottom of the graphs

Так, на ст. 24 (1-й этап) наблюдался один основной максимум ϵ_{660} (0.8 м^{-1}) на глубине 18 м. Через неделю (ст. 93, 2-й этап) были зафиксированы два максимума ϵ_{660} (0.92 м^{-1}) – на поверхности и на глубине 16 м. Основной максимум интенсивности $F Chl-a$ на ст. 24 располагался на глубине 25 м, а на ст. 93 – на глубине 18 м, при этом его значение увеличилось с 0.6 до 0.7 усл. ед. (рис. 7, а).

Термохалинная структура на ст. 24 характеризовалась одним основным максимумом ВГТ (1.2 °C/м) на глубине 20 м и двумя максимумами ВГС

(0.045 ЕПС/м) на глубинах 11 и 22 м. Через неделю (ст. 93) прослеживались один максимум ВГТ и один – ВГС на глубинах 18–20 м, причем их значения возросли до 1.6 °С/м и 0.09 ЕПС/м соответственно (рис. 7, а).

Восточнее, на ст. 31 (1-й этап), были выявлены два максимума значений ε_{660} (0.78 м⁻¹) на глубинах 18 м и 23 м, через неделю (ст. 100) максимальные значения ε_{660} (0.85 м⁻¹) зафиксированы в поверхностном слое. Максимум интенсивности *F Chl-a*, по данным обоих этапов, располагался на глубине 30 м, при этом его значения понизились с 0.7 усл. ед. (ст. 31) до 0.65 усл. ед. (ст. 100) (рис. 7, б). Сезонные термоклин (ВГТ ~ 0.78 °С/м) и галоклин (ВГС ~ 0.05 ЕПС/м) на ст. 31 располагались на глубинах 20–21 м. Через неделю (ст. 100) глубина их залегания не изменилась, а значения повысились до 1.17 °С/м и 0.08 ЕПС/м соответственно (рис. 7, б).

В районе м. Меганом на ст. 40 (1-й этап) максимальные значения ε_{660} (0.74 м⁻¹) наблюдались на горизонтах 18 м и 25 м, через неделю (ст. 109) они повысились до 0.84 м⁻¹ и прослеживались в поверхностном слое 2–7 м. Максимум интенсивности *F Chl-a* на ст. 40 и 109 был выявлен на глубинах 28 м и 32 м, при этом его значение повысилось с 0.6 до 0.8 усл. ед. (рис. 7, в). Значение максимума ВГТ возросло с 0.6 °С/м (ст. 40) до 1.3 °С/м (ст. 109). Значения максимума ВГС на обеих станциях находились в интервале 0.06–0.063 ЕПС/м. Отмечалось уменьшение глубин залегания сезонных термоклина и галоклина с 18 и 22 м на ст. 40 до 12 и 15 м на ст. 109 (рис. 7, в).

В восточной части полигона на мелководной станции 57 основной максимум значений ε_{660} (0.77 м⁻¹) наблюдался на глубине 30 м. Через неделю (ст. 138) максимумы ε_{660} прослеживались в поверхностном слое 2–10 м и возросли до 0.95 м⁻¹. Значение максимума интенсивности *F Chl-a*, наоборот, понизилось с 0.95 усл. ед. (ст. 57) до 0.77 усл. ед. (ст. 138). Он прослеживался в слое 27–32 м на ст. 57 и на горизонте 32 м на ст. 138 (рис. 7, д). Глубина залегания максимумов ВГТ и ВГС на ст. 57 составляла 24 и 27 м соответственно. На ст. 138 прослеживались два хорошо выраженных максимума ВГТ на глубинах 5 и 12 м, глубина залегания максимума ВГС уменьшилась до 12 м. Значения максимума ВГТ снизились с 1 °С/м (ст. 57) до 0.9 °С/м (ст. 138), а значения максимума ВГС на обеих станциях составляли 0.080–0.082 ЕПС/м (рис. 7, д).

Отметим, что на глубоководных станциях под основным галоклином прослеживался еще один максимум ε_{660} , располагающийся примерно в слое 150–170 м (рис. 7, а, б), который, согласно [37], охватывает нижнюю границу субкислородной редокс-зоны и верхний слой сероводородной зоны. По данным предшествующих экспедиционных измерений, на этих глубинах также был выявлен максимум концентрации ОВВ [29, 30]. Это увеличение значений ε_{660} (до 0.6 м⁻¹) прослеживалось по данным обоих этапов измерений, но глубина залегания экстремумов, как и в случае основного максимума ε_{660} , изменялась за неделю на 10–15 м (рис. 7, а, б).

В целом в период 2-го этапа измерений на большей части полигона наблюдалось повышение значений максимумов ВГТ (рис. 8, а) и ВГС (рис. 8, б), то есть термохалинные поля характеризовались более выраженной вертикальной стратификацией. В подповерхностном слое также прослеживалось повышение значений ε_{660} , особенно в восточной части полигона (рис. 8, в), а также значений интенсивности *F Chl-a* на большей части полигона и понижение этих значений в восточной части полигона (рис. 8, д).

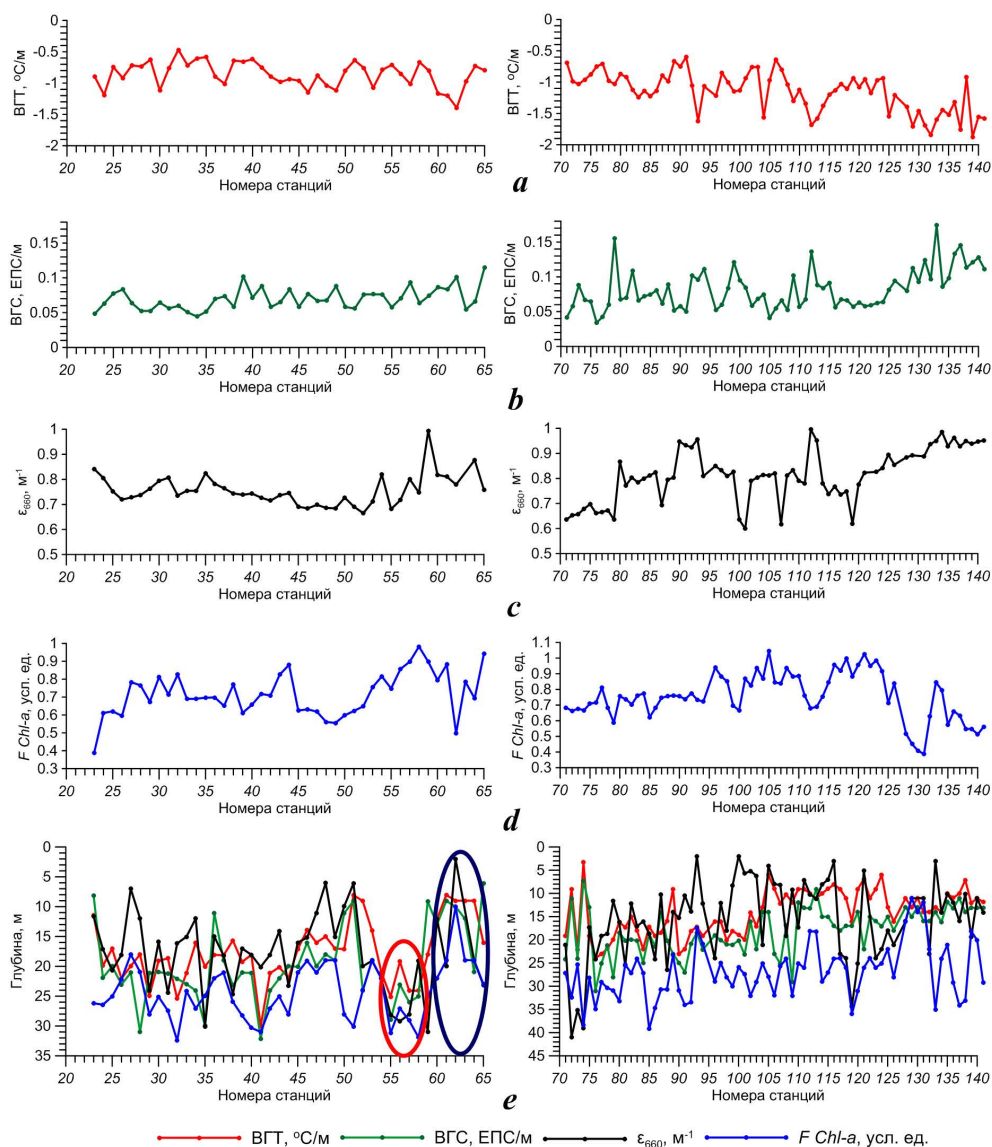
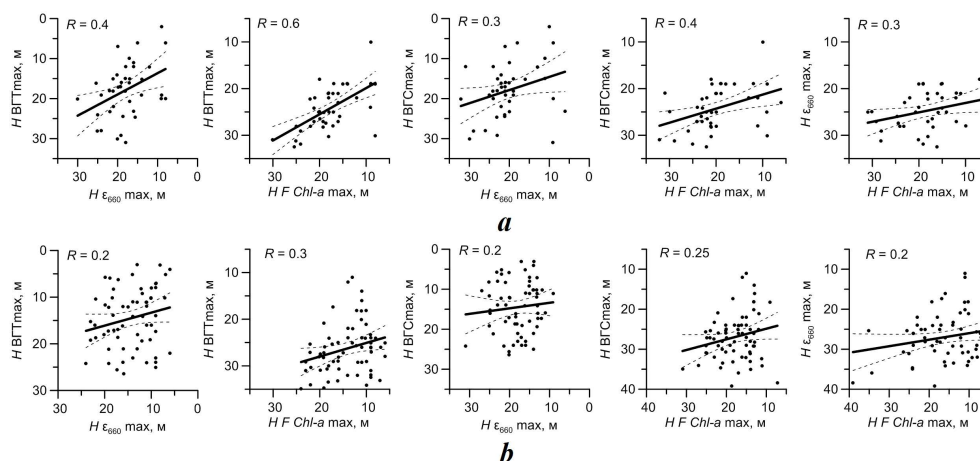


Рис. 8. Распределение значений основных максимумов ВГТ (а), ВГС (b), ε_{660} (c), интенсивности $F\ Chl-a$ (d) и глубин их залегания (e) на станциях, по данным 1-го (слева) и 2-го (справа) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Красным эллипсом выделены глубины залегания параметров на станциях в области Карадагского антициклона, синим – на станциях в области Феодосийского циклона

Fig. 8. Distributions of the main maxima of VTG (a), VSG (b), ε_{660} (c), $F\ Chl-a$ (d) values, their depths (e) at stations according to data from the 1st (left) and 2nd (right) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. The red ellipse highlights the depths of the parameters at stations located in the area of the Karadag anticyclone, and the blue ellipse highlights the depths of the parameters at stations located in the area of the Feodosia cyclone

Распределение глубин залегания основных максимумов ВГТ, ВГС, значений ε_{660} и интенсивности $F\ Chl-a$ на всех станциях показало, что глубины залегания сезонного термоклина в период 1-го этапа составляли 7–30 м, в период 2-го этапа термоклин поднялся ближе к поверхности и располагался на глубинах 4–24 м (рис. 8, *e*). Сезонный галоклин, по данным обоих этапов, прослеживался на глубинах от 6 до 32 м (рис. 8, *e*). Анализ вертикальных профилей значений ε_{660} в периоды обоих этапов показал, что максимум значений ε_{660} прослеживался либо в поверхностном слое, либо в слое сезонных термоклина и галоклина, что согласуется с глубиной залегания максимума концентрации ОВВ по данным многолетних экспедиционных измерений [28]. Максимум интенсивности $F\ Chl-a$, по данным всех станций, располагался под слоем сезонных термоклина и галоклина (рис. 8, *e*). В распределении глубин залегания максимумов термохалинных и биооптических параметров в период выполнения 1-го этапа измерений хорошо проявлялись особенности динамики вод. Отмечалось заметное увеличение этих глубин на станциях, расположенных в области Карадагского антициклона (ст. 54–59, выделены красным эллипсом), и уменьшение на станциях в области Феодосийского циклона (ст. 60–65, выделены синим эллипсом) (рис. 8, *e*). Анализ вертикальной структуры циркуляции вод показал, что эти синоптические вихри хорошо прослеживались во всем верхнем 50-метровом слое. В период 2-го этапа измерений синоптические антициклонические вихри проявлялись только в поверхностном 10-метровом слое, поэтому особенности циркуляции почти не отражались в распределении глубин залегания максимумов термохалинных и биооптических параметров (рис. 8, *e*).



Р и с . 9. Графики линейной корреляции между глубинами залегания максимумов интенсивности $F\ Chl-a$, ε_{660} , ВГТ и ВГС, по данным 1-го (*a*) и 2-го (*b*) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Штриховые линии – границы доверительного интервала 99%-ного уровня статистической достоверности

F i g . 9. Graphs of the linear correlation between the depths of occurrence of the maxima of $F\ Chl-a$, ε_{660} , VTG and VSG according to the data of the 1st (*a*) and 2nd (*b*) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. Dashed lines are the boundaries of the 99% confidence interval

Количественные оценки согласованности распределений глубин залегания максимумов биооптических параметров и сезонных термоклина и галоклина (рис. 9) показали, что наиболее тесная связь между этими параметрами наблюдается в период 1-го этапа измерений (рис. 9, а). Максимальная прямая линейная корреляция с уровнем статистической значимости $\alpha = 0.01$ (99%-ный уровень достоверности) выявлена между распределением глубины залегания сезонного термоклина и глубинами локализации максимумов ϵ_{660} и интенсивности $F\ Chl-a$, а также между глубинами залегания сезонного галоклина и максимума интенсивности $F\ Chl-a$. Значения коэффициента корреляции R между этими параметрами составляют соответственно 0.4, 0.6 и 0.4. Между глубинами залегания сезонного галоклина и максимума ϵ_{660} , а также максимумов ϵ_{660} и интенсивности $F\ Chl-a$ уровень линейной связи понижается, значения R составляют 0.3 (рис. 9, а).

В период 2-го этапа измерений связь между распределениями глубин залегания максимумов биооптических параметров и сезонных термоклина и галоклина остается значимой при $\alpha = 0.01$, но заметно ослабевает и значения R не превышают 0.3 (рис. 9, б).

Выводы

По данным гидрологических и биооптических измерений, выполненных в июне 2023 г. в ходе 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» у берегов Крыма, проанализирована изменчивость распределений показателя ослабления направленного света и интенсивности $F\ Chl-a$ на синоптическом масштабе и оценена связь этой изменчивости с изменениями гидрологической структуры вод. На большей части полигона по данным обоих этапов измерений выявлена значимая тенденция к увеличению интенсивности $F\ Chl-a$ в областях вод с повышенными значениями показателя ослабления направленного света. Показано, что изменения распределения температуры, солёности и значений ПОС на поверхности моря на недельном временном масштабе были связаны с изменением циркуляции вод. В период 2-го этапа измерений на акваторию полигона с потоком ОЧТ проникали более теплые, менее солёные и более мутные азово-керченские воды, что привело к понижению солёности в центральной части полигона, повышению мутности вод в юго-восточной и центральной частях полигона и к повышению температуры, на которую также оказывал влияние продолжающийся сезонный прогрев. Азово-керченские воды, поступающие в юго-восточную часть полигона и затем распространяющиеся на всю восточную часть акватории вдоль периферии Феодосийского антициклона, способствовали понижению интенсивности $F\ Chl-a$ в области вод повышенной мутности у восточной границы полигона, так как концентрация $Chl-a$ в Азовском море в период проведения измерений была понижена.

Показано, что синоптические изменения вертикальной термохалинной и биооптической структуры вод на масштабе около недели наблюдались во всем слое измерений и проявлялись в изменении количества и значений максимумов ПОС, интенсивности $F\ Chl-a$, ВГТ и ВГС, а также глубин их залегания. В период выполнения 2-го этапа измерений на большей части полигона термохалинные поля характеризовались более выраженной вертикальной

стратификацией. В подповерхностном слое, как и на поверхности, наблюдалось повышение ПОС, особенно в восточной части полигона, а также интенсивности *F Chl-a* на большей части полигона и их понижение в восточной части полигона. Основным максимум значений ПОС прослеживался либо в поверхностном слое, либо в слое сезонных термоклина и галоклина, а максимум интенсивности *F Chl-a* располагался под слоем сезонных термоклина и галоклина. На глубоководных станциях под слоем основного галоклина прослеживался еще один максимум значений ПОС, располагающийся в слое 150–170 м, охватывающем нижнюю границу субкислородной редокс-зоны и верхний слой сероводородной зоны.

Между распределениями глубины залегания сезонного термоклина и глубинами локализации максимумов ПОС и интенсивности *F Chl-a*, а также между глубинами залегания сезонного галоклина и максимума интенсивности *F Chl-a* по данным 1-го этапа измерений выявлена значимая линейная корреляция со значениями коэффициента $R = 0.4, 0.6$ и 0.4 соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В. А., Катунина Е. В., Совга Е. Е. Оценки антропогенных воздействий на экосистему акватории Гераклейского полуострова в районе расположения глубинных стоков // Процессы в геосредах. 2016. Т. 1, № 5. С. 62–68. EDN VTPRWP.
2. 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/10.22449/0233-7584-2020-1-103-115>
3. Eisma D. Suspended matter in the aquatic environment. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag. 1993, 315 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77722-6>
4. Маньковский В. И., Соловьев М. В. Связь показателя ослабления излучения с концентрацией взвеси в водах Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2003. № 2. С. 60–65. EDN YWWVGX
5. Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Антропогенная экология океана. Москва : Флинта, 2009. 520 с. EDN QKSULT.
6. Кукушкин А. С., Агафонов Е. А., Прохоренко Ю. А. Распределение показателя ослабления направленного света в поверхностных прибрежных водах Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2006. № 5. С. 30–43. EDN VMLLHM.
7. Кукушкин А. С. Пространственно-временная изменчивость распределения прозрачности вод в северо-западной части Черного моря // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 9. С. 750–762. EDN ZFCHKF. <https://doi.org/10.15372/AOO20170904>
8. Hoepffner N., Sathyendranath S. Bio-optical characteristics of coastal waters: Absorption spectra of phytoplankton and pigment distribution in the western North Atlantic // Limnology and Oceanography. 1992. Vol. 37, iss. 8. P. 1660–1679. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.8.1660>
9. McManus G. B., Dawson R. Phytoplankton pigments in the deep chlorophyll maximum of the Caribbean Sea and the western tropical Atlantic Ocean // Marine Ecology Progress Series. 1994. Vol. 113. P. 199–206. <https://doi.org/10.3354/meps113199>
10. Мордасова Н. В. Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // Труды ВНИРО. Среда обитания водных биологических ресурсов. 2014. Т. 152. С. 41–56. EDN TGTNTX.

11. Концентрация и флуоресценция хлорофилла а в период сезонной стратификации вод в Черном море / Н. А. Моисеева [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 481–495. EDN DLINPW. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-481-495>
12. Экстракционно-флуориметрическое определение хлорофилла «а» в природных водах / З. А. Темердашев [и др.] // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23, № 3. С. 323–333. EDN NURXRI. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.3.001>
13. Мансурова И. М., Стельмах Л. В., Фарбер А. А. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла «а» в Черном море в летний и осенний периоды по данным зондирующего комплекса и прямых измерений // Системы контроля окружающей среды. 2023. Вып. 2. С. 84–91. EDN KMVZLG.
14. Volpe V., Silvestri S., Marani M. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115, iss. 1. P. 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.013>
15. Определение концентрации взвешенного вещества в Черном море по данным спутника MODIS / Д. А. Кременчуцкий [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. № 29. С. 5–9. EDN UXWYMX.
16. Концентрация хлорофилла-а в Черном море: Сравнение спутниковых алгоритмов / В. В. Суслин [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 64–72. EDN VALADQ. <https://doi.org/10.7868/S2073667318030085>
17. An empirical algorithm to seamlessly retrieve the concentration of suspended particulate matter from water color across ocean to turbid river mouths / Y. Xiaolong [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 235. 111491. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111491>
18. Количественный подход к исследованию пленочных загрязнений морской поверхности по космическим изображениям / В. В. Замшин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 5. С. 610–622. EDN WLXXAT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-5-610-622>
19. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 г. по данным спутникового прибора SeaWiFS / В. С. Суетин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 6. С. 44–54. EDN РОСМУЛ.
20. Сезонная и межгодовая изменчивость биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева, Белого, Черного и Каспийского морей по спутниковым данным / О. В. Копелевич [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 1. С. 7–16. EDN TPPQXV.
21. Среднегодовое внутригодовое изменение гидрооптических характеристик, хлорофилла «а» и температуры на поверхности Черного моря по спутниковым данным / Ю. В. Артамонов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 171–180. EDN ZABIAX. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-171-180>
22. Ковалёва И. В., Финенко З. З., Суслин В. В. Тренды многолетних изменений концентрации хлорофилла, первичной продукции фитопланктона и температуры воды на шельфе в южном и восточном районах Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 4. С. 228–235. EDN RVEEZP. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-22>
23. Карабашев Г. С., Евдошенко М. А. Проявления Основного черноморского течения, "цветения" кокколитофорид и континентального стока в среднемесячных распределениях коэффициента яркости Черного моря // Океанология. 2015. Т. 55, № 1. С. 44–55. EDN TGWBID. <https://doi.org/10.7868/S0030157415010086>

24. Rim Current manifestation in the climatic fields of hydro-optical and hydrological characteristics at the coast of Crimea / Yu. V. Artamonov [et al.] // Proceedings of SPIE. SPIE, 2019. Vol. 11208 : 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 112084X. EDN ECGOSG. <https://doi.org/10.1117/12.2540803>
25. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А. Оценка полей суммарной взвеси и растворенного органического вещества в бухтах крымского побережья на основе данных оптических измерений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. Вып. 15. С. 168–176. EDN YMTPWB.
26. Ли М. Е., Латушкин А. А., Мартынов О. В. Долговременная изменчивость прозрачности поверхностных вод Черного моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 40–46. EDN YAMOZN. <https://doi.org/10.7868/S207366731803005X>
27. Вертикальное распределение биооптических показателей вод Азово-Черноморского бассейна в апреле – мае 2019 года / Т. В. Ефимова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 571–581. EDN VLCGQN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-5-571-581>
28. Связь пространственной структуры концентрации общего взвешенного вещества и гидрологических параметров в северной части Черного моря по данным контактных измерений / А. А. Латушкин [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 124–137. EDN QFVMZB. <https://doi.org/10.48612/fpg/4heu-kxbn-gg7t>
29. Гидрологическая структура вод и распределение общего взвешенного вещества у берегов Крыма весной 2021 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 6–24. EDN QQXWKS.
30. Stelmakh L., Kovrigina N., Gorbunova T. Phytoplankton Seasonal Dynamics under Conditions of Climate Change and Anthropogenic Pollution in the Western Coastal Waters of the Black Sea (Sevastopol Region) // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 3. 569. 14 p. EDN ZAWIJR. <https://doi.org/10.3390/jmse11030569>
31. Пространственная структура полей мутности и хлорофилла-а у берегов Крыма по данным натурных измерений в июне 2022 года / А. А. Латушкин [и др.] // Современные проблемы оптики естественных вод : Труды XII Всероссийской конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 25–27 октября 2023 года. Т. 13. Санкт-Петербург : Химиздат, 2023. С. 92–96. EDN JXPNMD
32. Крашенинникова С. Б., Бабич С. А. Пространственное распределение концентрации хлорофилла а с учетом гидрологических, гидрохимических и гидрооптических условий Черного моря весной 2021 г. // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского природного заповедника РАН. 2022. № 3. С. 13–22. EDN BNQFDA.
33. Корчемкина Е. Н., Маньковская Е. В. Спектральный коэффициент яркости, цветовые характеристики и относительная прозрачность вод Черного моря весной 2019 и 2021 годов: сравнительная изменчивость и эмпирические связи // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 5–20. EDN HMPHDG.
34. Межгодовая изменчивость физических и биологических характеристик вод Крымского шельфа в летний сезон (2010–2020 годы) / С. А. Пионтковский [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 2. С. 39–59. EDN CUBYXI.

35. 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>
36. Пространственное распределение и сезонная динамика концентрации хлорофилла а в Азовском море по данным спутниковых снимков спектрометра MERIS / В. В. Сапрыгин [и др.] // Океанология. 2018. Т. 58, № 5. С. 751–762. EDN XWVHXF. <https://doi.org/10.1134/s0030157418050131>
37. Vertical hydro-chemical structure of the Black Sea / E. V. Yakushev [et al.] // The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry / Eds. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. Vol. 5Q. P. 277–307. EDN MNPZUJ. https://doi.org/10.1007/698_5_088

Поступила 25.09.2024 г.; одобрена после рецензирования 08.11.2024 г.; принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Артамонов Юрий Владимирович, ведущий научный сотрудник, отдел океанографии, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **SPIN-код: 9350-8966**, **ResearcherID: AAC-6651-2020**, **ORCID ID: 0000-0003-2669-7304**, artam-ant@yandex.ru

Скрипалева Елена Александровна, старший научный сотрудник, отдел океанографии, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 6064-4860**, **ResearcherID: AAC-6648-2020**, **ORCID ID: 0000-0003-1012-515X**, sea-ant@yandex.ru

Латушкин Александр Александрович, старший научный сотрудник, отдел оптики и биофизики моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 1239-2858**, **Researcher ID: U-8871-2019**, **ORCID ID: 0000-0002-3412-7339**, sevsalat@gmail.com

Федирко Александр Викторович, младший научный сотрудник, отдел океанографии, Морской гидрофизический институт (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2496-1715**, **ResearcherID: AAC-6629-2020**, **ORCID ID: 0000-0002-8399-3743**, 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

Латушкин Александр Александрович – подготовка и обслуживание гидрооптического оборудования, получение натурных данных, участие в обсуждении материалов статьи

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.