

## Гидрологическая структура вод и распределение общего взвешенного вещества у берегов Крыма весной 2021 года

Ю. В. Артамонов, Е. А. Скрипалева\*, А. А. Латушкин,  
А. В. Федирко, Д. А. Рябоконт

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

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

### Аннотация

Целью данной работы является анализ гидрологической структуры вод у берегов Крыма весной 2021 г. и оценка ее связи с распределением взвешенного вещества по данным комплексных гидролого-гидрооптических измерений, выполненных в рамках программы экспедиционных исследований МГИ РАН в ходе 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Работы проводились в пределах экономической зоны России между Гераклейским п-овом и м. Опук. Показано, что к югу от Гераклейского и Керченского п-овов, к востоку и югу от м. Меганом Основное Черноморское течение формировало антициклонические круговороты. У юго-западной и юго-восточной границ полигона наблюдались циклонические круговороты и меандры. Выявлено понижение температуры поверхности моря к востоку от м. Меганом и в Феодосийском заливе, связанное с прибрежным апвеллингом. Показано, что в прибрежной северо-восточной части полигона наблюдалось интенсивное распреснение поверхностных вод. Смешение азовоморских вод, поступающих из Керченского пролива, и вод Феодосийского залива привело к формированию языка распресненных вод, распространяющегося на юг от Керченского п-ова. Показано, что распреснение вод в северо-восточной части полигона не сопровождалось повышением концентрации общего взвешенного вещества, в Феодосийском заливе был выявлен ее минимум. Перенос этих прозрачных вод вдоль периферии антициклонического круговорота привел к формированию южнее Керченского п-ова языка вод повышенной прозрачности, совпадающего по положению с языками вод пониженной температуры и солености. Воды максимальной мутности прослеживались на шельфе между м. Аю-Даг и м. Сарыч и к западу от Гераклейского п-ова. Показано, что наибольшее содержание взвешенных веществ наблюдалось либо в пределах верхнего квазиоднородного слоя, либо в слое нижнего сезонного термоклина и пикноклина. Мутность вод глубже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина была ниже, чем в поверхностном слое. Выявлен низкий уровень согласованности горизонтальных полей концентрации общего взвешенного вещества и термохалинных параметров в верхнем 30–40-метровом слое. Глубже уровень согласованности повышался до значимого и более холодные, соленые и плотные воды характеризовались повышенной прозрачностью.

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Латушкин А. А., Федирко А. В.,  
Рябоконт Д. А., 2022



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

**Ключевые слова:** Черное море, циркуляция вод, Основное Черноморское течение, температура, соленость, плотность, верхний квазиоднородный слой, холодный промежуточный слой, термоклин, пикноклин, галоклин, общее взвешенное вещество

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по темам № 0555-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология») и № 0555-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования» (шифр «Океанологические процессы»). Авторы выражают благодарность членам отряда гидрологии и течений С. А. Шутову, Д. В. Дерюшкину и Р. О. Шаповалову за проведение гидрологических измерений в ходе 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий».

**Для цитирования:** 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. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-6-24

## **Hydrological Water Structure and Distribution of Total Suspended Matter off the Coast of Crimea in Spring 2021**

**Yu. V. Artamonov, E. A. Skripaleva\*, A. A. Latushkin,  
A. V. Fedirko, D. A. Ryabokon**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

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

### **Abstract**

The paper analyzes features of the hydrological structure of waters and the distribution of total suspended matter off the coast of Crimea within the economic zone of Russia between the Heraclea Peninsula and Cape Opuk in April–May 2021 according to field measurements carried out during the 116<sup>th</sup> cruise of the R/V *Professor Vodyanitsky*. It is shown that the Rim Current formed anticyclonic eddies to the south of the Heraclea and Kerch Peninsulas, to the east and south of Cape Meganom. Cyclonic eddies and meanders were observed near the southwestern and southeast boundaries of the polygon. A decrease in sea surface temperature east of Cape Meganom and in Feodosiya Bay associated with coastal upwelling was revealed. It is shown that intense freshening of surface waters was observed in the coastal northeastern part of the polygon. The mixing of the Azov Sea waters propagating from the Kerch Strait and the waters of Feodosiya Bay led to the formation of a “tongue” of freshened waters spreading to the south of the Kerch Peninsula. It is shown that water freshening in the northeast part of the polygon was not accompanied by an increase in the total suspended matter concentration, and its minimum was revealed in Feodosiya Bay. The transport of these transparent waters along the periphery of the anticyclonic eddy led to the formation of a “tongue” of waters of increased transparency south of the Kerch Peninsula, which coincides in position with the “tongues” of waters of low temperature and salinity. Waters of maximum turbidity were traced on the shelf between Cape Ayu-Dag and Cape Sarych and to the west of the Heracles Peninsula. It is shown that the highest content of suspended matter was observed either within the upper quasihomogeneous layer or

in the layer of the lower seasonal thermocline and pycnocline. The turbidity deeper than the seasonal thermocline, halocline and pycnocline, was lower than that in the surface layer. A low level of consistency was revealed between the horizontal fields of the total suspended matter concentration and thermohaline parameters in the upper 30–40-meter layer. Deeper, the consistency level increased to a significant level, and colder, saltier, and denser waters were characterized by increased transparency.

**Keywords:** Black Sea, water circulation, Rim Current, temperature, salinity, density, upper quasi-homogeneous layer, cold intermediate layer, thermocline, pycnocline, halocline, total suspended matter

**Acknowledgements:** the work was carried out under FSBSI FRC MHI State Order no. 0555-2021-0003 «Development of operational oceanology methods based on interdisciplinary research of processes of the marine environment formation and evolution and on mathematical modeling using data of remote and contact measurements» («Operational oceanology» code) and no. 0555-2021-0004 «Fundamental studies of oceanological processes which determine the state and evolution of the marine environment influenced by natural and anthropogenic factors, based on observation and modeling methods» («Oceanological processes» code). The authors are grateful to members of the hydrology and currents detachment S.A. Shutov, D.V. Deryushkin and R.O. Shapovalov for carrying out hydrological measurements during cruise 116 of the R/V *Professor Vodyanitsky*.

**For citation:** Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A., Latushkin, A.A., Fedirko, A.V. and Ryabokon, D.A., 2022. Hydrological Water Structure and Distribution of Total Suspended Matter off the Coast of Crimea in Spring 2021. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 6–24. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-6-24

## Введение

В условиях происходящих изменений климата и увеличивающегося антропогенного воздействия на акваторию Черного моря мониторинг состояния морской экосистемы и изучение процессов, определяющих ее эволюцию на различных пространственно-временных масштабах, становятся все более актуальными [1, 2]. Гидрологические процессы в верхнем слое Черного моря являются основными факторами, влияющими на изменения экосистемы и определяющими развитие биопродуктивности вод. Важнейшим экосистемным компонентом, отражающим состояние водной среды, является общее взвешенное вещество (ОВВ). Индикатором содержания ОВВ служит показатель ослабления света (ПОС)<sup>1)</sup> [3–6]. Исследование изменчивости содержания взвешенных частиц и ее связи с особенностями гидрологической структуры вод является важным элементом экологического мониторинга. Развитие методов дистанционного зондирования позволило получить новые данные об изменчивости гидрологической и гидрооптической структуры вод на поверхности моря [7–14]. В то же время информацию о структуре вод в глубинных слоях моря могут дать только контактные методы, в связи с чем Морской гидрофизический институт (МГИ) РАН регулярно проводит экспедиционные исследования в Черном море [15–17]. Проведение инструментальных измерений течений,

---

<sup>1)</sup> Маньковский В. И., Соловьев М. В., Маньковская Е. В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2009. 92 с. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330244483\\_Gidroopticeskie\\_harakteristiki\\_Cernogo\\_mora](https://www.researchgate.net/publication/330244483_Gidroopticeskie_harakteristiki_Cernogo_mora) (дата обращения: 17.11.2022).

квазисинхронных с гидрологическими и гидрооптическими наблюдениями, существенно расширяет возможности интерпретации особенностей термохалинной и гидрооптической структуры вод [18–22].

Целью данной работы является анализ гидрологической структуры вод у берегов Крыма весной 2021 г. и оценка ее связи с распределением взвешенного вещества по данным комплексных гидролого-гидрооптических измерений, выполненных в рамках программы экспедиционных исследований МГИ РАН в ходе 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий».

### Материалы и методика

В работе использовались данные гидрологических и гидрооптических измерений на 99 станциях, выполненных у берегов Крыма в период с 22.04.2021 по 8.05.2021 (рис. 1). На каждой станции измерялись температура, электропроводность и гидростатическое давление в диапазоне глубин от поверхности до 500 м с помощью зондирующего *CTD*-комплекса *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320PlusM*, а также определялись скорость и направление течений в верхнем 200-метровом слое с помощью акустического доплеровского профилографа 300 *kHz* *WORKHORSE ADCP*.

Синхронно с гидрологическими измерениями на каждой станции выполнялись измерения показателя ослабления направленного света, при которых использовался зондирующий спектральный измеритель ПОС – СИПО4, разработанный в отделе оптики и биофизики моря МГИ РАН<sup>2)</sup>. Измерения ПОС

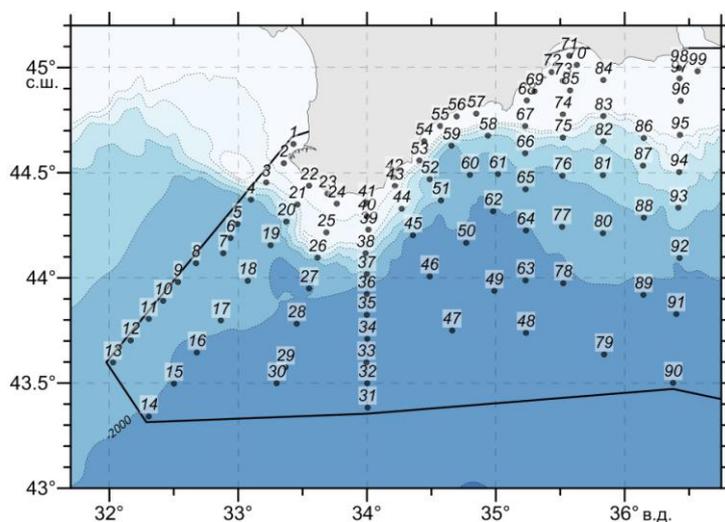


Рис. 1. Схема станций, выполненных у берегов Крыма в 116-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 1. Layout of stations measured near Crimean coasts during the 116<sup>th</sup> cruise of the R/V *Professor Vodyanitsky*

<sup>2)</sup> Способ определения спектрального показателя ослабления направленного света в морской воде *in situ* : пат. 2605640 Рос. Федерация : МПК<sup>7</sup> G 01 N 21/59 / Латушкин А. А., Мартынов О. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБУН «МГИ РАН». № 2014152767/28 ; заявл. 24.12.2014 ; опубл. 27.12.2016, бюл. № 36. 8 с.

проводились в красной области спектра на длине волны 625 нм с вертикальным разрешением 0.1 м от поверхности до предельной глубины, которая в зависимости от времени, отведенного для гидрооптических измерений, и погодных условий изменялась от 50 до 130 м. По измерениям ПОС рассчитывалась концентрация общего взвешенного вещества ( $C_{ОВВ}$ ) на основе эмпирического соотношения  $C_{ОВВ} = 1.514 \cdot \text{ПОС}(625) - 0.23$ . Это соотношение было получено ранее для северной части Черного моря на основе данных измерений ПОС и определения концентрации ОВВ гравиметрическим методом по пробам воды, которые дополнительно отбирались на станциях совместно с измерениями ПОС [23]. Под концентрацией общего взвешенного вещества подразумевалась концентрация всех взвешенных частиц, которые оставались на фильтре.

Для количественной оценки согласованности пространственных распределений  $C_{ОВВ}$  и термохалинных параметров на каждом горизонте с дискретностью 1 м до предельной глубины гидрооптических измерений по совокупности всех станций были сформированы ряды значений  $C_{ОВВ}$ , температуры, солености и плотности, между которыми рассчитывались коэффициенты линейной корреляции  $R$ .

### Основные результаты

**Циркуляция вод.** Распределения динамических высот (рис. 2, *a*), векторов геострофических (рис. 2, *b*) и инструментально измеренных течений (рис. 2, *c–f*) показывают, что в период измерений на полигоне преобладали потоки западного направления, соответствующие Основному Черноморскому течению (ОЧТ).

Максимальные скорости ОЧТ достигали 50–55 см/с по геострофическим расчетам (рис. 2, *b*) и 40–45 см/с по данным инструментальных измерений (рис. 2, *c–f*). Результаты, полученные динамическим методом, несколько отличаются от результатов прямых измерений течений. По геострофическим расчетам можно отметить ослабление скорости ОЧТ (до 25–35 см/с) над свалом глубин между м. Сарыч и м. Ай-Тодор (рис. 2, *b*). По данным инструментальных измерений, в этом районе скорость ОЧТ в поверхностном слое была выше и достигала 35–45 см/с (рис. 2, *c*).

Время выполнения съемки (конец апреля – начало мая) пришлось на начало ослабления скорости ОЧТ в климатическом сезонном цикле [24, 25]. Согласно работам [19, 25–27], в этот период усиливается меандрирование ОЧТ и формируются синоптические круговороты (циклонические слева от стрежня ОЧТ и антициклонические справа). Согласно геострофическим расчетам по данным съемки, у юго-западной границы полигона наблюдался циклонический меандр, над свалом глубин в северо-западной части полигона прослеживалась южная периферия антициклонического меандра (рис. 2, *b*). Геострофические расчеты не позволяют оценить особенности циркуляции в мелководных шельфовых районах, поэтому более полную картину меандров и круговоротов, образуемых ОЧТ, дают данные инструментальных измерений течений. Так, антициклонические круговороты прослеживались над прибрежным шельфом к югу от Гераклеийского п-ова в верхнем 50-метровом слое (рис. 2, *c, d*) и к востоку от м. Меганом на глубинах 10–25 м (рис. 2, *c*). Еще два круговорота были зафиксированы над свалом глубин во всем слое измерений к югу

от м. Меганом и к югу от Керченского п-ова (рис. 2, *c – f*). В поле динамических высот эти круговороты проявились только в виде антициклонического изгиба изодинам (рис. 2, *a*).

У юго-западной границы полигона во всем слое измерений прослеживался циклонический круговорот, наиболее четко выраженный на горизонтах 75–125 м (рис. 2, *e, f*). У юго-восточной границы съемки прослеживался интенсивный циклонический меандр, который на глубинах 25–50 м трансформировался в круговорот (рис. 2, *d*).

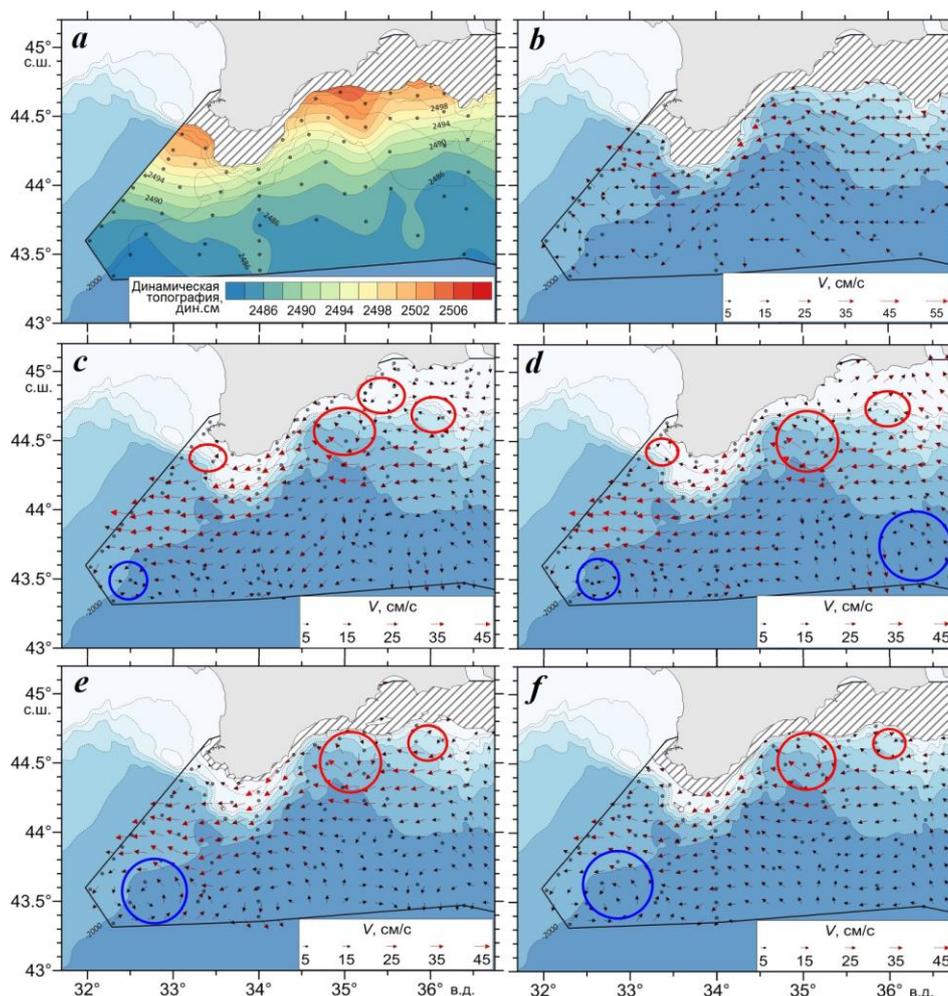
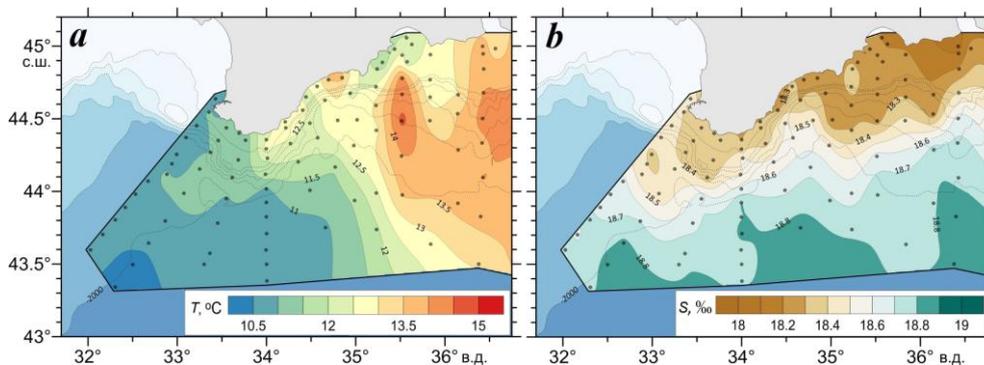


Рис. 2. Динамическая топография относительно отсчетной поверхности 300 дбар (*a*), векторы геострофических течений на горизонте 2 м (*b*), векторы инструментально измеренных течений на горизонтах 10 м (*c*), 50 м (*d*), 75 м (*e*), 100 м (*f*). Красными эллипсами показаны антициклонические вихри, синими – циклонические

Fig. 2. Dynamic topography relative to reference level 300 dbar (*a*), geostrophic current vectors at 2 m horizon (*b*), vectors of instrumentally measured currents at 10 m (*c*), 50 m (*d*), 75 m (*e*), 100 m (*f*) horizons. Ellipses show anticyclonic (red) and cyclonic (blue) eddies

**Термохалинная структура вод.** Распределение температуры на поверхности моря (ТПМ) формировалось в результате интенсивного весеннего прогрева поверхностных вод и особенностей циркуляции вод. Минимум температуры (10–10.5 °С) наблюдался у юго-западной границы полигона в области циклонического круговорота, что связано с подъемом более холодных подповерхностных вод (рис. 3, *a*). В целом температура воды в поверхностном слое в восточной части полигона (примерно к востоку от 34.5° в. д.) была выше (13–15 °С), чем в западной части (10–12 °С) (рис. 3, *a*). С одной стороны, более высокие значения температуры на востоке полигона можно объяснить особенностями циркуляции вод – адвекцией ОЧТ теплых вод вдоль Кавказского и Крымского побережий. Эта адвекция отмечается и на климатическом масштабе по данным спутниковых измерений ТПМ [24]. С другой стороны, повышение значений ТПМ в восточной части полигона может быть связано с более длинным периодом весеннего прогрева поверхностных вод в этом районе, так как измерения проводились по мере продвижения судна с запада на восток. Разница между временем проведения измерений у западной и восточной границ полигона составляла почти полмесяца. В период съемки более теплые воды проникали в западную часть акватории в зоне основной струи ОЧТ, достигая 34° в. д. по положению изотермы 12 °С. Несмотря на более высокую температуру в восточной части полигона, у берега к востоку от м. Меганом и в Феодосийском заливе отмечалось понижение значений ТПМ до 12–12.5 °С (рис. 3, *a*), возможной причиной которого являлся прибрежный апвеллинг, вызванный юго-западным ветром. При этом язык вод пониженной температуры (до 13 °С) распространялся на юг от м. Чауда примерно до 44.5° с. ш. (рис. 3, *a*). Согласно распределению векторов течений, причиной появления такого языка является перенос более холодных вод из Феодосийского залива вдольбереговым потоком вначале в восточном, а затем в южном направлении вдоль периферии антициклонического круговорота (рис. 2, *c*).

Распределение солености на поверхности моря (СПМ) показало, что вдоль всего побережья Крыма над шельфом и свалом глубин располагались распресненные воды с соленостью ниже 18.4 ‰ (рис. 3, *b*). Минимальная соленость (18.1–18.2 ‰) наблюдалась у берегов Керченского п-ова и в восточной части Феодосийского залива. Язык распресненных вод по изохалине 18.25 ‰



Р и с . 3 . Распределения температуры (*a*) и солености (*b*) в поверхностном слое

Fig . 3 . Distribution of temperature (*a*) and salinity (*b*) in the surface layer

распространялся на юг от Керченского п-ова, достигая почти  $44.5^{\circ}$  с. ш. Этот язык сформировался вследствие смешения азовоморских вод, поступающих из Керченского пролива, и вод Феодосийского залива, переносимых в восточном, а затем в южном направлении вдоль периферии антициклонического круговорота (рис. 2, *c*). Далее над свалом глубин эти низкосолёные воды захватывались потоком ОЧТ, и по мере переноса на запад их солёность постепенно повышалась. Тем не менее, судя по конфигурации изохалины 18.5 ‰, керченско-феодосийское распреснение достигало западной границы полигона. Повышение солёности (до 18.7 ‰) наблюдалось в южной части полигона, где преобладала циклоническая направленность потоков. Вследствие подъёма к поверхности более солёных глубинных вод солёность достигала максимальных значений (18.8–18.85 ‰) в зонах циклонических меандров и круговоротов (рис. 3, *b*).

Типичные распределения термохалинных характеристик на вертикальных профилях представлены на рис. 4, *a*. На большинстве станций наблюдался верхний тонкий слой относительно тёплых вод, т. е. верхний квазиоднородный слой (ВКС). Формирование этого слоя было связано с весенним прогревом. Толщина ВКС на акватории составляла 2–17 м в западной части полигона и 2–10 м в восточной (рис. 5, *a*).

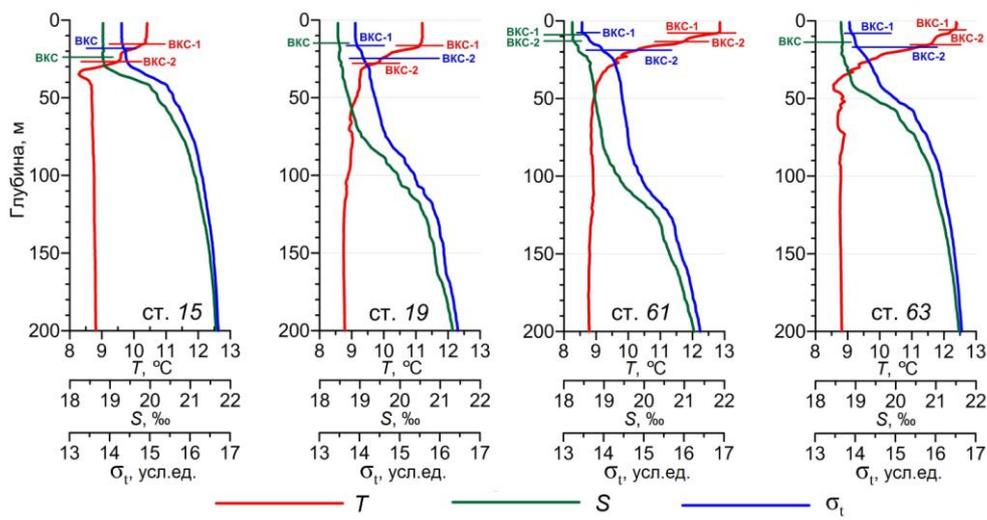
Под верхним ВКС-1 в поле температуры сохранялся второй нижний ВКС-2, который сформировался в предшествующий зимний период (рис. 4, *a*). Глубина залегания нижней границы ВКС-2 изменялась от 18 до 45 м в западной части полигона и от 10 до 30 м в восточной.

В поле условной плотности, как и в поле температуры, ВКС на большинстве станций характеризовался ступенчатой структурой (ст. 19, 61 и 63 на рис. 4, *a*), при этом глубины залегания нижних границ ВКС-1 и ВКС-2 в поле плотности практически совпадали с глубинами нижних границ ВКС-1 и ВКС-2 в поле температуры.

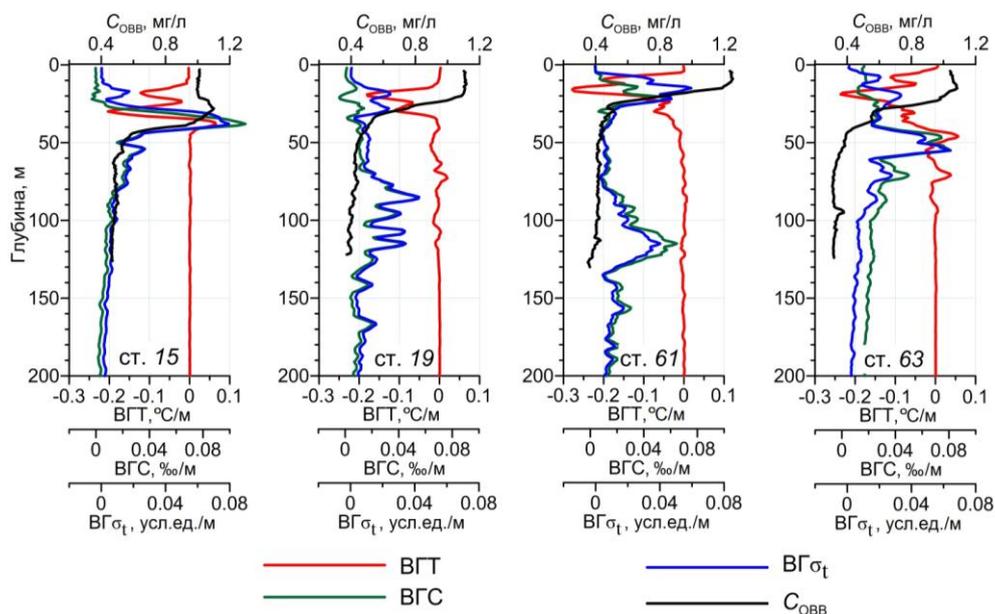
В поле солёности, в отличие от полей температуры и плотности, прослеживался преимущественно один ВКС, двухступенчатая структура наблюдалась только на некоторых станциях (ст. 61 на рис. 4, *a*). Вертикальная мощность ВКС составляла 10–25 м в западной части полигона (ст. 15 и 19 на рис. 4, *a*), в восточной части полигона она уменьшалась до 5–17 м (ст. 61 и 63 на рис. 4, *a*).

Под ВКС располагался слой максимальных вертикальных градиентов температуры (ВГТ), солёности (ВГС) и условной плотности (ВГ $\sigma_t$ ) – сезонные термоклин, галоклин и пикноклин (рис. 4, *b*). Двухслойная структура ВКС в полях температуры и плотности обусловила образование двух максимумов (по абсолютной величине) ВГТ и ВГ $\sigma_t$ , которые фиксировались на большинстве станций (рис. 4, *b*). Верхний максимум ВГТ и ВГ $\sigma_t$  располагался в диапазоне глубин 5–20 м (рис. 4, *b*). Пространственное распределение глубины залегания нижнего максимума ВГТ показало, что в западной части полигона она составляла 21–47 м, а в восточной части заметно уменьшалась и составляла 13–35 м (рис. 5, *b*). В поле солёности наблюдался преимущественно один максимум ВГС, располагающийся в диапазоне глубин 10–30 м (рис. 4, *b*).

Глубже сезонных термоклина, пикноклина и галоклина на профилях ВГТ, ВГС и ВГ $\sigma_t$  хорошо прослеживались холодный промежуточный слой (ХПС), основные пикноклин и галоклин. Положение ядра ХПС характеризуется сменой



*a*



*b*

Р и с . 4. Вертикальные распределения температуры ( $T$ ), солёности ( $S$ ), условной плотности ( $\sigma_t$ ) (*a*), их вертикальных градиентов и концентрации ОВВ (*b*) на отдельных станциях. Нижние границы ступеней ВКС показаны красными отрезками в поле температуры, зелеными – в поле солёности, синими – в поле плотности

Fig. 4. Vertical distributions of temperature ( $T$ ), salinity ( $S$ ), conditional density ( $\sigma_t$ ) (*a*), their vertical gradients and TSM concentration (*b*) at individual stations. Lower boundaries of the upper quasihomogeneous layer (UQHL) steps are shown in the fields of temperature (red line segments), salinity (green line segments), density (blue line segments)

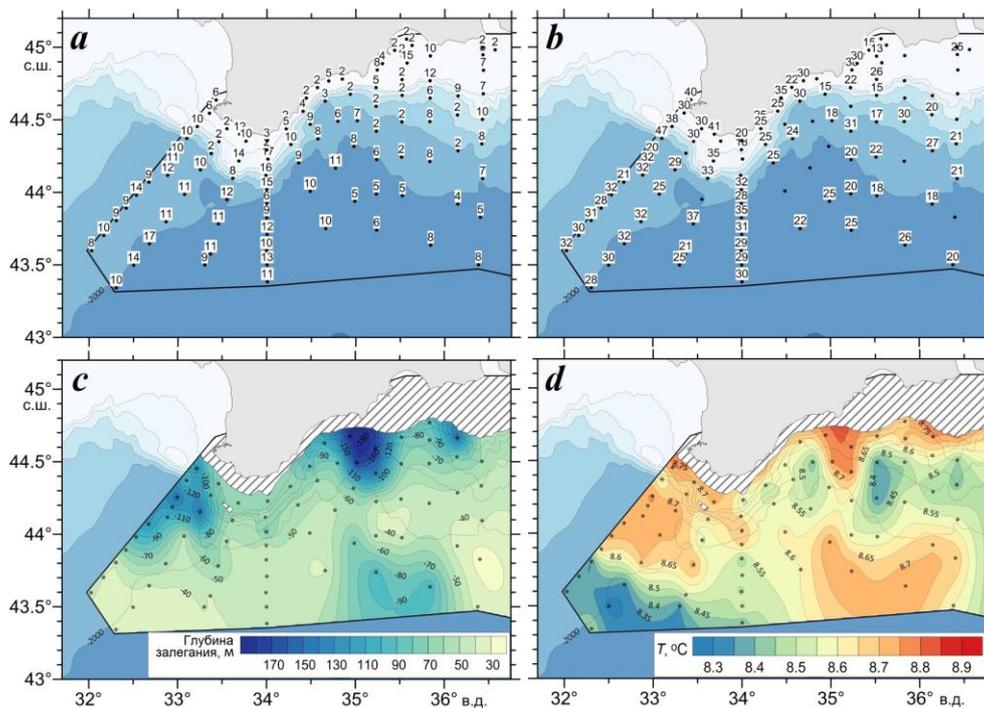
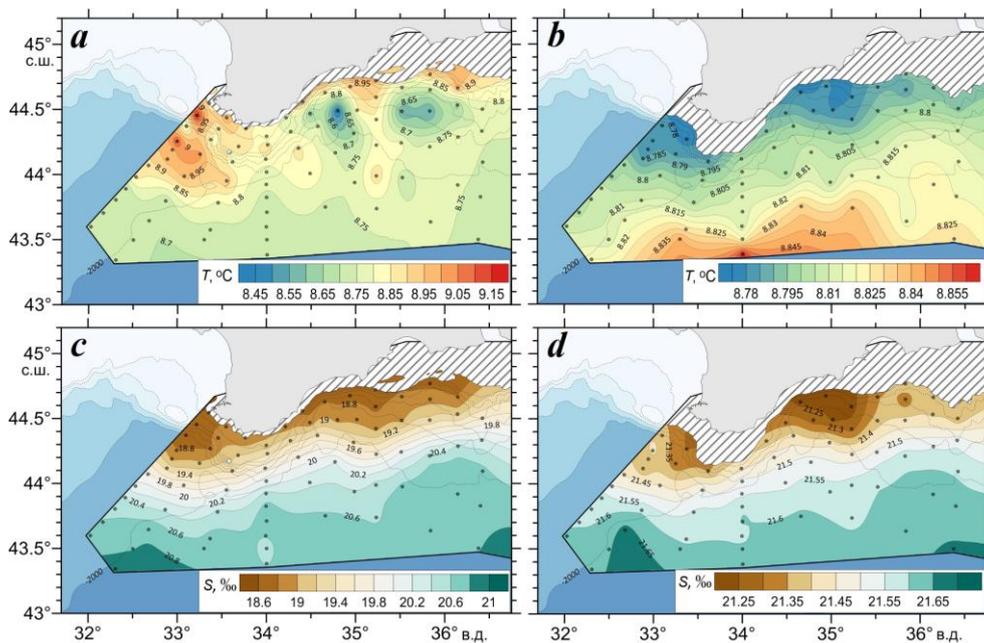


Рис. 5. Распределения глубин залегания (м) нижней границы верхнего ВКС-1 в поле температуры (а), нижнего максимума ВГТ (b), ядра ХПС (с) и распределение температуры в ядре ХПС (d)

Fig. 5. Distributions of occurrence depths (m) of the lower boundary of the upper UQHL-1 in the temperature field (a), lower maximum of the vertical gradient of temperature (VGT) (b), core of the cold intermediate layer (CIL) (c), and temperature distribution in the CIL core (d)

знака значений ВГТ. Основные пикноклин и галоклин прослеживаются на профилях по максимальным положительным значениям ВГС и ВГ $\sigma_t$ . Отметим, что весной 2021 г. в распределении глубин залегания основных пикноклина, галоклина и ядра ХПС хорошо проявились особенности циркуляции вод и синоптические вихревые образования. Так, глубина основных пикноклина и галоклина заметно уменьшалась (до 45–55 м) в южной глубоководной части полигона (ст. 63 на рис. 4, b) и была минимальна (40–45 м) на юго-западе полигона в области циклонического круговорота (ст. 15 на рис. 4, b). Ближе к свалу глубин и в зонах антициклонических меандров и круговоротов она заметно увеличивалась (до 90–125 м) (ст. 19 и 61 на рис. 4, b). Глубина залегания ядра ХПС (рис. 5, c) также была минимальна (35–40 м) в области циклонического круговорота на юго-западе полигона и возрастала до 100–130 м в зонах антициклонических образований, расположенных к югу от Гераклейского п-ова и Керченского п-ова. Максимальное заглубление ядра ХПС (до 150–180 м) прослеживалось в области антициклонического круговорота южнее м. Меганом. Температура в ядре ХПС (рис. 5, d) изменялась от 8.3–8.4 °C в зоне циклонического круговорота на юго-западе полигона до 8.7–8.8 °C в областях антициклонических образований у свала глубин.

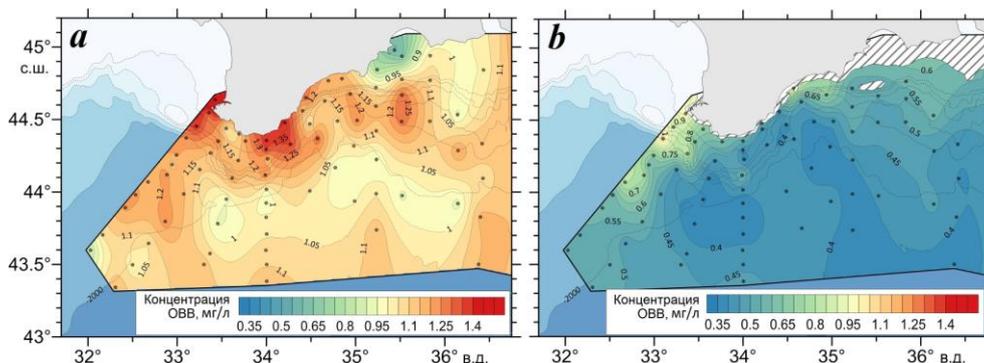


Р и с . 6. Распределения температуры (*a, b*) и солёности (*c, d*) на горизонтах 75 м (*a, c*) и 200 м (*b, d*)

Fig. 6. Distributions of temperature (*a, b*) and salinity (*c, d*) at 75 m (*a, c*) and 200 m (*b, d*) horizons

В целом синоптические круговороты в горизонтальных распределениях температуры выше и ниже ХПС проявлялись по-разному (рис. 6). На глубинах выше ХПС в зонах антициклонических меандров и круговоротов на севере полигона вследствие опускания более теплых поверхностных вод отмечались повышенные значения температуры (рис. 6, *a*). На глубинах ниже ХПС вследствие опускания его вод температура в зонах этих круговоротов была ниже, чем у окружающих вод (рис. 6, *b*). В областях циклонических круговоротов и меандров в южной части полигона вследствие подъема вод наблюдалось понижение температуры выше ХПС (рис. 6, *a*) и ее повышение ниже ХПС (рис. 6, *b*). В поле солёности во всем слое измерений в антициклонических образованиях отмечалось ее понижение, а в циклонических – повышение (рис. 6, *c, d*). Эти особенности проявления вихревых образований в термохалинных полях в зависимости от глубины являются достаточно устойчивыми закономерностями и наблюдались по результатам гидрологических измерений, выполненных ранее [19].

**Распределение концентрации общего взвешенного вещества.** Особенностью распределения концентрации ОВВ на поверхности весной 2021 г. явилось то, что в северо-восточной части полигона интенсивное распределение вод не сопровождалось повышением мутности, в отличие от других съемок [21, 23] и спутниковых наблюдений [11]. Вдоль побережья, от м. Меганом до Керченского пролива, концентрация ОВВ не превышала 1.1 мг/л, а в Феодосийском заливе был выявлен ее минимум (0.55–0.9 мг/л) (рис. 7, *a*). Этот минимум  $C_{ОВВ}$ , как и понижение температуры в этом районе, связан с подъемом



Р и с . 7. Распределения концентрации ОВВ в поверхностном слое (а) и на горизонте 50 м (b)

Fig. 7. Distributions of TSM concentrations in the surface layer (a) and at 50 m horizon (b)

более холодных и прозрачных вод в зоне апвеллинга. Перенос прозрачных вод вдольбереговым потоком вначале в восточном, а затем в южном направлении вдоль периферии антициклонического круговорота (рис. 2, c) привел к появлению южнее Керченского п-ова языка вод повышенной прозрачности. Значения  $C_{ОВВ}$  в нем не превышали 1 мг/л (рис. 7, a). Положение этого языка совпадало с положением языков вод пониженной температуры (рис. 3, a) и солёности (рис. 3, b).

Повышение концентрации ОВВ (до 1.2–1.3 мг/л) наблюдалось в виде отдельных пятен, которые прослеживались в зоне ОЧТ, над свалом глубин и на шельфе. Максимумы концентрации ОВВ (1.35–1.4 мг/л) прослеживались в шельфовой зоне между м. Аю-Даг и м. Сарыч и к западу от Гераклеийского п-ова (рис. 7, a).

Вертикальная структура поля концентрации ОВВ, в отличие от структуры полей температуры и плотности, характеризовалась наличием одного верхнего квазиоднородного слоя ( $ВКС_{ОВВ}$ ). Толщина  $ВКС_{ОВВ}$  превышала толщину верхнего ВКС-1 в полях температуры и плотности и примерно совпадала с толщиной ВКС в поле солёности. Нижняя граница  $ВКС_{ОВВ}$  располагалась в слое верхнего сезонного термоклина и пикноклина и изменялась на полигоне в диапазоне глубин 7–25 м (рис. 4, b). Более развитый  $ВКС_{ОВВ}$  может быть связан с разным временем адаптации полей температуры и плотности и поля концентрации ОВВ к изменениям синоптических условий в период интенсивного весеннего прогрева. Этой же причиной можно объяснить заметные различия в глубине залегания максимума концентрации ОВВ на разных станциях. На одних станциях максимум концентрации ОВВ наблюдался под  $ВКС_{ОВВ}$  в слое нижнего сезонного термоклина и пикноклина (ст. 15 и 63 на рис. 4, b). На других станциях, наоборот, подповерхностный максимум концентрации ОВВ отсутствовал, а наибольшее содержание взвешенных веществ наблюдалось в пределах  $ВКС_{ОВВ}$ , глубже которого в слое нижнего сезонного термоклина и пикноклина происходило резкое понижение концентрации ОВВ (ст. 19 и 61 на рис. 4, b).

В целом на всех станциях глубже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина концентрация ОВВ заметно уменьшалась по сравнению с ее значениями в поверхностном слое. Так, уже на горизонте 50 м (рис. 7, *b*) на большей части полигона значения  $C_{ОВВ}$  не превышали 0.35–0.55 мг/л. При этом вследствие опускания более мутных вод из вышележащих слоев моря в областях антициклонических круговоротов к югу от м. Меганом и Керченского п-ова значения  $C_{ОВВ}$  повышались до 0.6–0.7 мг/л, а к юго-западу от Гераклеяского п-ова – до 0.9–1 мг/л (рис. 7, *b*).

Отметим, что в диапазоне глубин 85–115 м на ряде станций наблюдался еще один относительно слабый максимум концентрации ОВВ (0.33–0.89 мг/л) (ст. 61, 63 на рис. 4, *b*). Аналогичный максимум ОВВ был выявлен по данным весенней съемки 2019 г., в которой глубина гидрооптических измерений достигала 200 м, т. е. глубины сероводородной зоны [22]. Весной 2019 г. этот максимум  $C_{ОВВ}$  располагался под основными пикноклином и галоклином в диапазоне глубин 80–170 м, которому соответствовал слой залегания изопикнических поверхностей 15.9–16.3 усл. ед. Согласно работе [28], этот слой охватывает нижнюю границу субкислородной редокс-зоны и верхний слой сероводородной зоны, верхняя граница которой условно определяется по положению изопикны 16.2 усл. ед. К сожалению, в анализируемой съемке глубина гидрооптических зондирований не превышала 130 м, поэтому на многих станциях максимум концентрации ОВВ в субкислородном и сероводородном слоях зафиксировать не удалось. В целом же наблюдаемое по данным съемок 2019 и 2021 гг. увеличение содержания ОВВ в пограничном слое перехода кислородной зоны в сероводородную отмечалось и ранее в работе<sup>1)</sup>. По мнению авторов этой работы, основной причиной такого повышения мутности является окисление марганца и железа, поступающих в субкислородную зону, и образование взвеси их окислов.

Анализ линейной связи между рядами значений  $C_{ОВВ}$ , температуры, солености и плотности по совокупности всех станций на каждом горизонте с дискретностью 1 м показал, что уровень согласованности горизонтальных распределений  $C_{ОВВ}$  и термохалинных параметров заметно изменяется с глубиной (рис. 8, *a – c*). В верхнем 30–40-метровом слое, который охватывает ВКС в полях температуры, солености и плотности и слой сезонных термоклина, галоклина и пикноклина, выявлен незначимый уровень линейной корреляции (рис. 8). Низкая согласованность горизонтальных полей  $C_{ОВВ}$  и термохалинных параметров в верхнем слое связана с разной скоростью адаптации этих полей к изменениям синоптических условий. Вследствие этого на ряде станций в слое нижнего сезонного термоклина и пикноклина наблюдался максимум ОВВ, а на других станциях в этом слое происходило резкое уменьшение содержания взвешенных веществ.

Глубже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина уровень связи повышался и величины коэффициентов линейной корреляции  $R$  составляли 0.5–0.6, при этом между значениями  $C_{ОВВ}$  и температуры выявлена положительная корреляция (рис. 8, *a*), а между значениями  $C_{ОВВ}$  и солености и плотности – отрицательная (рис. 8, *b, c*). Максимальный уровень линейной корреляции с величинами  $R$ , достигающими 0.67 по абсолютной величине, выявлен между распределениями  $C_{ОВВ}$  и температуры на горизонте 48 м (рис. 8, *d*), между распределениями  $C_{ОВВ}$  и солености и плотности на горизонте 120 м (рис. 8, *e, f*).

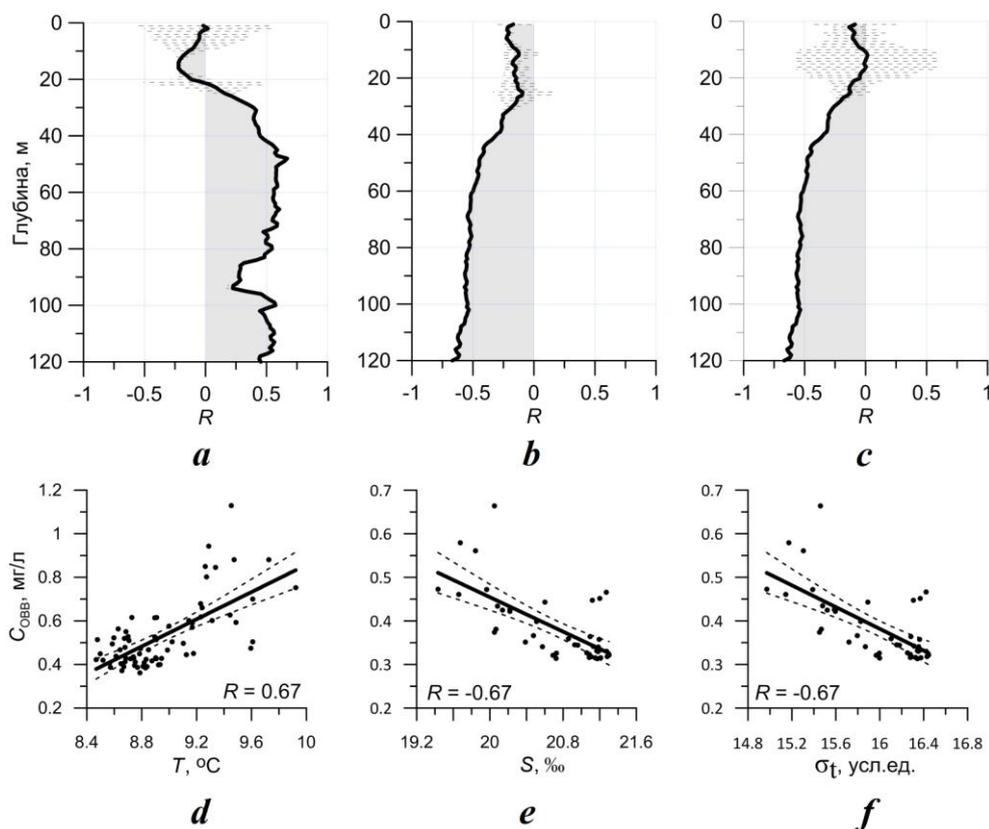


Рис. 8. Вертикальные распределения коэффициентов линейной корреляции  $R$  между значениями  $C_{\text{ОВВ}}$  и значениями температуры (*a*), солёности (*b*) и плотности (*c*) по совокупности всех станций с дискретностью 1 м по глубине; графики линейной корреляции между  $C_{\text{ОВВ}}$  и температурой на горизонте 48 м (*d*), между  $C_{\text{ОВВ}}$  и солёностью (*e*),  $C_{\text{ОВВ}}$  и плотностью (*f*) на горизонте 120 м. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%-ной значимости

Fig. 8. Vertical distributions of linear correlation coefficients  $R$  between  $C_{\text{TSM}}$  values and values of temperature (*a*), salinity (*b*) and density (*c*) on totality of all stations with a depth increment of 1 m (*d*); charts of linear correlation between  $C_{\text{TSM}}$  and salinity (*e*), between  $C_{\text{TSM}}$  and density (*f*) at 120 m horizon. Dashed lines show 95 % confidential intervals

Более высокий, чем в верхнем 40-метровом слое, уровень согласованности горизонтальных распределений ОВВ и термохалинных параметров ниже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина обусловлен уменьшением с глубиной уровня синоптической изменчивости в термохалинных полях [25]. В целом значимый уровень согласованности горизонтальных распределений ОВВ и термохалинных параметров свидетельствует о том, что на этих глубинах более холодные, солёные и плотные воды характеризовались повышенной прозрачностью, а подъем и опускание определенных изоповерхностей в термохалинных полях сопровождалось подобным же поведением изоповерхностей в поле концентрации  $C_{\text{ОВВ}}$ .

## Выводы

По данным гидрологических и гидрооптических измерений, выполненных в ходе 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в апреле – мае 2021 г., показано, что ОЧТ формировало антициклонические круговороты, располагающиеся над прибрежным шельфом к югу от Гераклейского п-ова в верхнем 50-метровом слое, к востоку от м. Меганом на глубинах 10–25 м, над свалом глубин во всем слое измерений к югу от м. Меганом и к югу от Керченского п-ова. У юго-западной границы полигона во всем слое измерений прослеживался циклонический круговорот, наиболее четко выраженный на горизонтах 75–125 м. У юго-восточной границы наблюдался интенсивный циклонический меандр, который на глубинах 25–50 м проявлялся как замкнутый круговорот.

Выявлено, что температура воды в поверхностном слое в восточной части полигона (к востоку от 34.5° в. д.) была выше (13–15 °С), чем в западной (10–12 °С), что связано, с одной стороны, с адвекцией ОЧТ теплых вод вдоль Кавказского и Крымского побережий, с другой – с более длительным весенним прогревом поверхностных вод в этом районе. Понижение ТПМ (до 12–12.5 °С), связанное с прибрежным апвеллингом, отмечалось у берега к востоку от м. Меганом и в Феодосийском заливе. Минимум температуры (10–10.5 °С), обусловленный подъемом более холодных глубинных вод, наблюдался в области циклонического круговорота у юго-западной границы полигона.

Показано, что минимальная соленость (18.1–18.2 ‰) наблюдалась у берегов Керченского п-ова и в восточной части Феодосийского залива, при этом язык распресненных вод по изохалине 18.25 ‰ распространялся на юг от Керченского п-ова. Этот язык сформировался вследствие смешения распресненных азовоморских вод, поступающих из Керченского пролива, и вод Феодосийского залива, переносимых вдоль периферии антициклонического круговорота. Максимальные значения солености (18.8–18.85 ‰) вследствие подъема к поверхности более соленых глубинных вод отмечались в зонах циклонических меандров и круговоротов.

Выявлено, что весной 2021 г. на большинстве станций наблюдался ВКС относительно теплых вод, обусловленный весенним прогревом, под которым сохранялся второй нижний квазиоднородный слой, который сформировался в предшествующий зимний период. В поле условной плотности ВКС на большинстве станций также характеризовался двухступенчатой структурой. В поле солености, в отличие от полей температуры и плотности, прослеживался преимущественно один ВКС. Двухслойная структура ВКС обусловила образование двух максимумов (по абсолютной величине) вертикальных градиентов температуры и плотности.

Показано, что особенности циркуляции вод хорошо проявлялись в распределении глубин залегания основных пикноклина, галоклина и ядра ХПС. Глубина основных пикноклина и галоклина заметно уменьшалась (до 45–55 м) в южной глубоководной части полигона и была минимальна (40–45 м) на юго-западе полигона в области циклонического круговорота. Ближе к свалу глубин и в зонах антициклонических меандров и круговоротов она заметно увеличивалась (до 90–125 м). Глубина залегания ядра ХПС также была минимальна (35–40 м) в области циклонического круговорота на юго-западе полигона и возрастала до 100–130 м в зонах антициклонических образований

к югу от Гераклеяского и Керченского п-овов. Максимальное заглублиение ядра ХПС (до 150–180 м) прослеживалось в области антициклонического круговорота южнее м. Меганом.

Показано, что весной 2021 г. интенсивное распределение вод в северо-восточной части полигона не сопровождалось, как обычно, повышением концентрации ОВВ. В Феодосийском заливе был выявлен минимум концентрации ОВВ (0.55–0.9 мг/л), а южнее Керченского п-ова – язык вод повышенной прозрачности, совпадающий по положению с языками вод пониженной температуры и солености. Повышение концентрации ОВВ (до 1.2–1.3 мг/л) наблюдалось в виде отдельных пятен в зоне ОЧТ, над свалом глубин и на шельфе, а ее максимумы (1.35–1.4 мг/л) прослеживались на шельфе между м. Аю-Даг и м. Сарыч и к западу от Гераклеяского п-ова.

Вертикальная структура поля ОВВ характеризовалась наличием одного ВКС, нижняя граница которого располагалась в слое верхнего сезонного термоклина и пикноклина. Наибольшее содержание взвешенных веществ наблюдалось либо в верхнем слое, совпадающем по толщине с ВКС в термохалинных полях, либо в слое нижнего сезонного термоклина и пикноклина. В целом глубже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина концентрация ОВВ заметно уменьшалась по сравнению с ее значениями в поверхностном слое. В областях антициклонических круговоротов на этих глубинах наблюдалось повышение концентрации ОВВ, обусловленное опусканием более мутных вод из вышележащих слоев моря.

Выявлено, что уровень согласованности горизонтальных распределений концентрации ОВВ и термохалинных параметров заметно изменялся с глубиной. В верхнем 30–40-метровом слое выявлена низкая согласованность горизонтальных полей  $C_{ОВВ}$  и термохалинных параметров. Глубже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина уровень связи между  $C_{ОВВ}$  и термохалинными параметрами повышался до значимого. Значения коэффициентов линейной корреляции  $R$  составляли 0.5–0.6, при этом между значениями  $C_{ОВВ}$  и температуры выявлена положительная корреляция, а между значениями  $C_{ОВВ}$  и солености и плотности – отрицательная, т. е. более холодные, соленые и плотные воды характеризовались повышенной прозрачностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-103-115
2. Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Антропогенная экология океана. М. : Флинта; Наука, 2009. 529 с. EDN QKSULT. URL: [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_18073](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_18073) (дата обращения: 17.11.2022).
3. Eisma D. Suspended matter in the aquatic environment. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1993. 315 p. doi: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. 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.

6. 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. doi:10.15372/AOO20170904
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A. Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data (1982–2000) // Journal of Marine Systems. 2004. Vol. 52, iss. 1–4. P. 33–50. doi:10.1016/j.jmarsys.2004.05.002
8. 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. doi:10.1016/j.rse.2010.07.013
9. 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. Севастополь : МГИ, 2014. Вып. 29. С. 5–9. EDN UXWYMX.
10. Кубряков А. А., Станичный С. В. Синоптические вихри в Черном море по данным спутниковой альтиметрии // Океанология. 2015. Т. 55, № 1. С. 65–77. EDN TGWBIX. doi:10.7868/S0030157415010104
11. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алескерова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 53–64. EDN YLLPXN. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-53-64
12. 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 ZABVAX. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-1-171-180
13. An empirical algorithm to seamlessly retrieve the concentration of suspended particulate matter from water color across ocean to turbid river mouths / X. Yu [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 235. 111491. doi:10.1016/j.rse.2019.111491
14. 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. doi:10.22449/0233-7584-2021-5-610-622
15. Проявление сезонной и синоптической изменчивости в гидрологической структуре вод северной части Черного моря / А. В. Федирко [и др.] // Итоги экспедиционных исследований в 2018 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген : материалы конференции, Москва, 18–19 февраля 2019 г. Севастополь : ФГБУН ИМБИ, 2019. С. 174–175. doi:10.21072/978-5-6042938-1-2
16. Циркуляция и термохалинная структура вод северной части Черного моря по данным гидрологических измерений в 2019 г. (106, 108, 110, 111-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») / А. В. Федирко [и др.] // Итоги экспедиционных исследований в 2019 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген : материалы конференции, Москва, 26–27 февраля 2020 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ, 2020. С. 206–212. doi:10.21072/978-5-6044865-0-4
17. Экспериментальные исследования изменчивости океанологических полей Черного и Азовского морей в 2020 году / С. К. Коновалов [и др.] // Итоги экспедиционных исследований в 2020 г. в Мировом океане и внутренних водах : тезисы докладов всероссийской научной конференции, Москва, 24–26 февраля 2021 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2021. С. 131–133. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/ekspeditsionnye\\_issledovaniya-2021.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/ekspeditsionnye_issledovaniya-2021.pdf) (дата обращения: 18.11.2022).

18. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Холодный промежуточный слой Черного моря по данным экспедиционных исследований 2016–2019 годов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 5–16. EDN RALEUS. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-5-16
19. Циркуляция вод в северной части Черного моря летом – зимой 2018 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 69–90. EDN CИHJZC. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-69-90
20. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Пространственные характеристики холодного промежуточного слоя Черного моря летом 2017 года // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 436–446. EDN BCSYUB. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-436-446
21. Spatial features of the hydro-optical waters structure in the northern part of the Black Sea in spring 2019 according to contact measurements on R/V Professor Vodyanitsky / A. A. Latushkin [et al.] // Proceedings of SPIE. Moscow : SPIE, 2020. Vol. 11560 : 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 115602R. doi:10.1117/12.2574281
22. Features of relationship between the biooptical parameters' distributions and hydrological water structure in the northern Black Sea in winter 2020 / A. A. Latushkin [et al.] // Proceedings of SPIE. SPIE, 2021. Vol. 11916 : 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 119163J. doi:10.1117/12.2603317
23. Комплексные исследования Черного моря в 101-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» / А. А. Ключиткин [и др.] // Океанология. 2019. Т. 59, № 2. С. 315–318. EDN ZKXFXF. doi:10.31857/S0030-1574592315-318
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. doi:10.1117/12.2540803
25. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
26. 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. doi:10.1016/S0924-7963(01)00050-1
27. 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. EDN YWNTQU. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-20-28
28. Vertical hydrochemical structure of the Black Sea / E. V. Yakushev [et al.] // The Black Sea Environment / Eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007. P. 277–307. (The Handbook of Environmental Chemistry ; vol. 5Q). doi:10.1007/698\_5\_088

Поступила 26.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 5.06.2022 г.; принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

*Об авторах:*

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

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

**Латушкин Александр Александрович**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-3412-7339**, *sevsalat@gmail.com*

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

**Рябокоть Данил Андреевич**, ведущий инженер-исследователь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **SPIN-код: 3729-4228**, *akronis\_white@mail.ru*

*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** – разработка методик и проведение экспериментальных исследований, качественный анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы

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

**Рябокоть Данил Андреевич** – разработка методик и проведение экспериментальных исследований, обсуждение результатов работы

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*