

УДК 551.463.5

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

Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

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

СВЯЗЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБЩЕГО ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Статья поступила в редакцию 14.01.2022, после доработки 20.04.2022, принята в печать 26.04.2022

Аннотация

По данным гидрооптических съемок, выполненных в северной части Черного моря по одной и той же сетке в период с 2016 по 2020 гг., уточнены особенности горизонтальной и вертикальной структуры поля общего взвешенного вещества и оценена их связь с распределениями полей температуры воды, солёности и плотности. Показано, что основными источниками повышенной концентрации общего взвешенного вещества в поверхностном слое северной части Черного моря являются низкосолёные и мутные воды, поступающие из Керченского пролива, воды стоков Риони, Ингури и других рек на востоке акватории и распресненные воды Днепра, Днестра и Дуная, проникающие на акваторию съемок с северо-западного шельфа. В глубоководной части моря могут проследиваться локальные области мутных вод, возникновение которых связано с особенностями вертикальной циркуляции в зонах циклонических круговоротов и меандров Основного Черноморского Течения. Вертикальная структура концентрации общего взвешенного вещества характеризовалась верхним квазиоднородным слоем, обычно совпадающим по толщине с верхним квазиоднородным слоем в полях термохалинных параметров. В пределах этого слоя между значениями концентрации общего взвешенного вещества и значениями температуры и солёности наблюдалась значимая линейная отрицательная корреляция и значениями плотности — положительная. Глубже, в слое сезонных термоклина и пикноклина, прослеживался подповерхностный максимум концентрации общего взвешенного вещества. В областях, где наблюдался максимальный вертикальный градиент температуры, толщина слоя повышенной мутности уменьшалась почти на порядок по сравнению с районами, где градиент температуры был слабо выражен. Ниже ядра холодного промежуточного слоя в слое основных термоклина, галоклина и пикноклина прослеживался промежуточный минимум концентрации общего взвешенного вещества. Под этим минимумом располагался еще один слой повышенных значений концентрации общего взвешенного вещества, глубина которого совпадала с глубиной верхней границы сероводородной зоны.

Ключевые слова: общее взвешенное вещество, Черное море, Основное Черноморское Течение, температура воды, солёность, плотность, циркуляция, верхний квазиоднородный слой, термоклин, пикноклин, галоклин

© А. А. Latushkin, Yu. V. Artamonov*, E. A. Skripaleva, A. V. Fedirko, 2022

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

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

THE RELATIONSHIP OF THE SPATIAL STRUCTURE OF THE TOTAL SUSPENDED MATTER CONCENTRATION AND HYDROLOGICAL PARAMETERS IN THE NORTHERN BLACK SEA ACCORDING TO CONTACT MEASUREMENTS

Received 14.01.2022, Revised 20.04.2022, Accepted 26.04.2022

Abstract

Here we describe the features of the horizontal and vertical distribution of total suspended matter in the northern part of the Black Sea and their relationships with the water temperature, salinity, and density fields measured at the identical grid during hydro-optical surveys from 2016 to 2020. The results show that the primary sources of increased total suspended matter concen-

Ссылка для цитирования: Латушкин А.А., Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Федирко А.В. Связь пространственной структуры концентрации общего взвешенного вещества и гидрологических параметров в северной части Черного моря по данным контактных измерений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 124–137. doi:10.48612/fpg/4heu-kxbn-gg7t

For citation: Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A., Fedirko A.V. The Relationship of the Spatial Structure of the Total Suspended Matter Concentration and Hydrological Parameters in the Northern Black Sea According to Contact Measurements. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 2, 124–137. doi:10.48612/fpg/4heu-kxbn-gg7t

trations in the northern part of the Black Sea are low-salinity and turbid waters of the Kerch Strait; runoffs of the Rioni, Enguri, and other rivers in the east of the survey area; together with freshened waters of the Dnieper, Dniester, and Danube runoff from the northwestern shelf. Higher turbidity was observed in the deep-water part of the sea, associated with the cyclonic gyres and meanders of the Rim Current effects. The total suspended matter vertical structure features an upper mixed layer, which usually coincides in thickness with the upper thermohaline upper mixed layer. Significant negative correlations were found for this layer comparing total suspended matter concentration versus temperature and salinity, while the correlation appears positive with density values. Below, a total suspended matter subsurface maximum was observed in the seasonal thermocline and pycnocline layer. The high turbidity layer appeared almost an order of magnitude thinner in the regions of maximum temperature gradients versus the areas where the temperature gradient was weak. A local total suspended matter minimum occurred below the cold intermediate core, corresponding to the main thermocline, halocline, and pycnocline layer. Beneath this minimum, there was a local increase of total suspended matter coinciding with the upper boundary of the hydrogen sulfide zone.

Keywords: total suspended matter, Black Sea, Rim Current, water temperature, salinity, density, circulation, upper mixed layer, thermocline, pycnocline, halocline

1. Введение

Интенсивное освоение шельфа, быстрый рост приморских городов, курортных объектов и массовая застройка побережья приводят к значительному усилению антропогенного воздействия на экосистему Черного моря [1–3]. Вместе с речным стоком в море попадают различные промышленные, сельскохозяйственные и бытовые загрязняющие вещества. В связи с этим возрастает актуальность оценки экологического состояния вод Черного моря, которое в значительной степени отражается в их гидрооптической структуре. Важную роль в формировании последней играет взвешенное вещество [4–6], индикатором содержания которого является показатель ослабления света (ПОС) [7–12].

В настоящее время в вертикальном распределении ПОС в глубоководной части моря выделяют четыре основных слоя: поверхностный, промежуточный, пограничный и глубинный [7, 12]. Поверхностный слой располагается в фотической зоне моря, нижняя граница которого в среднем колеблется в пределах 40–70 м. В летний период этот слой характеризуется наличием нескольких максимумов ПОС, при этом основные максимумы наблюдаются в сезонном термоклине и в верхней части основного галоклина [7]. В шельфовой части моря в вертикальном распределении наблюдается обычно один максимум ПОС [12]. В зимний период вследствие отсутствия сезонного термоклина в поверхностном слое глубоководной части моря наблюдается один максимум ПОС, а в шельфовой зоне распределение ПОС однородно по вертикали [7, 12].

Промежуточный слой отличается высокой прозрачностью вод и располагается на глубинах 50–150 м. Толщина его летом не превышает 30 м, зимой может увеличиваться до 80 м. Считается, что высокая прозрачность воды в этом слое связана с отсутствием здесь условий для накопления органической взвеси [7, 12]. Глубже, в области перехода кислородной зоны в сероводородную (субкислородная редокс-зона [13]), было обнаружено увеличение мутности, связанное с высоким содержанием взвешенных частиц, из которых 93 % приходится на неорганическую взвесь, а 7 % на органическую [7, 14–18]. В глубинном слое, который начинается с верхней границы сероводородной зоны, вертикальное распределение ПОС характеризуется монотонным возрастанием с глубиной в коротковолновом (фиолетовом) участке спектра, а в длинноволновом (красном) участке величина ПОС остается постоянной на всех глубинах [14–20]. Согласно [20] это может быть связано с тем, что в коротковолновой части спектра происходит интенсивное поглощение света желтым веществом, входящим в состав растворенных органических соединений, при этом поглощение света желтым веществом резко убывает с увеличением длины волны и в длинноволновой области видимого спектра практически не влияет на величину ПОС.

Исследования особенностей горизонтального распределения прозрачности показали, что в поверхностном слое наиболее мутные воды наблюдались на северо-западном шельфе, что связано с интенсивным речным стоком [7, 9–12, 21, 22]. В горизонтальных полях гидрооптических параметров выявлена синоптическая изменчивость в виде чередования областей более прозрачных и более мутных вод, при этом масштабы синоптических образований составляют 10–100 км [12, 22].

Полученные общие представления об изменчивости гидрооптической структуры Черного моря, особенно в его глубоководной части, базируются на данных эпизодических измерений в разных акваториях, в различные сезоны и годы, что затрудняет выявление закономерностей изменчивости гидрооптических полей на различных пространственно-временных масштабах. Кроме того, для интерпретации распределений гидрооптических параметров необходимы квазисинхронные измерения термохалинных характеристик и инструментальные измерения течений. Такие измерения регулярно начали проводиться с 2016 г. в северной части Черного моря на НИС «Профессор Водяницкий». Некоторые результаты этих исследований для отдельных

съемок отражены в работах [23–28]. В данной работе на основе обобщения всех измерений, выполненных в период с 2016 по 2020 гг., анализируется связь пространственной структуры концентрации общего взвешенного вещества ($C_{ОВВ}$) с распределениями гидрологических параметров и циркуляцией вод. Отметим, что под концентрацией общего взвешенного вещества в работе понимается концентрация всех взвешенных частиц, которые остаются на фильтре при использовании того или иного способа фильтрации.

2. Материалы и методы

Гидрооптические и гидрологические исследования проводились на НИС «Профессор Водяницкий» по единой схеме станций в северной части Черного моря от м. Тарханкут до границы с Абхазией. За период 2016–2020 гг. в различные сезоны были выполнены десять крупномасштабных съемок (табл. 1). Следует отметить, что неблагоприятные погодные условия и закрытие некоторых районов для работ не всегда позволяли выполнять съемки в полной мере по запланированной схеме.

При проведении гидрооптических измерений использовался зондирующий спектральный измеритель показателя ослабления направленного света СИПО 4 [29], разработанный в отделе оптики и биофизики моря Морского гидрофизического института РАН. Измерения ПОС проводились в красной области спектра на длине волны 625 нм с вертикальным разрешением 0,1 м от поверхности до предельной глубины измерений, которая в разных рейсах в зависимости от времени, отведенного для гидрооптических измерений, и погодных условий изменялась от 50 до 200 м. Концентрация общего взвешенного вещества (ОВВ) рассчитывалась на основе эмпирического соотношения $C_{ОВВ} = 1,514 \times \text{ПОС}(625) - 0,23$, полученного ранее для северной части Черного моря на основе массивов данных измерений ПОС и определения концентрации ОВВ гравиметрическим методом по пробам воды, которые дополнительно отбирались на станциях совместно с измерениями ПОС [28]. Гидрологические измерения выполнялись зондирующим CTD комплексом Sea-Bird 911 plus, скорость и направление течений измерялись профилографом течений ADCP WORKHORSE-300 kHz.

Для оценки согласованности пространственных распределений $C_{ОВВ}$ и термохалинных параметров и ее изменения с глубиной на каждом горизонте с дискретностью 1 м по совокупности всех станций были рассчитаны коэффициенты линейной корреляции между значениями $C_{ОВВ}$ на каждой станции и значениями температуры, солености и плотности. Кроме того, оценивалась линейная корреляция между глубинами залегания максимумов $C_{ОВВ}$ и различных изоповерхностей в термохалинных полях (нижней границы верхнего квазиоднородного слоя, слоя скачка, холодного промежуточного слоя, границ редокс-зоны, верхней границы сероводородной зоны, определяемой по положению изопикны 16,2 усл. ед.).

3. Результаты

Анализ горизонтальных распределений $C_{ОВВ}$ в поверхностном слое позволил выявить некоторые общие закономерности, которые можно объяснить особенностями гидрологической структуры вод. В пределах полигонов выделяются несколько областей с экстремальными значениями $C_{ОВВ}$, появление которых связано с наличием очагов формирования различных водных масс. Практически во всех съемках, вне зависимости от

Таблица 1

Table 1

Рейсы НИС «Профессор Водяницкий», в которых проводились измерения ПОС

Cruises of the R/V *Professor Vodyanitsky*, in which measurements of the light beam attenuation coefficient were carried out

Рейс, №	Дата	Количество станций
87	30.06–20.07.2016	106
89	16.11–05.12.2016	112
94	22.04–06.05.2017	104
95	14.06–04.07.2017	113
98	14.11–28.11.2017	90
101	14–27.12.2017	62
102	09.06–01.07.2018	122
103	28.08–20.09.2018	147
106	18.04–13.05.2019	142
115	27.11–16.12.2020	76
Общее количество станций, на которых выполнялись измерения ПОС — 1102		

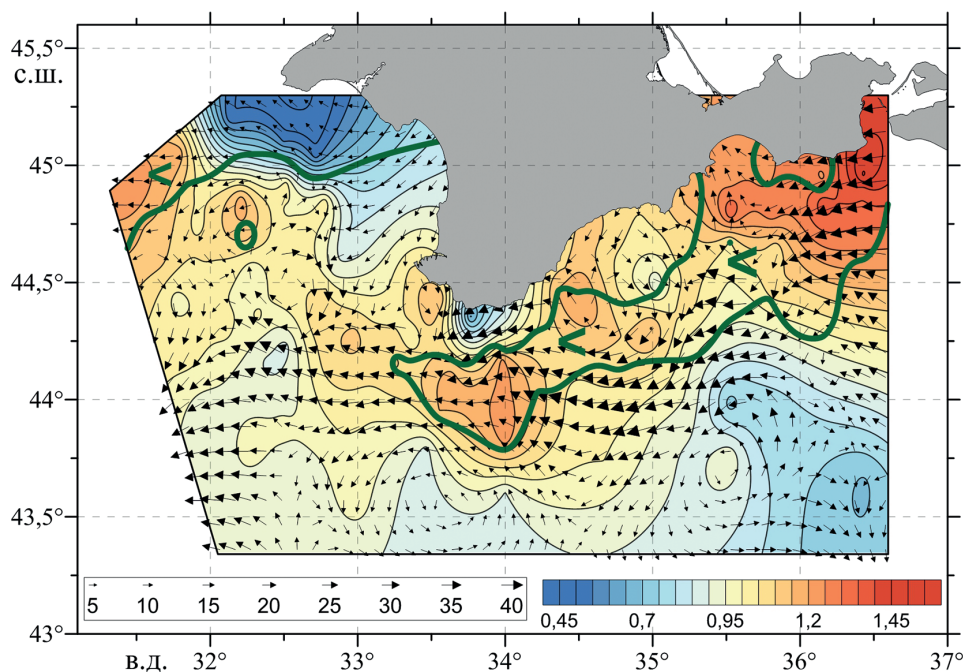


Рис. 1. Распределения концентрации ОБВ (мг/л) в поверхностном слое и векторов инструментально измеренных течений (см/с) на горизонте 25 м в период летней съемки 2017 г. Зеленым цветом показано положение изохалины 18,1 ‰.

Fig. 1. Distributions of TSM concentration (mg/l) in the surface layer and vectors of instrumentally measured currents (cm/s) at horizon of 25 m during the summer 2017 survey. The position of the 18.1 ‰ isohaline is shown in green

года и сезона, к югу от Керченского пролива и Керченского полуострова наблюдалась область повышенных значений $C_{\text{ОВВ}}$, образование которой связано с выносом более мутных и распресненных азовоморских вод через Керченский пролив. На примере распределения концентрации ОБВ по данным летней съемки 2017 г. (рис. 1) видно, что область повышенных значений $C_{\text{ОВВ}}$ вытягивалась вдоль обширной зоны распреснения с соленостью ниже 18,1 ‰, образуемой азовоморскими водами. Эти воды, согласно данным инструментальных измерений течений, переносятся Основным Черноморским Течением (ОЧТ) в западном направлении вдоль берегов Крыма. Вынос азовоморских вод с повышенной концентрацией ОБВ и пониженной соленостью из Керченского пролива и их распространение на запад хорошо отражается в распределениях концентрации взвешенных веществ и термохалинных параметров, полученных по данным сканеров MODIS/Aqua [30] и по данным климатического массива гидрологических измерений БОД МГИ [31].

Еще одна область высоких значений $C_{\text{ОВВ}}$ наблюдалась в восточной части Черного моря вдоль берегов Кавказа. Она формировалась в результате переноса вдольбереговым потоком ОЧТ на северо-запад мутных и распресненных вод стоков Риони, Ингури и других более мелких рек, таких, как Нечепсухо, Аше, Шахе, Сочи, Мзымта (рис. 2). Под влиянием особенностей циркуляции вод пятна высоких значений $C_{\text{ОВВ}}$ иногда прослеживались не только вблизи Кавказского побережья, но и в открытом море. Так, по данным осенней съемки 28.08–18.09.2018 г. в открытой части полигона примерно между 36° и 37° в.д., 43,5° и 44,5° с.ш. наблюдалось обширное пятно повышенных значений $C_{\text{ОВВ}}$ (рис. 2). Согласно инструментальным измерениям течений это пятно располагалось на северо-западной периферии крупномасштабного Восточного циклонического круговорота и сформировалось в результате выноса ветвью ОЧТ более мутных вод от берегов Кавказа в открытое море.

По данным летней съемки в период 09.06–01.07.2018 г. в районе Туапсе наблюдался максимум концентрации ОБВ, связанный с наличием здесь локального источника распресненных и мутных вод (рис. 3). Распространение этих вод происходило не вдоль Кавказского побережья, а от берега в глубоководную часть (рис. 3). Это объясняется тем, что в восточной части полигона по данным инструментальных измерений наблюдалось ослабление скорости вдольберегового потока ОЧТ. В то же время между Новороссийском и Туапсе прослеживался антициклонический вихрь, вдоль восточной периферии которого происходил вынос распресненных и более мутных вод в открытую глубоководную часть полигона (рис. 3).

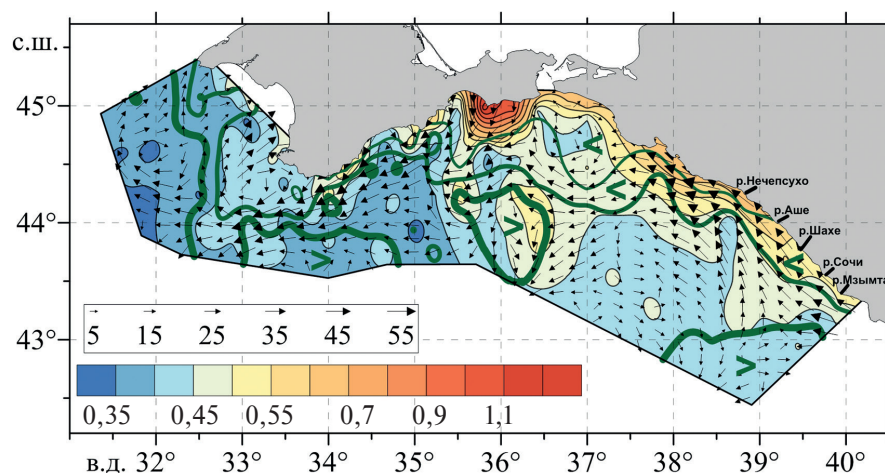


Рис. 2. Распределения концентрации общего взвешенного вещества (мг/л) в поверхностном слое и векторов инструментально измеренных течений (см/с) на горизонте 25 м в период осенней съемки 2018 г. Зеленым цветом показано положение изохалин 17,85 ‰ (тонкая линия), 18,05 ‰ (средняя линия), 18,25 ‰ (толстая линия)

Fig. 2. Distributions of TSM concentration (mg/l) in the surface layer and vectors of instrumentally measured currents (cm/s) at horizon of 25 m during the autumn 2018 survey. Green color shows the position of isochalines 17.85 ‰ (thin line), 18.05 ‰ (middle line), 18.25 ‰ (thick line)

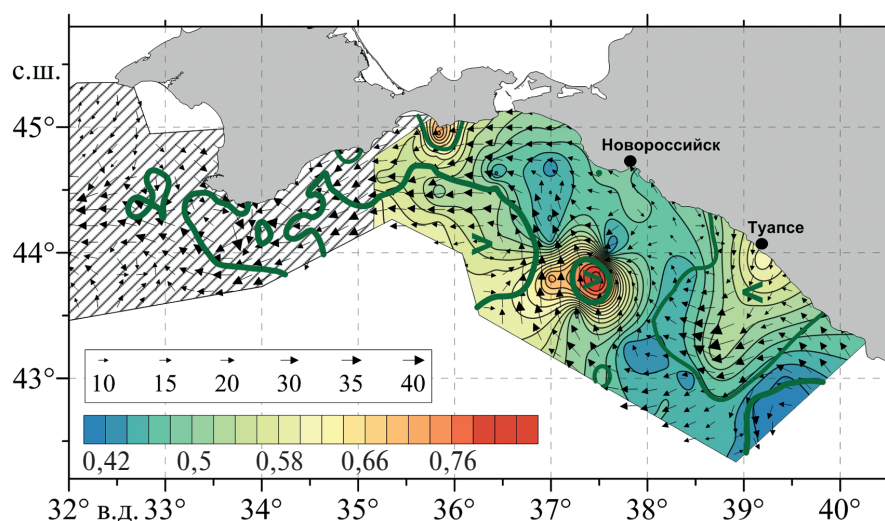


Рис. 3. Распределения концентрации ОБВ (мг/л) в поверхностном слое и векторов инструментально измеренных течений (см/с) на горизонте 25 м в период летней съемки 2018 г. Зеленым цветом показано положение изохалин 17,9 ‰ (тонкая линия) и 18,15 ‰ (толстая линия). Заштрихована область, в которой гидрооптические измерения не проводились

Fig. 3. Distributions of TSM concentration (mg/l) in the surface layer and vectors of instrumentally measured currents (cm/s) at horizon of 25 m during the summer 2018 survey. The positions of isochalines 17.9 ‰ (thin line) and 18.15 ‰ (thick line) are shown in green. The area where hydrooptical measurements were not taken is shaded

В северо-западной части полигонов в периоды весенне-летних съемок прослеживалась еще одна область повышенных значений $C_{ОВВ}$ (рис. 1; рис 4, а). В этой области, как правило, наблюдались воды пониженной солености, которые проникали на акваторию съемок из района северо-западного шельфа (рис. 1; рис 4, а). Шельфовые воды характеризуются максимальной мутностью и минимальной соленостью, обусловленной выносом вод рек Днепр, Южный Буг, Днестр и Дунай [7, 9–12, 21, 22].

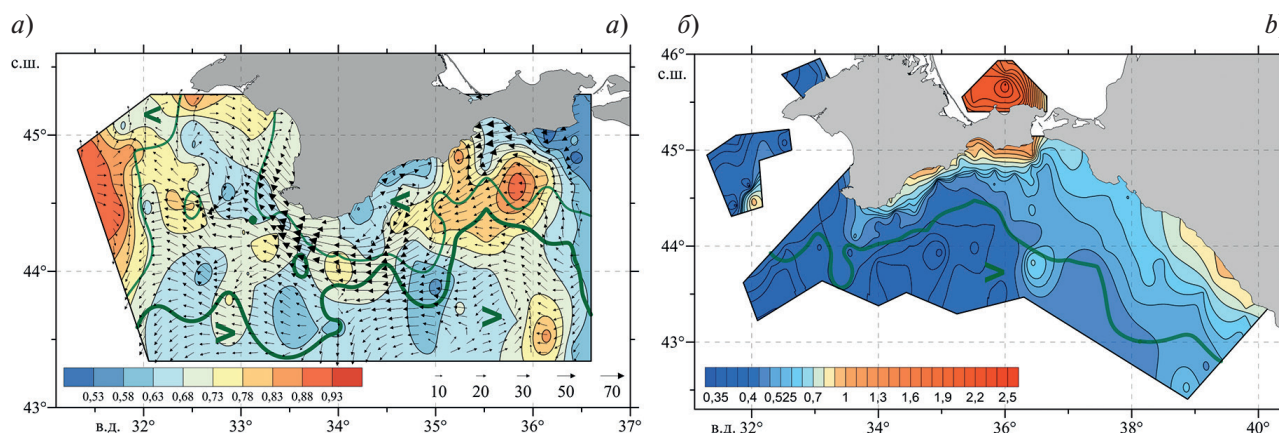


Рис. 4. Распределения концентрации ОБВ (мг/л) в поверхностном слое и векторов инструментально измеренных течений (см/с) на горизонте 25 м в период летней съемки 2016 г. (а) и концентрации ОБВ в период весенней съемки 2019 г. (б). Зеленым цветом показано положение изохалин 17,9‰ (тонкая линия) и 18,15‰ (толстая линия) (а), 18,45‰ (толстая линия) (б)

Fig. 4. Distributions of TSM concentration (mg/l) in the surface layer and vectors of instrumentally measured currents (cm/s) at horizon of 25 m during the summer 2016 survey (a) and TSM concentration during spring 2019 survey (b). Green color shows the position of isochalines 17,9‰ (thin line) and 18,15‰ (thick line) (a), 18,45‰ (thick line) (b)

Помимо вышеперечисленных областей высоких значений концентрации ОБВ, в глубоководной части полигона могут проследиваться локальные области мутных вод, возникновение которых явно не связано с речным стоком или адвекцией прибрежных вод в открытое море. Появление подобных областей можно объяснить особенностями вертикальной циркуляции в зонах циклонических круговоротов и меандров. Так, например, по данным летней и осенней съемок 2018 г. в южной части полигонов наблюдались области высоких значений $C_{\text{ОВВ}}$, располагающиеся на перифериях циклонических меандров (рис. 2 и 3). В отличие от прибрежных вод повышенной мутности и низкой солёности, воды с повышенной концентрацией ОБВ в зонах этих меандров характеризовались повышением солёности на поверхности — выше 18,15‰ летом и 18,25‰ осенью (рис. 2 и 3). Такое повышение мутности и солёности связано с подъемом более солёных подповерхностных вод и подповерхностного максимума концентрации ОБВ, что привело к повышению значений $C_{\text{ОВВ}}$ и солёности у поверхности. Распределение глубины залегания подповерхностного максимума концентрации взвеси показало, что в области повышения $C_{\text{ОВВ}}$ на поверхности она была менее 5–10 м, в то время как в окружающих водах она увеличивалась до 15–25 м [25].

В целом по данным всех съемок в глубоководной части акватории концентрация ОБВ понижалась по мере удаления от прибрежных источников мутных вод, при этом солёность, как правило, увеличивалась (рис. 4).

4. Обсуждение

Квазисинхронные измерения концентрации общего взвешенного вещества и гидрологических параметров в периоды съемок позволили дать некоторые статистические оценки выявленным особенностям связи пространственной структуры гидрологических полей и поля концентрации ОБВ на поверхности и проанализировать изменения этой связи с глубиной. Анализ горизонтальных распределений концентрации ОБВ и термохалинных параметров, а также коэффициентов линейной связи между этими распределениями с дискретностью 1 м по глубине показал, что в пределах верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) между значениями $C_{\text{ОВВ}}$ и температуры, $C_{\text{ОВВ}}$ и солёности на каждом горизонте наблюдалась значимая отрицательная линейная корреляция, а между значениями $C_{\text{ОВВ}}$ и плотности — положительная [23, 26]. Таким образом, более холодные и менее солёные воды, как правило, имели повышенную мутность. Это связано с тем, что в более холодных водах, приуроченных преимущественно к открытым частям моря, а также к апвеллингам происходит более активное развитие организмов биологического происхождения. В менее солёных водах увеличение концентрации ОБВ происходило в основном в прибрежных районах, где значительную роль играет речной сток, обогащенный взвесью терригенного происхождения.

Толщина ВКС в поле $C_{\text{ОВВ}}$ существенно зависела от сезона (рис. 5, а) и, как правило, совпадала с толщиной ВКС в полях термохалинных параметров (рис. 5, б, г, е). В период с конца осени до весны наблюдался

хорошо развитый ВКС толщиной до 50 м, летом и в начале осени толщина ВКС не превышала 5–10 м. Глубже ВКС прослеживался подповерхностный максимум концентрации ОВВ, наиболее четко выраженный летом и осенью (рис. 5, а). Глубина залегания этого максимума составляла летом 10–13 м, в начале осени увеличивалась до 18–22 м, в конце осени — до 25 м. Распределения вертикальных градиентов температуры (ВГТ), солёности (ВГС) и плотности (ВГП) (рис. 5, в, д, ж) показали, что глубина залегания подповерхностного максимума концентрации ОВВ хорошо совпадала с глубиной залегания максимальных значений (по абсолютной величине) вертикальных градиентов температуры и плотности (рис. 5, а, в, ж). В целом в летне-осенний период между глубинами залегания подповерхностного максимума $C_{ОВВ}$ и максимумов ВГТ и ВГП выявлен высокий уровень линейных связей (табл. 2). Кроме того, установлено, что толщина подповерхностного слоя с высокими значениями концентрации ОВВ, более чем в 1,5 раза превышающими значения $C_{ОВВ}$ в выше- и нижележащих слоях, зависит от абсолютной величины вертикального градиента температуры. В областях, где наблюдался максимальный ВГТ, толщина слоя с высоким содержанием общего взвешенного вещества уменьшалась почти на порядок по сравнению с районами, где градиент температуры был слабо выражен. Между толщиной слоя с максимальной концентрацией ОВВ и величиной максимального ВГТ выявлена значимая линейная корреляция (рис. 6).

В периоды зимних и весенних съёмок вертикальная стратификация концентрации ОВВ в верхнем 60-метровом слое была выражена слабо и подповерхностный максимум практически не прослеживался. Непосредственно в поверхностном слое толщиной до 5 м в структуре ОВВ наблюдались слабые экстремумы разного знака, формирующиеся в результате влияния синоптических атмосферных процессов на перераспределение поверхностных вод с различной концентрацией ОВВ (рис. 5, а).

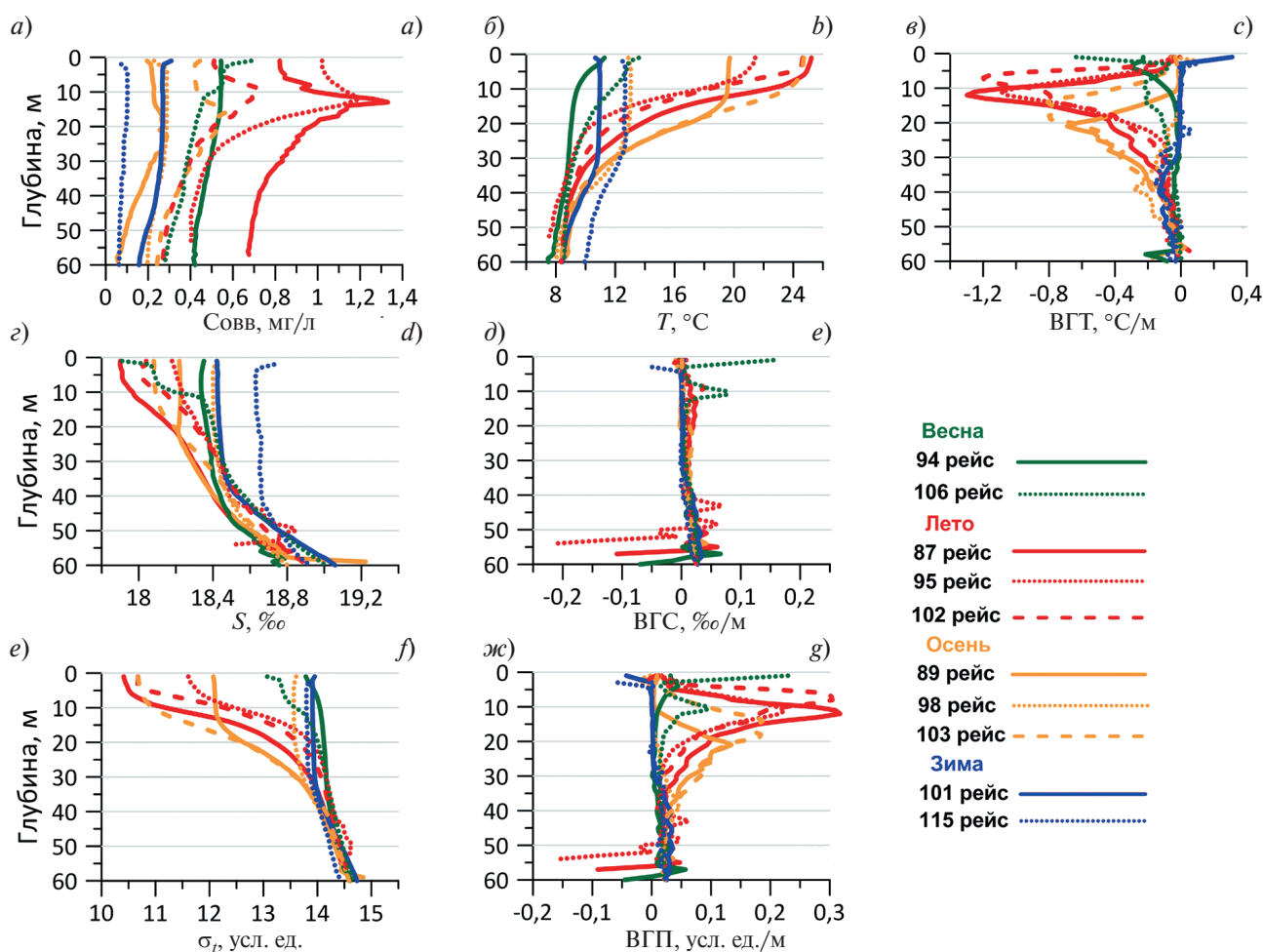


Рис. 5. Вертикальные профили концентрации ОВВ (а), температуры (б) и ВГТ (в), солёности (г) и ВГС (д), плотности (е) и ВГП (ж) в слое 0–60 м, осредненные по всем станциям для каждой съёмки

Fig. 5. Vertical profiles of TSM concentration (a), temperature (b) and TVG (c), salinity (d) and VSG (e), density σ_t (f) and $\sigma_t VG$ (g) in the 0–60 m layer, averaged over all stations for each survey

Таблица 2

Table 2

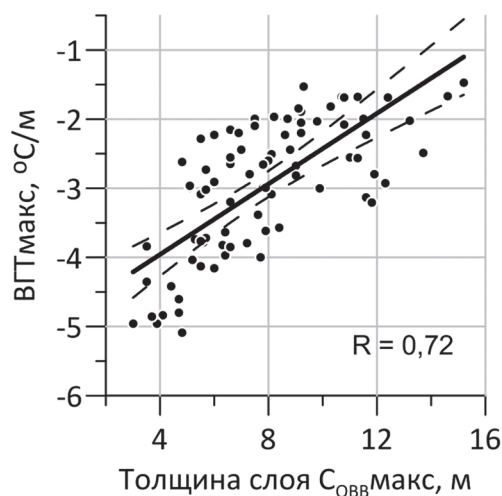
Величины коэффициентов линейной корреляции R между глубинами залегания (H) подповерхностного максимума $C_{ОВВ}$ и максимумов ВГТ и ВГП. Значимые на 95%-ном уровне величины R выделены жирным

Values of the linear correlation coefficients R between the depths of occurrence (H) of the subsurface maximum of the C_{TSM} and the maximum of the TVG and of TVG. R values significant at the 95 % level are shown in bold

Параметр	Весна		Лето			Осень			Зима	
	2017	2019	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2018	2020
$R(H_{C_{ОВВ} \max} - H_{ВГТ \max})$	0,32	0,94	0,91	0,65	0,9	0,82	0,33	0,82	0,1	0,35
$R(H_{C_{ОВВ} \max} - H_{ВГП \max})$	0,35	0,95	0,91	0,65	0,74	0,79	0,35	0,83	0,1	0,25

Рис. 6. Корреляционная связь толщины подповерхностного слоя с высокими значениями концентрации ОВВ и величины максимального вертикального градиента температуры по данным летней съемки 2016 г. Штриховые линии — границы 95%-го доверительного интервала

Fig. 6. Correlation between the thickness of the subsurface layer with high TSM concentrations and the value of the maximum temperature vertical gradient according to the data of the summer 2016 survey. Dashed lines are the boundaries of the 95 % confidence interval



Глубже подповерхностного максимума концентрации ОВВ наблюдалось ее постепенное уменьшение (рис. 7, а). В слое примерно 75–120 м по данным всех съемок прослеживался промежуточный минимум $C_{ОВВ}$, глубина залегания которого заметно изменялась в зависимости от сезона и варьировала в пределах от 75–95 м в конце осени, зимой и весной до 100–117 м летом и в начале осени. Вертикальное распределение температуры (рис. 7, б) показывает, что этот минимум $C_{ОВВ}$ прослеживался ниже глубины залегания минимума температуры (ядра холодного промежуточного слоя), которая составляла 70–90 м, и располагался в слое основных термоклина, галоклина и пикноклина (рис. 7, б — в). В целом между глубинами залегания ядра ХПС и промежуточного минимума $C_{ОВВ}$ выявлена значимая линейная связь (рис. 7, д).

Под промежуточным минимумом концентрация ОВВ снова возрастала, при этом на глубинах более 100–120 м на осредненных по всем станциям вертикальных профилях прослеживался ряд относительно слабых экстремумов $C_{ОВВ}$ (рис. 7, а). Анализ вертикальной структуры поля плотности показал, что наибольшее увеличение содержания взвешенных веществ наблюдается в слое залегания изопикнических поверхностей 16,15–16,35 усл. ед. Согласно [13], 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. Наиболее интенсивный глубинный максимум концентрации ОВВ хорошо прослеживался в период осенней съемки 2017 г. На осредненном профиле $C_{ОВВ}$ этот максимум располагался примерно на глубине 170 м (рис. 7, а; рис. 8, а), которая соответствовала изопикнической поверхности 16,3 усл. ед. (рис. 8, б), т.е., согласно [13], находился в верхней части сероводородной зоны. Анализ глубины залегания этого максимума $C_{ОВВ}$ на каждой отдельной станции показал, что на акватории съемки она изменялась в широком диапазоне от 100 до 170 м. Оценки согласованности пространственных распределений глубин залегания этого максимума $C_{ОВВ}$ и различных изопикнических поверхностей с дискретностью 0,1 усл. ед., соответствующих субкислородной редокс-зоне (15,5–16,15 усл. ед.) (рис. 8, в) и сероводородной зоне (16,2–16,6 усл. ед.) (рис. 8, в — г) показали, что максимальная корреляция со значением коэффициента корреляции $R \sim 0,936$ наблюдается для глубины залегания изопикны 16,3 усл. ед. В целом выявлен высокий уровень согласованности распределения глубины залегания максимума $C_{ОВВ}$ в сероводородной зоне с распределением слоя изопикнических поверхностей 16–16,4 усл. ед. со значениями R , превышающими 0,9 (рис. 8, ж).

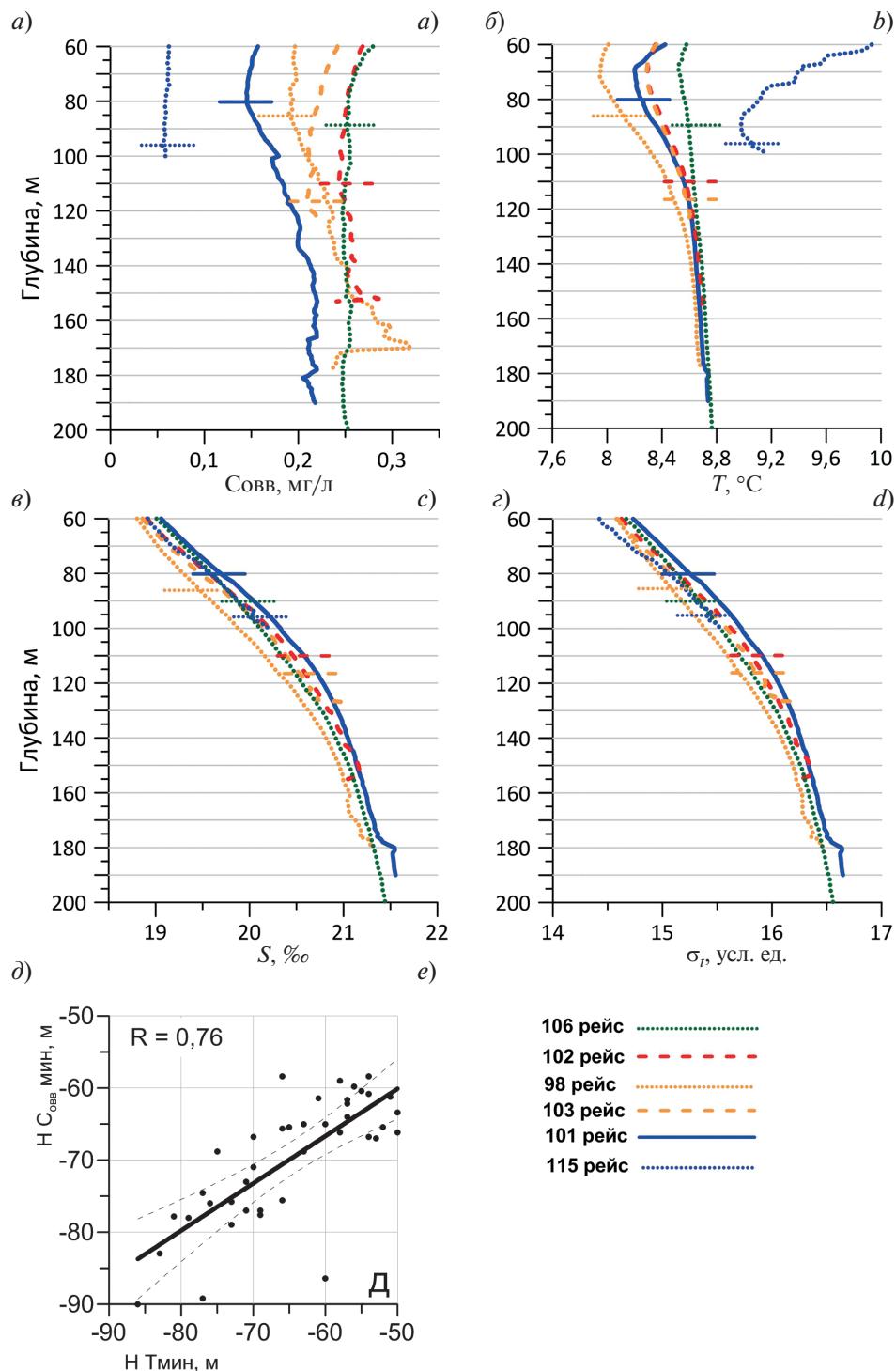


Рис. 7. Вертикальные профили концентрации ОВВ (а), температуры (б), солёности (в) и плотности (г) в слое 60–200 м, осредненные по всем станциям для каждой съемки, и корреляционная связь между глубинами залегания ядра ХПС и промежуточного минимума C_{OBB} по данным зимней съемки 2017 г. (д). Горизонтальными линиями отмечена глубина залегания минимума ОВВ. Штриховые линии — границы 95%-го доверительного интервала

Fig. 7. Vertical profiles of TSM concentration (a), temperature (b), salinity (c) and density (d) in the 60–200 m layer, averaged over all stations for each survey, and the correlation between the depths of the CIL core and C_{TSM} intermediate minimum (e) according to the data of the winter 2017 survey. The horizontal lines mark the depth of the TSM minimum. Dashed lines are the boundaries of the 95 % confidence interval

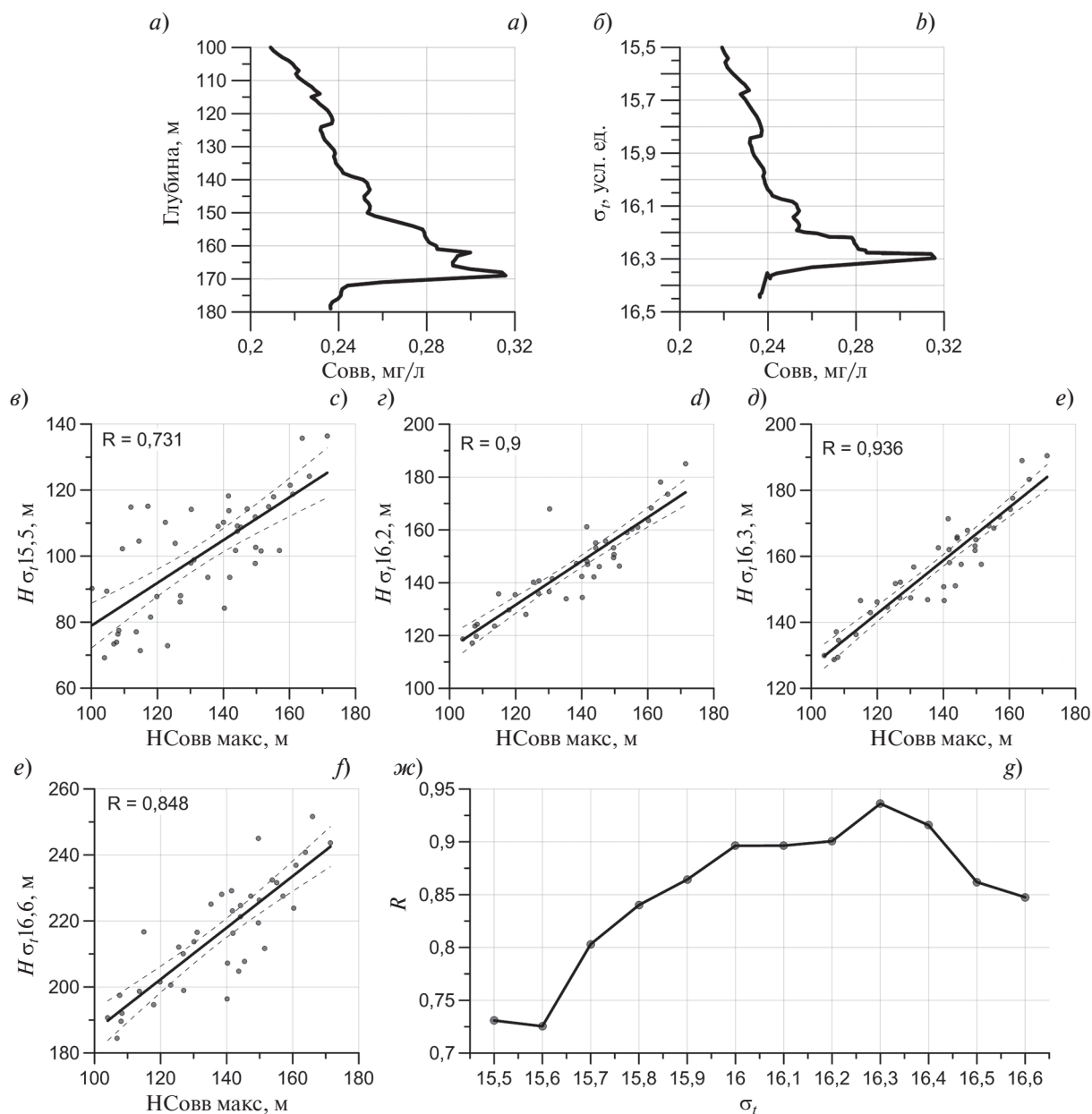


Рис. 8. Осредненный по всем станциям вертикальный профиль $C_{ОВВ}$ в слое 100–180 м (а), зависимость величин $C_{ОВВ}$ от плотности (б), корреляционная связь между глубинами залегания различных изопикн и максимума $C_{ОВВ}$ в субкислородной зоне (в), на верхней границе сероводородной зоны (г), в сероводородной зоне (д, е), изменение коэффициента корреляции R между глубинами залегания максимума $C_{ОВВ}$ и различных изопикн (ж) по данным осенней съемки 2017 г. Штриховые линии — границы 95 %-го доверительного интервала

Fig. 8. Averaged over all stations, the C_{TSM} vertical profile in the 100–180 m layer (a), dependence of the C_{TSM} values on density (b), correlation between the depths of different isopycnal and the C_{TSM} maximum in the suboxygen zone (c), at the upper boundary of the hydrogen sulfide zones (d), in the hydrogen sulfide zone (e, f), change of the correlation coefficient R between the depths of the C_{TSM} maximum and different isopycnal (g) according to the data of the autumn 2017 survey. Dashed lines are the boundaries of the 95 % confidence interval

5. Заключение

Подробные гидрооптические съемки с высокой пространственной дискретностью, выполненные по одной и той же сетке, позволили уточнить особенности горизонтальной и вертикальной структуры гидрооптических полей и оценить их связь с гидрологическими характеристиками.

Показано, что основными источниками повышенной концентрации общего взвешенного вещества в поверхностном слое северной части Черного моря являются низкосолёные и мутные воды, поступающие из Керченского пролива, воды стоков Риони, Ингури и других рек на востоке акватории и распреснённые воды Днепра, Днестра и Дуная, проникающие на акваторию съёмов с северо-западного шельфа.

В глубоководной части полигонов съёмов могут проследиваться локальные области мутных вод, возникновение которых связано с особенностями вертикальной циркуляции в зонах циклонических круговоротов и меандров Основного Черноморского Течения. В отличие от прибрежных вод повышенной мутности и низкой солёности, воды с повышенной концентрацией ОВВ в зонах этих меандров характеризовались повышением солёности на поверхности.

Установлено, что в пределах верхнего квазиоднородного слоя на каждом горизонте между значениями $C_{ОВВ}$ и температуры, $C_{ОВВ}$ и солёности наблюдалась значимая отрицательная линейная корреляция, а между значениями $C_{ОВВ}$ и плотности — положительная, т.е. более холодные и менее солёные, а также более плотные воды характеризовались повышенной мутностью.

Показано, что толщина ВКС в поле $C_{ОВВ}$, как правило, совпадала с толщиной ВКС в полях термохалинных параметров. Глубже ВКС прослеживался основной максимум концентрации ОВВ, наиболее четко выраженный летом и осенью. Глубина залегания этого максимума совпадала с глубиной залегания максимальных значений (по абсолютной величине) вертикальных градиентов температуры и плотности. Толщина подповерхностного слоя с высокими значениями концентрации ОВВ, более чем в 1,5 раза превышающими значения $C_{ОВВ}$ в выше- и нижележащих слоях, зависела от абсолютной величины вертикального градиента температуры. В областях, где наблюдался максимальный ВГТ, толщина слоя с высоким содержанием общего взвешенного вещества уменьшалась почти на порядок по сравнению с районами, где градиент температуры был слабо выражен.

Ниже глубины залегания ядра холодного промежуточного слоя в слое основных термоклина, галоклина и пикноклина прослеживался промежуточный минимум $C_{ОВВ}$. Под промежуточным минимумом концентрация ОВВ снова возрастала и на глубинах более 120–130 м прослеживался еще один максимум $C_{ОВВ}$, располагающийся в верхнем слое сероводородной зоны. Пространственное распределение глубины залегания этого максимума наиболее четко согласуется с распределением глубины залегания изопикны 16,3 усл. ед.

6. Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность старшему научному сотруднику отдела дистанционных методов исследований ФГБУН ФИЦ МГИ, кандидату технических наук Морозову А.Н. за ценные методические советы при обсуждении статьи.

7. Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по темам № 0555–2021–0003 (Оперативная океанология) и № 0555–2021–0004 (Океанологические процессы).

Литература

1. Изразль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. М.: Флинта Наука, 2009. 520 с.
2. Иванов В.А., Катунина Е.В., Совга Е.Е. Оценки антропогенных воздействий на экосистему акватории Гераклеяского полуострова в районе расположения глубинных стоков // Процессы в геосредах. 2016. Т. 1, № 5. С. 62–68.
3. Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49.
4. 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
5. Xiaolong Yu, Zhongping L., Fang S., Menghua W., Jianwei W., Lide J., Zhehai S. An empirical algorithm to seamlessly retrieve the concentration of suspended particulate matter from water color across ocean to turbid river mouths // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 235. doi:10.1016/j.rse.2019.111491
6. Eisma D. Suspended matter in the aquatic environment. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 1993, 315 p. doi:10.1007/978-3-642-77722-6
7. Маньковский В.И. Оптическая структура вод Черного моря и закономерности ее формирования // Гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря. Севастополь: МГИ АНУ, 1992. С. 7–27.

8. 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.
9. Маньковский В.И., Маньковская Е.В., Соловьев М.В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. 41 с.
10. 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.
11. 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. doi:10.15372/AOO20170904
12. Маньковский В.И. Оптические характеристики прибрежных вод Черноморского побережья Украины // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 1999. С. 149–152.
13. Yakushev E.V., Chasovnikov V.K., Murray J.W., Pakhomova S.V., Podymov O.I., Stunzhas P.A. Vertical hydro-chemical structure of the Black Sea / Eds. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Berlin, Heidelberg: Springer. Vol. 5Q. 2007. P. 277–307. doi:10.1007/698_5_088
14. Маньковский В.И. Глубинный слой повышенной концентрации взвеси и его связь с циркуляцией и структурой водных масс // Исследования межведомственной экспедиции в северо-западной Атлантике. Севастополь: МГИ АН УССР. 1969. С. 83–88.
15. Неуймин Г.Г. Стабильный глубоководный слой взвеси в Черном море // Морские гидрофизические исследования. Севастополь: МГИ АН УССР. 1970. № 1. С. 178–191.
16. Неуймин Г.Г. Распределение взвеси в глубинных областях Черного моря // Физика атмосферы и океана. 1965. Т. 1, № 11. С. 1190–1195.
17. Совга Е.Е., Маньковский В.И., Прохоренко Ю.А., Чепурнова Э.А. Природа глубинного мутного слоя в Черном море // Доклады Академии наук Украинской ССР. Серия Б: Геологические, химические и биологические науки. 1987. № 6. С. 32.
18. Прохоренко Ю.А., Крашенинников Б.Н., Агафонов Е.А., Башарин В.А. Экспериментальные исследования глубинного слоя мутности в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 1993. № 2. С. 57–63.
19. Маньковский В.И., Земляная Л.А. Распределение по акватории и сезонная изменчивость глубинного мутного слоя в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 1987. № 6. С. 51–53.
20. Маньковский В.И. Особенности вертикального распределения показателя ослабления излучения в коротковолновом и длинноволновом участках спектра в глубинных слоях сероводородной зоны и в придонном слое Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2003. № 3. С. 63–67.
21. Агафонов Е.А., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Особенности формирования прозрачности поверхностных вод на шельфе северных районов Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 2. С. 65–67.
22. Маньковский В.И. Оптические характеристики вод восточной части северо-западного шельфа Черного моря в весенний период // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 61–68.
23. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Fedirko A.V., Martynov O.V., Alekseev D.V. Peculiarities of the suspended matter distribution received by the optical measurements in the photic layer of the north part of the Black Sea in the summer period of 2016 // Proceedings SPIE, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1046634 (2017). doi: 10.1117/12.2286444
24. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Fedirko A.V., Korchemkina E.N., Skripaleva E.A., Khurchak A.P. Hydro-optical structure of the Black Sea active water layer in the spring-summer period of 2017 // Proceedings SPIE10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2018. 108333V. doi:10.1117/12.2503874
25. Латушкин А.А., Артамонов Ю.В., Федирко А.В., Скрипалева Е.А., Кудинов О.Б. Особенности гидрооптической структуры вод в северной части Черного моря по данным натурных измерений в 2018 г. // Труды X-ой Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод» (ONW 2019). Санкт-Петербург, 2019. С. 120–124.
26. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Fedirko A.V., Skripaleva E.A., Kudinov O.B. Spatial structure of the total suspended matter concentrations in the northern Black Sea in autumn 2018 according to contact observations // Proceedings SPIE11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2019. 112084U. doi:10.1117/12.2540798
27. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A., Fedirko A.V., Kudinov O.B. 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 // Proceedings SPIE11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2020. 115602R. doi:10.1117/12.2574281
28. Ключевиткин А.А., Гармашов А.В., Латушкин А.А., Орехова Н.А., Коченкова А.И., Малафеев Г.В. Комплексные исследования Черного моря в 101-М рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» // Океанология. 2019. Т. 59, № 2. С. 315–318. doi:10.31857/S0030-1574592315-318

29. Латушкин А.А. Многоканальный измеритель коэффициента ослабления света для проведения океанографических подспутниковых исследований // Управление и механотронные системы. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2013. С. 231–236.
30. Алескерова А.А., Кубряков А.А., Горячкин Ю.Н., Станичный С.В. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 53–64. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-53-64
31. Artamonov Yu.V., Latushkin A.A., Skripaleva E.A., Fedirko A.V. Rim Current manifestation in the climatic fields of hydro-optical and hydrological characteristics at the coast of Crimea // Proceedings SPIE11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2019. C3–112084X. doi:10.1117/12.2540803

References

1. Israel Yu.A., Tsyban A.V. Anthropogenic ecology of the ocean. *Moskva, Flinta Nauka*, 2009. 520 p. (in Russian).
2. Ivanov V.A., Katunina E.V., Sovga E.E. Assessments of anthropogenic impacts on the ecosystem of the waters of the Heraklean Peninsula in the vicinity of deep drains. *Processes in GeoMedia*. 2016, 1(5), 62–68 (in Russian).
3. Bondur V.G., Kiler R.N., Starchenkov S.A., Rybakova N.I. Monitoring of the pollution of the ocean coastal waters areas using space multispectral high resolution imagery. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2006, 6, 42–49 (in Russian).
4. Volpe V., Silvestri S., Marani M. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*. 2011, 115, 1, 44–54. doi:10.1016/j.rse.2010.07.013
5. Xiaolong Yu., Zhongping L., Fang S., Menghua W., Jianwei W., Lide J., Zhehai S. An empirical algorithm to seamlessly retrieve the concentration of suspended particulate matter from water color across ocean to turbid river mouths. *Remote Sensing of Environment*. 2019, 235, 111491. doi:10.1016/j.rse.2019.111491
6. Eisma D. Suspended matter in the aquatic environment. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 1993, 315 p. doi:10.1007/978-3-642-77722-6
7. Man'kovskiy V.I. Optical structure of the Black Sea waters and patterns of its formation. *Gidrofizicheskie i Gidrohimicheskie Issledovaniya Chernogo Morya. Sevastopol, MGI ANU*. 1992, 7–27 (in Russian).
8. Man'kovskiy V.I., Solov'ev M.V. Relationship between the radiation attenuation index and the concentration of suspended matter in the Black Sea waters. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2003, 2, 60–65 (in Russian).
9. Man'kovskiy V.I., Man'kovskaya E.V., Solov'ev M.V. Hydro-optical characteristics of the Black Sea. *Reference book. Sevastopol', MGI NAN Ukrainy*, 2009. 41 p. (in Russian).
10. Kukushkin A.S., Agafonov E.A., Prohorenko Yu.A. Distribution of the light beam attenuation coefficient in the surface coastal waters of the Black Sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2006, 5, 30–43 (in Russian).
11. Kukushkin A.S. Spatial and temporal variability of the water transparency distribution in the north-western Black Sea. *Optika Atmosfery i Okeana*. 2017, 30(9), 750–762 (in Russian). doi:10.15372/AOO20170904
12. Man'kovskiy V.I. Optical characteristics of the coastal waters of the Black Sea coast of Ukraine. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnyh i Shel'fovyyh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa*. 1999, 149–152 (in Russian).
13. Yakushev E.V., Chasovnikov V.K., Murray J.W., Pakhomova S.V., Podymov O.I., Stunzhas P.A. Vertical hydro-chemical structure of the Black Sea / Eds. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Berlin, Heidelberg: Springer. Vol. 5Q. 2007. P. 277–307. doi:10.1007/698_5_088
14. Man'kovskiy V.I. A deep layer of increased concentration of suspended matter and its relationship with the circulation and structure of water masses. *Issledovaniya Mezhdomstvennoy Ekspeditsii v Severo-zapadnoy Atlantike. Sevastopol', MGI AN USSR*, 1969. P. 83–88 (in Russian).
15. Neujmin G.G. Stable deep-water suspension layer in the Black Sea. *Morskie Gidrofizicheskie Issledovaniya*. 1970, 1, 178–191 (in Russian).
16. Neujmin G.G. Distribution of suspended matter in the deep areas of the Black Sea. *Fizika Atmosfery i Okeana*. 1965, 1(11), 1190–1195 (in Russian).
17. Sovga E.E., Man'kovskiy V.I., Prohorenko Yu.A., Chepurnova E.A. Nature of the turbidity deep layer in the Black Sea. *Doklady Akademii nauk Ukrainy SSR. Seriya B: Geologicheskies, himicheskie i biologicheskies nauki*. 1987, 6, 32 (in Russian).
18. Prohorenko Yu.A., Krashenninnikov B.N., Agafonov E.A., Basharin V.A. Experimental studies of the turbidity deep layer in the Black Sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 1993, 2, 57–63 (in Russian).
19. Man'kovskiy V.I., Zemlyanaya L.A. Distribution over the water area and seasonal variability of the turbidity deep layer in the Black Sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 1987, 6, 51–53 (in Russian).
20. Man'kovskiy V.I. Features of the vertical distribution of the radiation attenuation coefficient in the short-wave and long-wave parts of the spectrum in the deep layers of the hydrogen sulfide zone and in the bottom layer of the Black Sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2003, 3, 63–67 (in Russian).
21. Agafonov E.A., Kukushkin A.S., Prohorenko Yu.A. Features of the formation of surface water transparency on the shelf of the northern regions of the Black Sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2002, 2, 65–67 (in Russian).

22. Man'kovskiy V.I. Optical characteristics of waters in the eastern part of the northwestern shelf of the Black Sea in the spring. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2012, 4, 61–68 (in Russian).
23. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Fedirko A.V., Martynov O.V., Alekseev D.V. Peculiarities of the suspended matter distribution received by the optical measurements in the photic layer of the north part of the Black Sea in the summer period of 2016. *Proceedings SPIE, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 1046634 (2017). doi: 10.1117/12.2286444
24. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Fedirko A.V., Korchemkina E.N., Skripaleva E.A., Khurchak A.P. Hydro-optical structure of the Black Sea active water layer in the spring-summer period of 2017. *Proceedings SPIE10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2018. 108333V. doi:10.1117/12.2503874
25. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Fedirko A.V., Skripaleva E.A., Kudinov O.B. Features of the waters hydro-optical structure in the northern part of the Black Sea according to field measurements in 2018. *Proceedings of X Anniversary All-Russian Conference "Current Problems in Optics of Natural Waters" (ONW 2019). St. Petersburg*, 2019, 120–124 (in Russian).
26. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Fedirko A.V., Skripaleva E.A., Kudinov O.B. Spatial structure of the total suspended matter concentrations in the northern Black Sea in autumn 2018 according to contact observations. *Proceedings SPIE11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2019. 112084U. doi:10.1117/12.2540798
27. Latushkin A.A., Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A., Fedirko A.V., Kudinov O.B. 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. *Proceedings SPIE11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2020. 115602R. doi:10.1117/12.2574281
28. Klyuvitkin A.A., Garmashov A.V., Latushkin A.A., Orekhova N.A., Kochenkova A.I., Malafeev G.V. Comprehensive Studies of the Black Sea during the Cruise 101 of the R/V Professor Vodyanitsky. *Oceanology*. 2019, 59, 2, 287–289. doi:10.1134/S0001437019020097
29. Latushkin A.A. Multi-channel beam attenuation coefficient meter for oceanographic sub-satellite research. *Upravlenie i Mekhanotronnye Sistemy*. 2013, 231–236 (in Russian).
30. Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Goryachkin Yu.N., Stanichny S.V. Propagation of waters from the Kerch Strait in the Black Sea. *Physical Oceanography*. 2017, 6, 47–57. doi:10.22449/1573-160X-2017-6-47-57
31. Artamonov Yu.V., Latushkin A.A., Skripaleva E.A., Fedirko A.V. Rim Current manifestation in the climatic fields of hydro-optical and hydrological characteristics at the coast of Crimea. *Proceedings SPIE11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2019. C3–112084X. doi:10.1117/12.2540803