

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-5

УДК 551.463.5:547.979.7(262.5)

© Т. Я. Чурилова*, Е. Ю. Скороход, Т. В. Ефимова, Н. А. Моисеева, 2025

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, 299011, Севастополь, пр. Нахимова, д. 2
*tanya.churilova@ibss-ras.ru

КОНЦЕНТРАЦИЯ ХЛОРОФИЛЛА «А» И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА ОКРАШЕННЫМ РАСТВОРЕННЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ ВЕЩЕСТВОМ В ЧЕРНОМ МОРЕ ЗИМОЙ (2018) И ЛЕТОМ (2020)

Статья поступила в редакцию 15.04.2024, после доработки 21.02.2025, принята в печать 13.03.2025

Аннотация

В работе были использованы результаты исследований в Черном море в ходе экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» — с 24 ноября по 10 декабря 2018 г. (PV105), с 4 по 24 июня 2020 г. (PV113). Получены новые для Черного моря данные о поглощении света окрашенным растворенным органическим веществом (CDOM) в зимний и летний периоды года. Зимой в поверхностном слое моря содержание CDOM, маркером которого является показатель поглощения $a_{CDOM}(438)$ ($0,10 \pm 0,015 \text{ м}^{-1}$), превышало летние значения ($0,062 \pm 0,025 \text{ м}^{-1}$). Сезонных различий по средним значениям спектрального наклона (S_{CDOM}) не установлено ($0,019 \text{ нм}^{-1}$). Однако, вариабельность значений S_{CDOM} летом отмечена в более широком диапазоне ($0,015$ до $0,026 \text{ нм}^{-1}$), чем зимой ($0,017$ – $0,021 \text{ нм}^{-1}$). Высокие летние значения S_{CDOM} являются следствием фотодеструкции CDOM в поверхностном слое моря летом. Установлена обратная связь между $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} , которая описывается степенной зависимостью. Показаны сезонные различия в содержании хлорофилла a (TChl- a) в верхнем квазиоднородном слое ($1,1 \pm 0,43 \text{ мг м}^{-3}$ зимой и $0,32 \pm 0,11 \text{ мг м}^{-3}$ летом) и в характере вертикального распределения TChl- a , обусловленные гидрологической структурой вод: зимой — однородное распределение в пределах верхнего квазиоднородного слоя, который соизмерим или превышает зону фотосинтеза, летом — наличие слоя максимальных концентраций хлорофилла a вблизи нижней границы зоны фотосинтеза. Связи между $a_{CDOM}(438)$ и TChl- a не выявлено.

Ключевые слова: окрашенное растворенное органическое вещество, спектральный показатель поглощения света, спектральный наклон, хлорофилл a , Черное море

© Т. Я. Чурилова*, Е. Ю. Скороход, Т. В. Ефимова, Н. А. Моисеева, 2025

А.О. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 2 Nakhimov Ave., Sevastopol 299011, Russia
*tanya.churilova@ibss-ras.ru

CHLOROPHYLL “A” CONCENTRATION AND LIGHT ABSORPTION BY COLORED DISSOLVED ORGANIC MATTER IN THE BLACK SEA IN WINTER (2018) AND SUMMER (2020)

Received 15.04.2024, Revised 21.02.2025, Accepted 13.03.2025

Abstract

The study was based on the results obtained during the expeditions of the R/V “Professor Vodyanitsky” — from November 24 to December 10, 2018 (PV105), from June 4 to 24, 2020 (PV113). New data of light absorption by colored dissolved organic matter (CDOM) in the winter and summer were presented. In winter, in the sea surface layer, the light absorption coefficients of CDOM ($a_{CDOM}(438)$) ($0.10 \pm 0.015 \text{ m}^{-1}$), exceeded summer values ($0.062 \pm 0.025 \text{ m}^{-1}$). There were no seasonal differences in the mean spectral slope (S_{CDOM}) values (0.019 nm^{-1}). However, the variability of S_{CDOM} values in summer is noted in a wider range (0.015 to 0.026 nm^{-1}) than in winter (0.017 – 0.021 nm^{-1}). The highest S_{CDOM} values are resulted from photodestruction of CDOM in the sea surface layer in summer. An inverse relationship has been revealed between $a_{CDOM}(438)$ and S_{CDOM} , which is described by a power law. Seasonal differences in the content of chlorophyll a (TChl- a) in the upper mixed layer ($1.1 \pm 0.43 \text{ mg m}^{-3}$ in winter and

Ссылка для цитирования: Чурилова Т.Я., Скороход Е.Ю., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А. Концентрация хлорофилла «а» и поглощение света окрашенным растворенным органическим веществом в Черном море зимой (2018) и летом (2020) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 1. С. 53–65. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-5
For citation: Churilova T. Ya., Skorokhod E. Yu., Efimova T.V., Moiseeva N.A. Chlorophyll a Concentration and Light Absorption by Colored Dissolved Organic Matter in the Black Sea in Winter (2018) and Summer (2020). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):53–65. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-5

$0.32 \pm 0.11 \text{ mg m}^{-3}$ in summer) and in the type of the TChl-*a* vertical distribution, due to the water hydrological structure, were shown: in winter — uniform distribution within the upper mixed layer, which was comparable to or exceeded the photosynthesis zone, in summer — the presence of a layer of deep chlorophyll *a* maximum near the bottom of the euphotic zone. Relationship between $a_{CDOM}(438)$ and S_{CDOM} was not revealed for both seasons.

Key words: colored dissolved organic matter, spectral light absorption coefficient, spectral slope, chlorophyll *a*, the Black Sea

1. Введение

Окрашенное растворенное органическое вещество (CDOM) — это основной оптически активный компонент в водах 2-го типа по оптической классификации вод [1]. Черное море относится к водам 2-го типа [2]. Содержание и спектральные характеристики оптически активных компонентов среды — фитопланктона, взвешенного вещества и CDOM — активно исследуются в разных водоемах, начиная с 1980-х гг. [3–6] что связано с развитием спутниковой океанографии [7, 8]. Оценка показателей качества и продуктивности вод на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса выполняется с использованием алгоритмов для трансформации спектральных свойств восходящего из водной толщи излучения в конкретные биологические характеристики. Развитие спутниковых алгоритмов базируется на данных о биооптических показателях вод конкретных акваторий [1]. CDOM в водах 2-го типа доминирует в формировании светового поля, в ослаблении освещенности и изменении спектрального состава света с глубиной [9], что оказывает влияние на фотосинтетические и продукционные характеристики фитопланктона [10]. Исследования вариабельности спектральных показателей поглощения света CDOM ($a_{CDOM}(\lambda)$) проводились в разных регионах Мирового океана [11–15]. Однако для Черного моря известно ограниченное количество таких исследований [16, 17]. В прибрежных водах в районе Крымского полуострова на основе результатов измерения $a_{CDOM}(\lambda)$ в соответствии с современным протоколом (IOCCG, 2019) выполнен анализ сезонной динамики показателей $a_{CDOM}(\lambda)$, используя параметры параметризации: показателя поглощения света на выбранной длине волны и спектрального наклона (S_{CDOM}) [16–18]. В прибрежных и глубоководных водах в районе Геленжика [18] измерения показателя поглощения света CDOM проводили с помощью интегрирующей сферы ICAM [19]. Для этих районов показана межгодовая (2017–2019 гг.) изменчивость показателей поглощения света CDOM в среднем для спектральных диапазонов (около 20 нм), для водных слоев и для периода работ в июне месяце [18]. Однако, отмеченное осреднение, отсутствие данных о S_{CDOM} и использование фильтров с размерами пор (0,4 мкм), превышающих (0,2 мкм), рекомендованные протоколом IOCCG [20], ограничивает использование этих данных для сравнительного анализа.

Цель настоящей работы состоит в исследовании изменчивости спектрального показателя поглощения света ($a_{CDOM}(\lambda)$), концентрации хлорофилла *a* в сумме с феопигментами (TChl-*a*) и связи между этими параметрами в летний и зимний периоды года в глубоководном и прибрежном районах Черного моря на основе результатов экспедиций 105 и 113 НИС «Профессор Водяницкий».

2. Методы

Работа выполнена на основе данных, полученных в глубоководном и прибрежном районах Черного моря в ходе научных экспедиций НИС Профессор Водяницкий с 24 ноября по 10 декабря 2018 г. (PV105), с 4 по 24 июня 2020 г. (PV113) (рис. 1). В прибрежных водах моря выполнено 2 станции зимой (PV105), а в летний период (PV113) была проведена более детальная съемка. В прибрежных водах Крымского полуострова выполнено 5 станций с глубинами до 50 м и 3 станции с глубинами до 85 м, около Керченского пролива 2 станции с глубинами до 50 м, и в районе северо-восточного побережья — 1 станция с глубинами до 50 м и 2 станции с глубинами 100–150 м.

Пробы воды отбирали с помощью кассеты батометров на разных горизонтах в пределах зоны фотосинтеза, а также в более глубоких слоях моря, в том числе в сероводородной зоне моря. Глубины для отбора проб в освещенном слое моря выбирали на основе данных о температуре воды, флуоресценции хлорофилла *a* и прозрачности вод.

Профили солёности, температуры и плотности воды измеряли с помощью CTD комплекса Sea-Bird's 911 в рейсе PV105 и Idronaut Ocean Seven 320 PlusM в рейсе PV113. В PV113 профили интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* (F) и фотосинтетически активной радиации (PAR) измеряли с помощью специализированных зондов (Turner Cyclops 6k, QCP-2200), интегрированных в систему CTD комплекса Idronaut Ocean Seven 320 Plus M. Температурный градиент (разность температуры воды при изменении глубины на один метр) рассчитывали на основе данных об изменении температуры с глубиной, полученных после зондирования CTD комплексом.

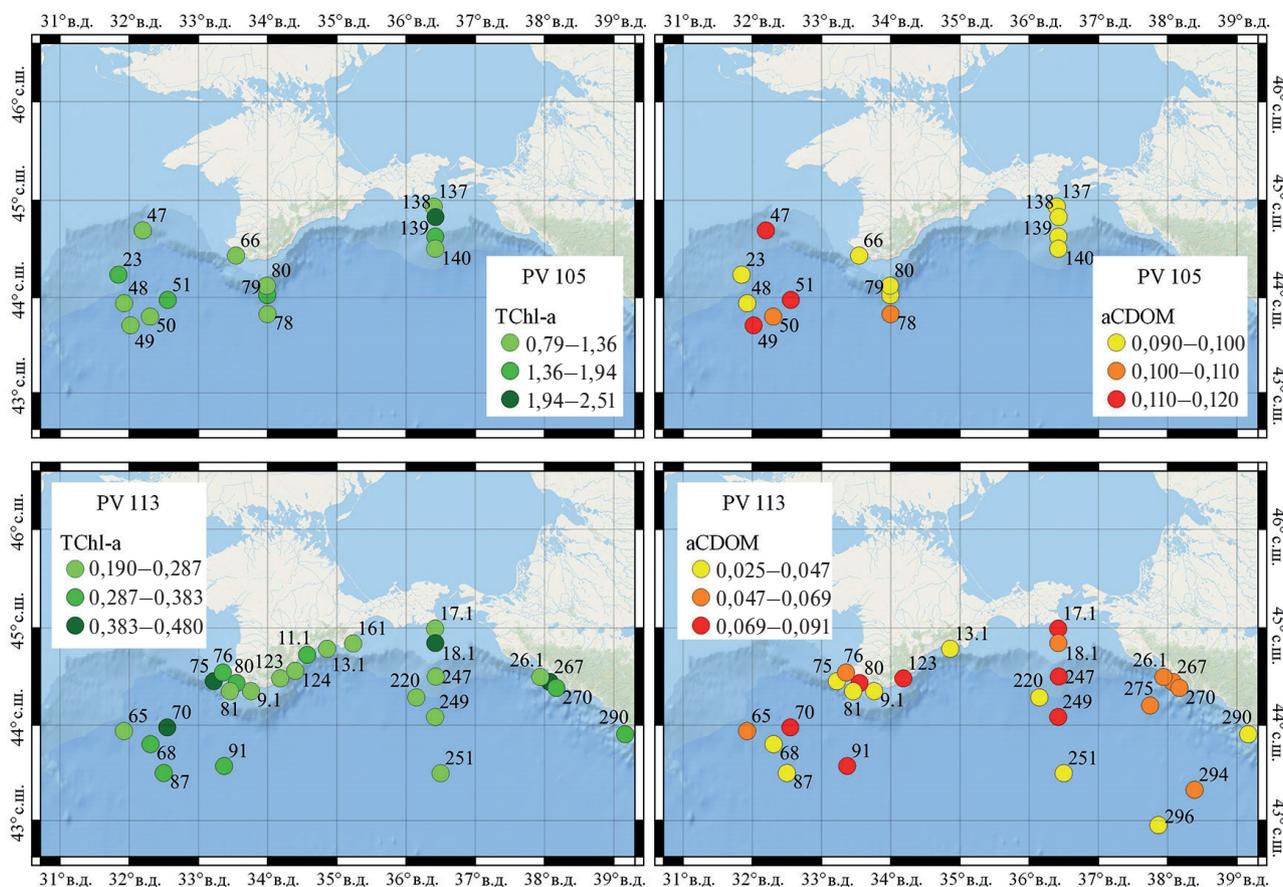


Рис. 1. Распределение концентрации хлорофилла *a* (TChl-*a*, мг м⁻³) и показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом на длине волны 438 нм ($a_{CDOM}(438)$, м⁻¹) в поверхностном слое моря с 24 ноября по 10 декабря 2018 г. (PV105 рейс НИС «Профессор Водяницкий», верхняя панель), с 4 по 24 июня 2020 г. (PV113 рейс НИС «Профессор Водяницкий», нижняя панель)

Fig. 1. Distribution of chlorophyll *a* concentration (TChl-*a*, mg m⁻³) and the light absorption coefficient by colored dissolved organic matter at 438 nm ($a_{CDOM}(438)$, m⁻¹) in the sea surface layer from 24 November to 10 December 2018 (in the research cruises PV105 R/V “Professor Vodyanitsky”, upper panel) and from 4 to 24 June 2020 (in the research cruises PV113 R/V “Professor Vodyanitsky”, bottom panel)

Зону фотосинтеза (Z_{eu}) определяли по глубине, на которую проникает 1 % от величины PAR, падающей на поверхность моря [21]. В PV105 коэффициент диффузного ослабления света в среднем для Z_{eu} и видимого диапазона излучения (400–700 нм) (K_d) рассчитывали, используя зависимость между глубиной видимости белого диска (Z_S) и K_d , установленную для Черного моря [22]. Величина Z_{eu} рассчитывалась по уравнению [9].

$$Z_{eu} = \frac{4,6}{K_d}. \quad (1)$$

Концентрацию пигментов в фитопланктоне определяли спектрофотометрическим методом [23]. Пробы воды фильтровали через стекловолоконные фильтры Whatman GF/F (диаметр 25 мм, размер пор 0,7 мкм), используя слабый вакуум (<0,2 атм). Пигменты фитопланктона экстрагировали в 90 % растворе ацетона (5 мл). Для полной экстракции пигментов использовали двухступенчатый подход и виброгомогенизатор. Экстракты осветляли центрифугированием в течение 5 мин (при центробежном ускорении 5000 g). Измерения проводили в диапазоне длин волн от 350 до 750 нм с шагом в 1 нм на двухлучевом спектрофотометре Lambda 35 (Perkin Elmer).

Спектральные показатели поглощения света CDOM измеряли в соответствии с протоколом [20]. Пробы воды предварительно фильтровали через фильтры GF/F (Whatman), затем фильтровали через нуклеопоровые фильтры (Nucleopore, с диаметром пор 0,2 мкм), которые предварительно промывали, профильтровывая через фильтр 100 мл деионизированной воды. Оптическую плотность пробы ($OD_{CDOM}(\lambda)$) измеряли

в кварцевых кюветах в диапазоне длин волн от 250 до 750 нм с шагом в 1 нм на двухлучевом спектрофотометре Lambda 35 (Perkin Elmer). В качестве сравнения использовали деионизированную воду. Показатель поглощения света CDOM ($a_{CDOM}(\lambda)$, m^{-1}) рассчитывали:

$$a_{CDOM}(\lambda) = 2,303 \frac{OD_{CDOM}(\lambda)}{l}, \quad (2)$$

где 2,303 — коэффициент перехода от логарифмов с основанием 10 к натуральным логарифмам; $OD_{CDOM}(\lambda)$ — оптическая плотность пробы; l — длина оптического пути кварцевой кюветы, $l = 0,1$ м.

Спектр $a_{CDOM}(\lambda)$ описывается экспоненциальной функцией в соответствии с [9]:

$$a_{CDOM}(\lambda) = a_{CDOM}(\lambda_r) e^{(-S_{CDOM}(\lambda - \lambda_r))}, \quad (3)$$

где λ_r — это выбранная длина волны, в настоящих исследованиях $\lambda_r = 438$ нм, S_{CDOM} — спектральный наклон $a_{CDOM}(\lambda)$, в nm^{-1} . S_{CDOM} определяли методом наименьших квадратов в диапазоне длин волн 350–500 нм после логарифмирования спектра поглощения CDOM. Полученные параметры $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} позволяют восстанавливать спектр $a_{CDOM}(\lambda)$ и используются для анализа изменчивости $a_{CDOM}(\lambda)$ [24, 25] и в алгоритмах светового поля, первичной продукции [26], восстановления первичных гидрооптических характеристик по спутниковым данным [27].

3. Результаты и обсуждение

Вертикальное распределение TChl-*a* зимой (конец ноября — начало декабря 2018 г.) в Черном море имело однородный характер в пределах слоя с одинаковой температурой (рис. 2). Зимнее однородное распределение TChl-*a* в пределах верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) обусловлено характерным для этого сезона активным конвективным перемешиванием вод, вызванным охлаждением поверхностного слоя вод [28]. ВКС в период работ варьировал на большинстве станций от 23 до 42 м (в среднем составляя 34 ± 11 м) и только на 66 станции отмечено заглубление ВКС до 69 м, что, по-видимому, связано с высокой динамикой вод в этом прибрежном районе моря. Температурный градиент, ограничивающий ВКС, изменялся на порядок ($0,24$ – $2,0$ °C m^{-1}) и в среднем составлял $1,0 \pm 0,64$ °C m^{-1} . Зона фотосинтеза варьировала в узком диапазоне (24–32 м, в среднем $27 \pm 3,5$ м), за исключением одной станции (ст. 47), где Z_{eu} равнялась 18 м. Соотношение между слоями ВКС и Z_{eu} изменялось в пределах от 0,82 до 2,7 и в среднем составляло $1,3 \pm 0,49$. Это свидетельствует о том, что зона фотосинтеза на отдельных станциях была соизмерима с ВКС, а на большинстве станций зона фотосинтеза составляла только часть ВКС. Значения TChl-*a* в ВКС в районе исследований (рис. 1) изменялись в пределах $0,79$ – $2,5$ мг m^{-3} , в среднем составляя $1,1 \pm 0,43$ мг m^{-3} . Глубже ВКС отмечается резкое снижение значений TChl-*a* (рис. 2). Характер вертикального распределения TChl-*a* соответствует описанному ранее [29].

В летнее время в связи с прогревом поверхностных вод моря и сезонной стратификацией в верхней части зоны фотосинтеза формируется ВКС [28]. В июне 2020 г. ВКС в районе исследований варьировал от 5,0 до 30 м (в среднем $18 \pm 5,9$ м). Температурный градиент ($0,67$ – $3,1$ °C m^{-1} , в среднем $1,7 \pm 0,65$ °C m^{-1}) разделял зону фотосинтеза на квазиизолированные слои, которые различаются по условиям существования фитопланктона — температуре воды и освещенности (рис. 2). Следует отметить, что на отдельных станциях (примерно на половине из числа исследованных станций) отмечали двухступенчатую стратификацию вод с двумя выраженными градиентами температуры (1 °C m^{-1} и более) на глубинах 5–10 м и 15–20 м (рис. 2). Зона фотосинтеза в районе работ распространялась до глубин 22–40 м, в среднем — до $31 \pm 5,7$ м. Летом наблюдали более сложный характер вертикального распределения TChl-*a* в сравнении с зимой (рис. 2, 3). Для профиля TChl-*a* характерны низкие значения ($0,19$ – $0,48$ мг m^{-3} , в среднем $0,32 \pm 0,11$ мг m^{-3}) в ВКС и наличие глубинного максимума вблизи нижней границы зоны фотосинтеза (1 % PAR) — на глубинах 20–50 м (рис. 2, 3). В слое максимума значения TChl-*a* достигали $0,70$ – $1,2$ мг m^{-3} , что в 2–3 раза превышало значения TChl-*a* в поверхностном слое моря. На нескольких станциях из числа тех, где отмечена двухступенчатая сезонная стратификация вод в слое градиента (второго от поверхности моря), отмечен локальный максимум флуоресценции хлорофилла *a* (рис. 2). Скачок флуоресценции в плотностном градиенте может быть связан с физиологическими изменениями в клетках микроводорослей, локализованных в слое плотностного градиента, а именно увеличением внутриклеточного содержания хлорофилла *a* [29–31] как адаптивная реакция микроводорослей на снижение света на этих глубинах в сравнении с ВКС.

Концентрация хлорофилла «а» и поглощение света окрашенным растворенным органическим веществом в Черном море...
 Chlorophyll "a" concentration and light absorption by colored dissolved organic matter in the Black Sea...

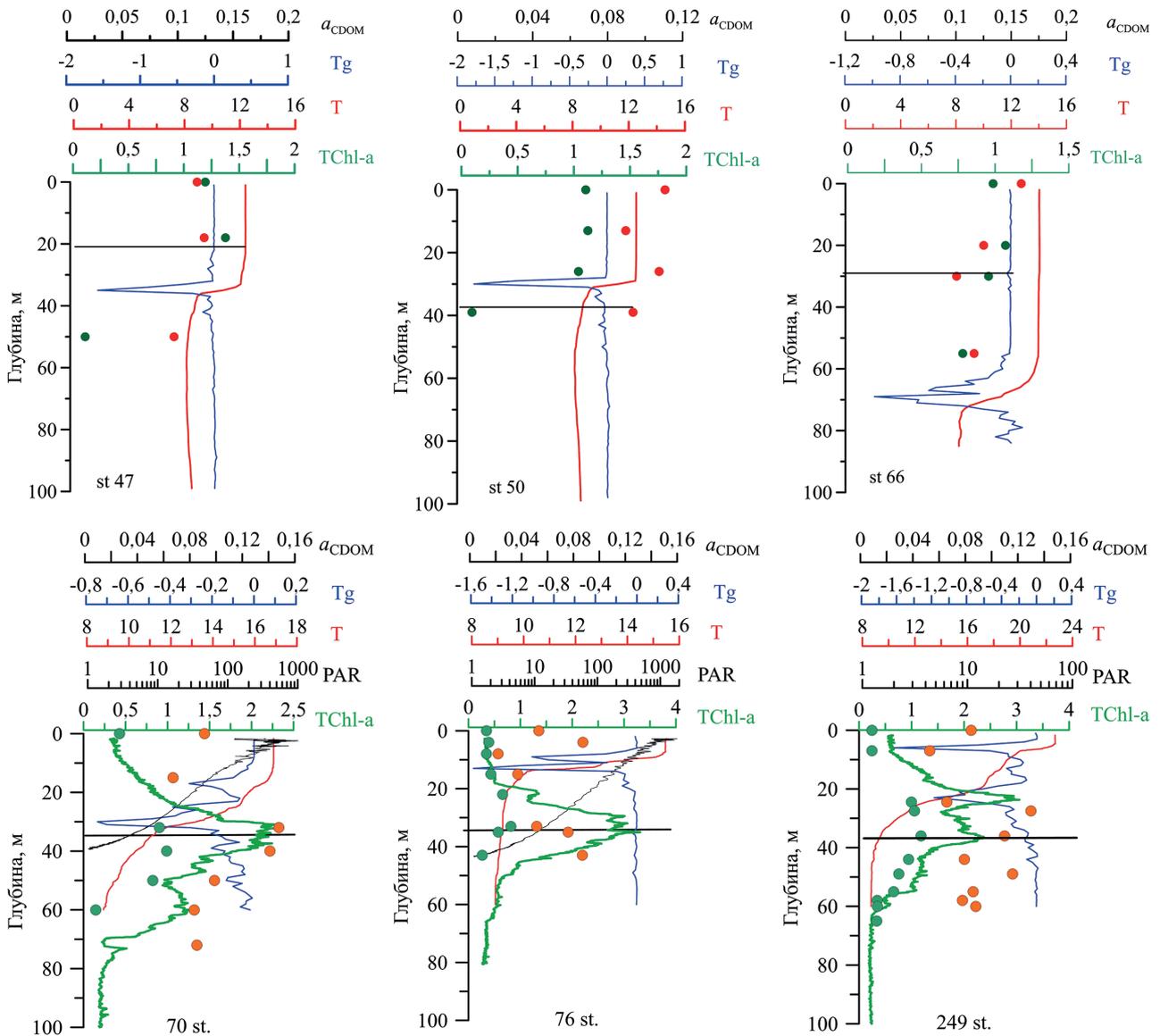


Рис. 2. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла *a* (TChl-*a*, mg m^{-3}) по результатам измерений его интенсивности флуоресценции погружным зондом (зеленая линия) и спектрофотометрическим методом (зеленые кружки); температуры воды (*T*, красная линия), температурного градиента (*Tg*, синяя линия), фотосинтетически активной радиации (PAR, черная линия) и показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом на длине волны 438 нм (a_{CDOM} , m^{-1} , красные символы) для отдельных станций в рейсах PV105 (верхняя панель) и PV113 (нижняя панель) НИС «Профессор Водяницкий». Черная горизонтальная линия обозначает 1 % PAR

Fig. 2. Vertical distribution of chlorophyll *a* concentration (TChl-*a*, mg m^{-3}) based on the results of measurements of its fluorescence intensity with a submersible probe (green line) and using the spectrophotometric method (green circles); water temperature (*T*, red line), temperature gradient (*Tg*, blue line), photosynthetically available radiation (PAR, black line) and light absorption coefficient by coloured dissolved organic matter at 438 nm (a_{CDOM} , m^{-1} , red symbols) for particular stations in the research cruises PV105 (top panel) and PV113 (bottom panel) R/V “Professor Vodyanitsky”. The black horizontal line shows 1 % PAR

Сезонные различия в вертикальном распределении TChl-*a* обусловлены сезонными особенностями гидрологической структуры, а именно наличием плотностной стратификации вод в пределах зоны фотосинтеза летом и ее отсутствием — зимой. Влияние соотношения между ВКС и Z_{eu} на характер вертикального распределения TChl-*a* отмечалось в разных районах Мирового океана [32], что объясняется фундаментальными закономерностями изменения содержания хлорофилла *a* в клетках фитопланктона в зависимости от условий среды [33, 34]. Наличие сезонной температурной стратификации вод в пределах зоны фотосинтеза приводит к формированию квазиизолированных слоев, где фитопланктон адаптируется к условиям среды в слое существования [29–31]. В результате адаптивного изменения внутриклеточной концентрации

хлорофилла *a* вертикальное распределение TChl-*a* отличается от профиля биомассы фитопланктона при условии сезонной стратификации вод в пределах зоны фотосинтеза [35]. На отдельных станциях (рис. 2) на профиле флуоресценции хлорофилла *a* глубже основного максимума отмечен небольшой пик на глубинах, куда проникает свет около 0,1 % PAR, падающей на поверхность моря. Такой максимум флуоресценции связан с одноклеточными цианобактериями, которые составляли основную часть биомассы фитопланктона на этих глубинах, что обусловлено их более высокой эффективностью поглощения сине-зеленого света, проникающего на эти глубины [36].

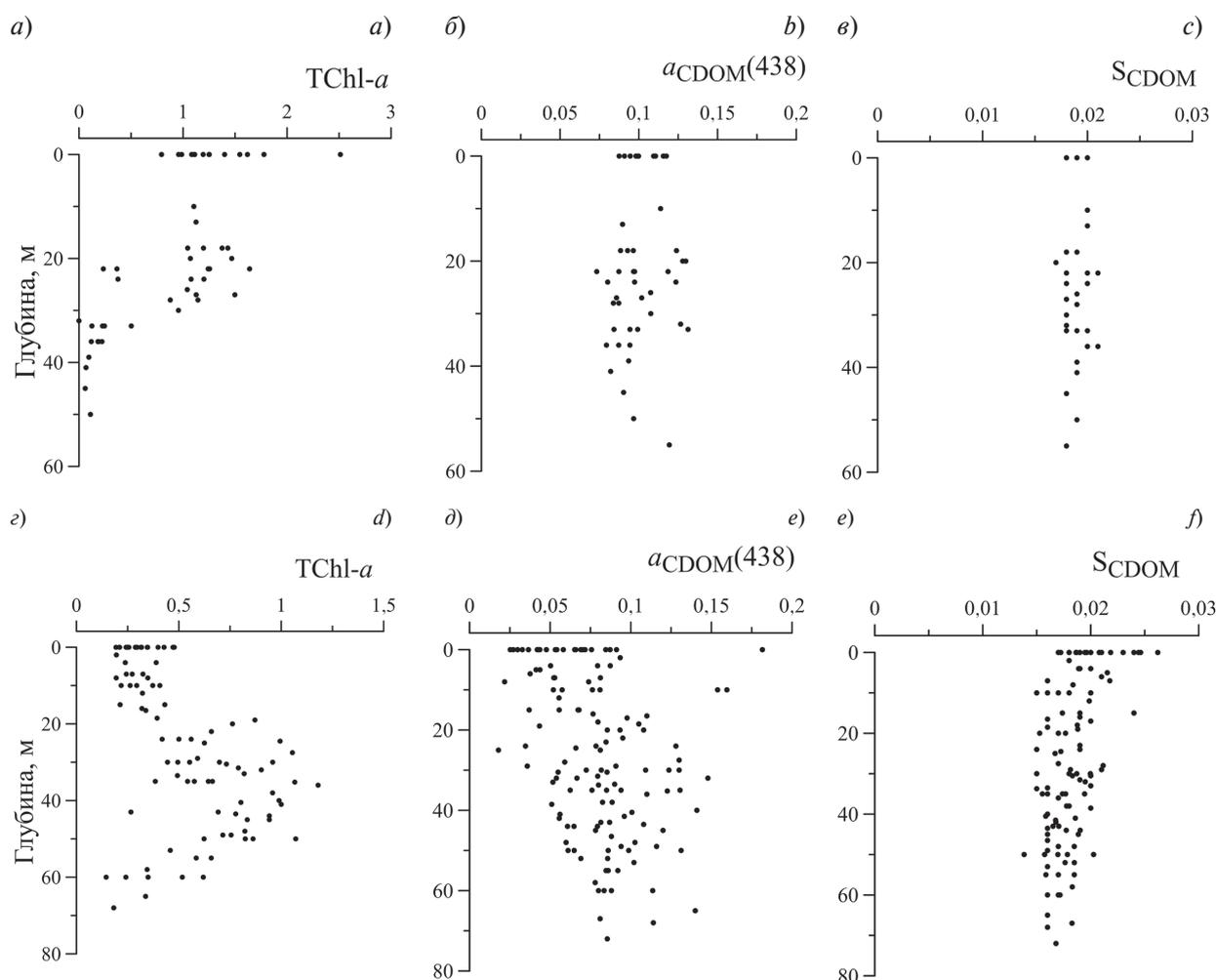


Рис. 3. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла *a* (TChl-*a*, мг м⁻³) (а, з), показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом на длине волны 438 нм ($a_{CDOM}(438)$, м⁻¹) (б, д), спектрального наклона (S_{CDOM} , нм⁻¹) (в, е) в рейсах PV105 (верхняя панель) и PV113 (нижняя панель) НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 3. Vertical distribution of chlorophyll *a* concentration (TChl-*a*, mg m⁻³) (а, d), of the light absorption coefficient by colored dissolved organic matter at 438 nm ($a_{CDOM}(438)$, m⁻¹) (б, e), spectral slope (S_{CDOM} , nm⁻¹) (в, f) in research cruises PV105 (top panel) and PV113 (bottom panel) of the R/V “Professor Vodyanitsky”

В конце ноября — начале декабря 2018 г. отмечено практически равномерное распределение $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} в слое 0–60 м (рис. 2, 3). Значения $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} были в пределах 0,070–0,13 м⁻¹ ($0,10 \pm \pm 0,015$ м⁻¹) и 0,017–0,021 нм⁻¹ ($0,019 \pm 0,0010$ нм⁻¹), соответственно. При этом следует отметить, что ВКС не отличался по значениям $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} от ниже расположенного слоя (рис. 3). Связи между TChl-*a* и $a_{CDOM}(438)$ не отмечено (коэффициент детерминации, $r^2 = 0,11$) (рис. 4).

В июне 2020 г. в ВКС значения $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} изменялись от 0,025 до 0,14 м⁻¹ ($0,062 \pm 0,025$ м⁻¹) и от 0,015 до 0,026 нм⁻¹ ($0,019 \pm 0,0029$ нм⁻¹), соответственно. В слое моря, расположенном глубже ВКС, значения показателя $a_{CDOM}(438)$ изменялись от 0,034 до 0,15 м⁻¹, среднее значение этого параметра ($0,086 \pm \pm 0,023$ м⁻¹) было больше, чем отмечено в ВКС ($0,062 \pm 0,025$ м⁻¹). Значения S_{CDOM} (0,014–0,021 нм⁻¹, в сред-

нем $0,018 \pm 0,0022 \text{ м}^{-1}$) в этом слое были несколько ниже значений, полученных для ВКС. На массиве летних данных очевиден тренд к увеличению значений $a_{CDOM}(438)$ с глубиной (рис. 3, д): от $0,060 \pm 0,032 \text{ м}^{-1}$ в поверхностном слое до $0,090 \pm 0,022 \text{ м}^{-1}$ глубже 40 м. В изменениях значений S_{CDOM} с глубиной наблюдается обратный по характеру тренд (рис. 3, е): от $0,019 \pm 0,032 \text{ м}^{-1}$ в поверхностном слое до $0,017 \pm 0,014 \text{ м}^{-1}$ глубже 40 м. Суточная динамика значений S_{CDOM} в поверхностном слое моря отражает повышение значений от минимальных ($0,017 \text{ м}^{-1}$) в ночное время до максимальных ($0,026 \text{ м}^{-1}$) после полудня (около 16 ч) с последующим понижением значений до $0,018 \text{ м}^{-1}$ (рис. 5, а). Суточная динамика S_{CDOM} связана с фотодеструкцией CDOM в поверхностном слое моря [37]. Под воздействием высокой освещенности высокомолекулярные органические соединения разрушаются, образуя низкомолекулярные соединения, что сопровождается увеличением S_{CDOM} и понижением $a_{CDOM}(438)$ [24]. Фотодеструкцию CDOM наблюдали в поверхностном слое моря летом (рис. 5, б). Этому периоду соответствует максимальная в годовом цикле интенсивность солнечной радиации [38], падающей на поверхность моря, и относительно узкий слой ВКС (рис. 3). В результате этого РОВ в поверхностном слое моря находится при более высокой освещенности чем зимой, когда инсоляция моря ниже [38] и слой ВКС больше (рис. 3). При этом степень проявления фотодеструкции CDOM связана со временем дня (рис. 5, а), что косвенно отражает суточную динамику интенсивности солнечной инсоляции. Между значениями S_{CDOM} и $a_{CDOM}(438)$ установлена обратная зависимость (рис. 5, б), которую отмечали и в других регионах Мирового океана [39–43]. Для летнего периода

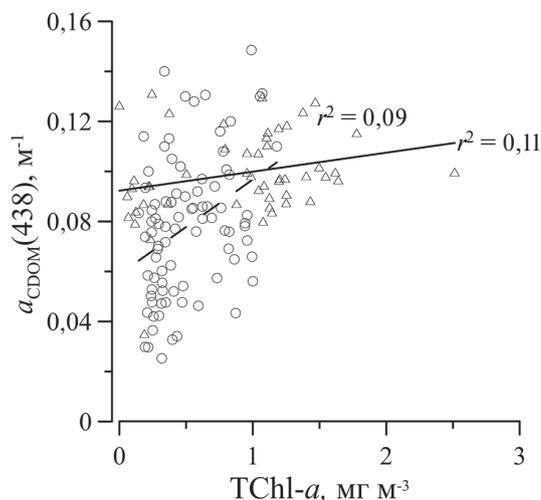


Рис. 4. Зависимость показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом на длине волны 438 нм ($a_{CDOM}(438)$, м^{-1}) от концентрации хлорофилла а (TChl-a, мг м^{-3}) в рейсах PVI05 (треугольник) и PVI13 (кружок) НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 4. Dependence of the light absorption coefficient of colored dissolved organic matter at 438 nm ($a_{CDOM}(438)$, м^{-1}) on the chlorophyll a concentration (TChl-a, мг м^{-3}) in research cruises PVI05 (triangle) and PVI13 (circle) of the R/V “Professor Vodyanitsky”

установлена обратная зависимость (рис. 5, б), которую отмечали и в других регионах Мирового океана [39–43]. Для летнего периода

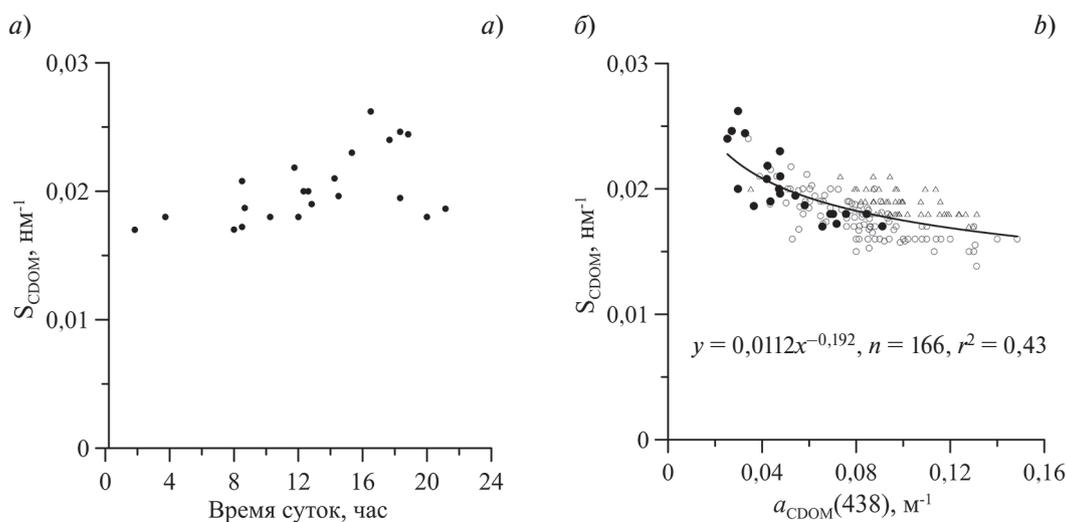


Рис. 5. Суточная динамика спектрального наклона показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом (S_{CDOM}) (а) и зависимость S_{CDOM} от показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом на длине волны 438 нм ($a_{CDOM}(438)$) в конце ноября 2018 г. (треугольник) и в июне 2020 г. (б): в поверхностном слое моря (заштрихованный кружок) и на остальных глубинах (незаштрихованный кружок)

Fig. 5. Daily dynamics of the spectral slope of the light absorption coefficient of the colored dissolved organic matter S_{CDOM} (а) and dependence on the light absorption coefficient of the colored dissolved organic matter at 438 nm ($a_{CDOM}(438)$) at the end of November 2018 (triangle) and in June 2020 (b): in the sea surface layer (filled circle) and all depths (open circle)

аналогично зимнему не установлено связи между $a_{CDOM}(438)$ и TChl-*a* (рис. 4). В зависимости от источников поступления различают автохтонное и аллохтонное растворенное органическое вещество, частью которого является CDOM [39]. Поступление автохтонного CDOM в водную среду связано с биологической активностью фитопланктона, зоопланктона, бактерий и вирусов [39]. Аллохтонное органическое вещество привносится с суши [30], поэтому в районах, не подверженных береговому стоку, возможна корреляция между концентрацией основного фотосинтетически активного пигмента — хлорофилла *a* и содержанием CDOM, маркером которого служит $a_{CDOM}(\lambda)$. Для большинства акваторий связи между этими параметрами не установлено [11, 40, 41, 44, 45]. Это связано с тем, что содержание CDOM и его химический состав зависят от множества факторов, как биологических (фотосинтетическая активность фитопланктона, бактериальная деградация, вирусный лизис и т. д.), так и физических (фотодеструкция) [37, 39, 46, 47]. Состав CDOM определяет форму спектра поглощения света [37, 39, 48, 49]. Изменение химического состава CDOM в поверхностном слое вод часто связано с фотодеструкцией, в результате которой доля высокомолекулярных соединений CDOM уменьшается, а низкомолекулярных — увеличивается [37, 39]. В результате многофакторности и разной направленности их влияния сложно выявить связь между $a_{CDOM}(\lambda)$ и содержанием фитопланктона в акваториях, не подверженных береговому стоку и поступлению CDOM терригенной природы.

Анализ распределения $a_{CDOM}(438)$ и TChl-*a* в поверхностном слое моря показал, что диапазон изменчивости исследуемых параметров одинаковый в глубоководных и прибрежных районах (рис. 1). Для зимы получено ограниченное количество данных в прибрежных водах (2 станции), что не позволяет проводить сравнение районов. В летний период значения TChl-*a* в поверхностном слое прибрежных вод Крымского полуострова ($0,19\text{--}0,35 \text{ мг м}^{-3}$), вблизи Керченского пролива ($0,20\text{--}0,47 \text{ мг м}^{-3}$) не отличались от отмеченных в глубоководной части моря ($0,21\text{--}0,43 \text{ мг м}^{-3}$). В районе северо-восточного побережья отмечены несколько повышенные значения TChl-*a* ($0,29\text{--}0,48 \text{ мг м}^{-3}$) в сравнении с глубоководными районами. Значения показателя $a_{CDOM}(438)$ в районе Крымского полуострова ($0,030\text{--}0,076 \text{ м}^{-1}$) и северо-восточного побережья моря ($0,042\text{--}0,069 \text{ м}^{-1}$) соответствуют данным, полученным в глубоководных районах моря ($0,025\text{--}0,091 \text{ м}^{-1}$). Повышенными значениями $a_{CDOM}(438)$ ($0,048\text{--}0,093 \text{ м}^{-1}$) выделяется район вблизи Керченского пролива, что возможно, связано с поступлением вод Азовского моря, где значения $a_{CDOM}(438)$ на порядок превышают черноморские значения [50]. Однако влияния вод Азовского моря на TChl-*a* не наблюдалось, хотя исследования в этом же рейсе показали, что значения TChl-*a* в водах Азовского моря, прилегающих к Керченскому проливу, были на порядок выше, чем в Черном море [50]. Анализ причин отмеченного различия требует дополнительных исследований не только распределения концентрации биогенных элементов, но и динамики их ассимиляции в процессе фотосинтеза и выедания фитопланктона зоопланктоном, которые планируется провести в дальнейшем.

4. Заключение

Получены новые для Черного моря данные о поглощении света CDOM в зимний и летний периоды года. Зимой в поверхностном слое моря содержание CDOM, маркером которого является показатель $a_{CDOM}(438)$ ($0,10\pm 0,015 \text{ м}^{-1}$), превышало летние значения ($0,062\pm 0,025 \text{ м}^{-1}$). Сезонных различий по средним значениям спектрального наклона S_{CDOM} не установлено: зимой — $0,019 \pm 0,0010 \text{ нм}^{-1}$ и летом $0,019 \pm 0,0029 \text{ нм}^{-1}$. Однако вариабельность значений S_{CDOM} летом отмечена в более широком диапазоне (от $0,015$ до $0,026 \text{ нм}^{-1}$), чем зимой (от $0,017$ до $0,021 \text{ нм}^{-1}$), что связано с фотодеструкцией CDOM, которая ведет к повышению значений S_{CDOM} в поверхностном слое моря летом. Установлена обратная связь между $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} , которая описывается степенной зависимостью.

Установлены сезонные особенности в вертикальном распределении показателя поглощения CDOM и спектрального наклона. Для зимы характерно однородное распределение $a_{CDOM}(438)$ и S_{CDOM} в пределах всего исследованного слоя, летом отмечается тренд к увеличению с глубиной $a_{CDOM}(438)$ и снижению — S_{CDOM} .

Показаны сезонные различия в содержании хлорофилла *a* в ВКС (зимой — $1,1 \pm 0,43 \text{ мг м}^{-3}$ и летом — $0,32 \pm 0,11 \text{ мг м}^{-3}$) и в характере вертикального распределения TChl-*a*, обусловленные гидрологической структурой вод: зимой — однородное распределение в пределах ВКС, который соизмерим или превышает зону фотосинтеза, летом — наличие слоя максимальных концентраций хлорофилла *a* вблизи нижней границы зоны фотосинтеза. Связи между $a_{CDOM}(438)$ и TChl-*a* не выявлено.

Благодарности

Авторы благодарны ведущему инженеру лаборатории фотосинтеза и биооптики моря ФИЦ ИнБЮМ Землянской Е.А. за участие в отборе и первичной обработке проб.

Acknowledgments

The authors are grateful to the leading engineer of the laboratory of photosynthesis and marine bio-optics of the IBSS Zemlyanskaya E.A. for her participation in the sampling and primary processing of the samples.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания № 124030100106–2 тема «Исследование региональных особенностей биооптических показателей водоемов как основы дешифрования данных дистанционного зондирования для оценки мультимасштабной изменчивости первично продукционных характеристик пелагических экосистем».

Funding

The present study was carried out within the framework of state assignment № 124030100106–2 “Study of regional bio-optical properties for development of satellite algorithm for assessment of multi-scale variability of primary production characteristics of pelagic ecosystems”.

Литература

1. *Mobley C.D.* The Oceanic Optics Book. Dartmouth: International Ocean Colour Coordinating Group, 2022. 924 p.
2. *Kopelevich O.V.* et al. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004. Vol. 51, N 10–11. P. 1063–1091. doi:10.1016/j.dsr2.2003.10.009
3. *Nelson J.R., Guarda S.* Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the southeastern United States // *Journal of Geophysical Research*. 1995. Vol. 100. N C5. P. 8715–8732. doi:10.1029/95JC00222
4. *Bricaud A.* et al. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. Vol. 103. N C13. P. 31033–31044. doi:10.1029/98JC02712f
5. *Bricaud A.* et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // *Journal of Geophysical Research*. 1995. Vol. 100. N C7. P. 13321–13332. doi:10.1029/95JC00463
6. *Hoepffner N., Sathyendranath S.* Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton // *Marine Ecology-Progress Series*. 1991. Vol. 73. P. 11–23.
7. *Hooker S.B.* et al. SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series Vol. 11, SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Technical Memorandum. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center. 2000. 49 p.
8. *Groom S.* et al. Satellite Ocean Colour: Current Status and Future Perspective // *Frontiers Marine Science*. 2019. Vol. 6:485. doi:10.3389/fmars.2019.00485
9. *Kirk J.T.O.* Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. 3rd. Cambridge: University Press, 2011. 665 p.
10. *Falkowski P.G., Raven J.A.* Aquatic Photosynthesis. 2nd edn. Oxford: Princeton University Press, 2007. 484 p.
11. *Ferreira A., Garcia V.M.T., Garcia C.A.E.* Light absorption by phytoplankton, non-algal particles and dissolved organic matter at the Patagonia shelf-break in spring and summer // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2009. Vol. 56, N 12. P. 2162–2174. doi:10.1016/j.dsr.2009.08.002
12. *Tilstone G.H.* et al. High concentrations of mycosporine-like amino acids and colored dissolved organic matter in the sea surface microlayer off the Iberian Peninsula // *Limnology and Oceanography*. 2010. Vol. 55, N 5. P. 1835–1850. doi:10.4319/lo.2010.55.5.1835
13. *Matsuoka A.* et al. Tracing the transport of colored dissolved organic matter in water masses of the Southern Beaufort Sea: relationship with hydrographic characteristics // *Biogeosciences*. 2012. Vol. 9, N 3. P. 925–940. doi:10.5194/bg-9-925-2012
14. *Nelson N.B., Siegel D.A.* The Global Distribution and Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter // *Annual Review of Marine Science*. 2013. Vol. 5, N 1. P. 447–476. doi:10.1146/annurev-marine-120710-100751
15. *D'Sa E.J.* et al. Absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter of the eastern Bering Sea in the summer with special reference to the influence of a cold pool // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11, N 12. P. 3225–3244. doi:10.5194/bg-11-3225-2014
16. *Churilova T.* et al. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in the Crimean coastal waters (the Black Sea) // *Proceedings of SPIE: 23th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2017. Vol. 10466. P. 245. doi:10.1117/12.2288339

17. Efimova T.V. et al. Spectral bio-optical properties of the Black Sea coastal waters (near Sevastopol) in summer 2020–2021 // Proceedings of SPIE: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2022. Vol. 12341, N123414U. doi:10.1117/12.2645084
18. Yushmanova A. et al. Inter-Annual Variability of the Seawater Light Absorption in Surface Layer of the Northeastern Black Sea in Connection with Hydrometeorological Factors // Journal of Marine Science and Engineering. 2019. Vol. 7, N 9. P. 326. doi:10.3390/jmse7090326
19. Pogosyan S.I. et al. Absorption spectroscopy of microalgae, cyanobacteria, and dissolved organic matter: Measurements in an integrating sphere cavity / Ed. by D.C. Wash // Oceanology. 2009. N49. P. 866–871.
20. Mannino A. et al. Measurement protocol of absorption by Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) and other dissolved materials // IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation, 2019.
21. Morel A., Berthon J. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications // Limnology and Oceanography. 1989. Vol. 34, N 8. P. 1545–1562. doi:10.4319/lo.1989.34.8.1545
22. Ведерников В.И. Первичная продукция и хлорофилл в Черном море в летне-осенний период // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ // Сборник научных работ / ред. Виноградов М.Е. и Флинт М.В. М.: Наука, 1989. С. 65–83.
23. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemie und Physiologie der Pflanzen. 1975. Vol. 167, N 2. P. 191–194.
24. Helms J.R. et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // Limnology and Oceanography. 2008. Vol. 53, N. 3. P. 955–969. doi:10.4319/lo.2008.53.3.0955
25. Vähätalo A.V., Wetzel R.G. Photochemical and microbial decomposition of chromophoric dissolved organic matter during long (months–years) exposures // Marine Chemistry. 2004. Vol. 89. P. 313–326. doi:10.1016/j.marchem.2004.03.010
26. Чурилова Т.Я. и др. Спектральный подход к оценке скорости фотосинтеза фитопланктона в Черном море по спутниковой информации: методологические аспекты развития региональной модели // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Биология». 2016. Т. 9, № 4. С. 367–384.
27. Schwarz J. et al. Two models for absorption by coloured dissolved organic matter (CDOM) // Oceanologia. 2002. Vol. 44, N 2. P. 209–241.
28. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: НАН Украины, Морской гидрофизический институт, 2011. 209 с.
29. Finenko Z., Churilova T., Lee R. Dynamics of the Vertical Distributions of Chlorophyll and Phytoplankton Biomass in the Black Sea // Oceanology. 2005. Vol. 45, Suppl. 1. P. 112–126.
30. Geider R.J., MacIntyre H.L., Kana T.M. Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: responses of the balanced growth rate and chlorophyll a: carbon ratio to light, nutrient limitation and temperature // Marine Ecology Progress Series. 1997. Vol. 148. P. 187–200. doi:10.3354/meps148187
31. MacIntyre H.L. et al. Photoacclimation of Photosynthesis Irradiance Response Curves and Photosynthetic Pigments in Microalgae and Cyanobacteria // Journal of Phycology. 2002. Vol. 38, N1. P. 17–38. doi:10.0000/135184797337543
32. Babin M. et al. Nitrogen- and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1996. Vol. 43, N 8. P. 1241–1272. doi:10.1016/0967-0637(96)00058-1
33. Финенко З.З. и др. Действие света, температуры и биогенных элементов на отношение углерод фитопланктона: хлорофилл а // Морской экологический журнал. 2003. Т. 2, № 2. С. 40–64.
34. Falkowski P.G., Owens T.G. Light — Shade Adaptation: Two Strategies In Marine Phytoplankton // Plant Physiology. 1980. Vol. 66. N 4. P. 592–595. doi:10.1104/pp.66.4.592
35. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Ли Р.И. Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Черном море // Морской экологический журнал. 2005. Т. 4, № 1. С. 15–45.
36. Churilova T. et al. Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea // European Journal of Remote Sensing. 2019. Vol. 52. P. 123–136. doi:10.1080/22797254.2018.1533389
37. Twardowski M.S., Donaghay P.L. Photobleaching of aquatic dissolved materials: Absorption removal, spectral alteration, and their interrelationship // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2002. Vol. 107, N C8. doi:10.1029/1999JC000281
38. Suslin V.V., Korolev S.N., Kucheryaviy A.A., Churilova T.Y., Krivenko O.V. Photosynthetically available radiation on surface of the Black Sea based on Ocean Color data // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 2015. P. 96800T.

39. Nelson N.B., Siegel D.A. Chromophoric DOM in the Open Ocean // *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. Elsevier. 2002. P. 547–578.
40. Churilova T. et al. Parameterization of Light Absorption of Phytoplankton, Non-Algal Particles and Coloured Dissolved Organic Matter in the Atlantic Region of the Southern Ocean (Austral Summer of 2020) // *Remote Sensing. Seawater Bio-Optical Characteristics from Satellite Ocean Color Data II*, 2023. Vol. 15, N 3. P. 634. doi:10.3390/rs15030634
41. Efimova T. et al. Light Absorption by Optically Active Components in the Arctic Region (August 2020) and the Possibility of Application to Satellite Products for Water Quality Assessment // *Remote Sensing*, 2023. Vol. 15, N 17. P. 4346.
42. Matsuoka A. et al. Seasonal variability in the light absorption properties of western Arctic waters: Parameterization of the individual components of absorption for ocean color applications // *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2011. Vol. 116, N2. doi:10.1029/2009JC005594
43. Ferreira A., Ciotti Á.M., Garcia C.A.E. Bio-optical characterization of the northern Antarctic Peninsula waters: Absorption budget and insights on particulate backscattering // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018. Vol. 149. P. 138–149. doi:10.1016/j.dsr2.2017.09.007
44. Bricaud A. et al. Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters // *Journal of Geophysical Research*. 2010. Vol. 115, N C8. P. C08009. doi:10.1029/2009JC005517
45. Babin M., Stramski D., Ferrari G.M., Claustre H., Bricaud A., Obolensky G., Hoepffner N. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe // *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2003. Vol. 108, N C7. doi:10.1029/2001JC000882
46. Gonçalves-Araujo R., Röttgers R., Haraguchi L., Brandini F.P. Hydrography-Driven Variability of Optically Active Constituents of Water in the South Brazilian Bight: Biogeochemical Implications // *Frontiers Marine Science*. 2019. Vol. 6. doi:10.3389/fmars.2019.00716
47. Carder K.L., Steward R. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll // *Limnology and Oceanography*. 1989. Vol. 34. P. 68–81. doi:10.4319/lo.1989.34.1.0068
48. Vantrepotte V. et al. CDOM-DOC relationship in contrasted coastal waters: implication for DOC retrieval from ocean color remote sensing observation // *Optics Express*. 2015. Vol. 23, N 1. P. 33. doi:10.1364/OE.23.000033
49. Danhiez F.P. et al. Optical properties of chromophoric dissolved organic matter during a phytoplankton bloom. Implication for DOC estimates from CDOM absorption // *Limnology and Oceanography*. 2017. Vol. 62, N 4. P. 1409–1425. doi:10.1002/lno.10507
50. Чурилова Т.Я. и др. Спектральные показатели поглощения света взвешенным веществом и растворенным органическим веществом в Азовском море // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 73–83. doi:10.59887/fpg/ex1p-9vtp-phu8

References

1. Mobley C.D. *The Oceanic Optics Book*. Dartmouth: International Ocean Colour Coordinating Group, 2022. 924 p.
2. Kopelevich O.V. et al. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004;51(10–11):1063–1091. doi:10.1016/j.dsr2.2003.10.009
3. Nelson J.R., Guarda S. Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the southeastern United States. *Journal of Geophysical Research*. 1995;100(C5):8715–8732. doi:10.1029/95JC00222
4. Bricaud A. et al. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998;103(C13):31033–31044. doi:10.1029/98JC02712f
5. Bricaud A. et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research*. 1995;100(C7):13321–13332. doi:10.1029/95JC00463
6. Hoepffner N., Sathyendranath S. Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton. *Marine Ecology-Progress Series*. 1991;73:11–23.
7. Hooker S.B. et al. SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series V. 11, SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Technical Memorandum. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000. 49 p.
8. Groom S. et al. Satellite Ocean Colour: Current Status and Future Perspective. *Frontiers Marine Science*. 2019;6:485. doi:10.3389/fmars.2019.00485
9. Kirk J.T.O. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. 3rd. Cambridge: University Press, 2011. 665 p.
10. Falkowski P.G., Raven J.A. *Aquatic Photosynthesis*. 2nd edn. Oxford: Princeton University Press, 2007. 484 p.
11. Ferreira A., Garcia V.M.T., Garcia C.A.E. Light absorption by phytoplankton, non-algal particles and dissolved organic matter at the Patagonia shelf-break in spring and summer. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2009;56(12):2162–2174. doi:10.1016/j.dsr.2009.08.002

12. Tilstone G.H. et al. High concentrations of mycosporine-like amino acids and colored dissolved organic matter in the sea surface microlayer off the Iberian Peninsula. *Limnology and Oceanography*. 2010;55(5):1835–1850. doi:10.4319/lo.2010.55.5.1835
13. Matsuoka A. et al. Tracing the transport of colored dissolved organic matter in water masses of the Southern Beaufort Sea: relationship with hydrographic characteristics. *Biogeosciences*. 2012;9(3):925–940. doi:10.5194/bg-9-925-2012
14. Nelson N.B., Siegel D.A. The Global Distribution and Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter. *Annual Review of Marine Science*. 2013;5(1):447–476. doi:10.1146/annurev-marine-120710-100751
15. D'Sa E.J. et al. Absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter of the eastern Bering Sea in the summer with special reference to the influence of a cold pool. *Biogeosciences*. 2014;11(12):3225–3244. doi:10.5194/bg-11-3225-2014
16. Churilova T. et al. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in the Crimean coastal waters (the Black Sea). *Proceedings of SPIE: 23th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2017;10466:245. doi:10.1117/12.2288339
17. Efimova T.V. et al. Spectral bio-optical properties of the Black Sea coastal waters (near Sevastopol) in summer 2020–2021. *Proceedings of SPIE: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2022;12341:123414U. doi:10.1117/12.2645084
18. Yushmanova A. et al. Inter-Annual Variability of the Seawater Light Absorption in Surface Layer of the Northeastern Black Sea in Connection with Hydrometeorological Factors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019;7(9):326.
19. Pogosyan S.I. et al. Absorption spectroscopy of microalgae, cyanobacteria, and dissolved organic matter: Measurements in an integrating sphere cavity / Ed. by D.C. Wash. *Oceanology*. 2009;49:866–871.
20. Mannino A. et al. Measurement protocol of absorption by Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) and other dissolved materials. *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*, 2019.
21. Morel A., Berthon J. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnology and Oceanography*. 1989;34(8):545–1562. doi:10.4319/lo.1989.34.8.1545
22. Vedernikov V.I. Primary production and chlorophyll in the Black Sea in summer and fall,” in Структура i Produktsionnye Kharakteristiki Planktonnykh Soobshchestv / Ed.by M.E. Vinogradov and M.V. Flint. *Sbornikh Nauchnykh Rabot*. Moscow: Nauka, 1989. 65–83 (in Russian).
23. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*. 1975;167(2):191–194.
24. Helms J.R. et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*. 2008;53(3):955–969. doi:10.4319/lo.2008.53.3.0955
25. Vähätalo A.V., Wetzel R.G. Photochemical and microbial decomposition of chromophoric dissolved organic matter during long (months–years) exposures. *Marine Chemistry*. 2004;89:313–326. doi:10.1016/j.marchem.2004.03.010
26. Churilova T. Ya. et al. Spectral Approach to Assessment of Phytoplankton Photosynthesis Rate in the Black Sea Based on Satellite Information: Methodological Aspects of the Regional Model Development. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2016;9(4):367–384 (in Russian).
27. Schwarz J. et al. Two models for absorption by coloured dissolved organic matter (CDOM). *Oceanologia*. 2002;44(2):209–241.
28. Ivanov V.A., Belokopytov V.N. *Oceanography of the Black Sea*. Sevastopol: NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute, 2011. 209 p. (in Russian).
29. Finenko Z., Churilova T., Lee R. Dynamics of the Vertical Distributions of Chlorophyll and Phytoplankton Biomass in the Black Sea. *Oceanology*. 2005;45.Suppl. 1:112–126.
30. Geider R.J., MacIntyre H.L., Kana T.M. Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: responses of the balanced growth rate and chlorophyll a: carbon ratio to light, nutrient limitation and temperature. *Marine Ecology Progress Series*. 1997;148:187–200. doi:10.3354/meps148187
31. MacIntyre H.L. et al. Photoacclimation of Photosynthesis Irradiance Response Curves and Photosynthetic Pigments in Microalgae and Cyanobacteria. *Journal of Phycology*. 2002;38(1):17–38. doi:10.0000/135184797337543
32. Babin M. et al. Nitrogen- and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1996;43(8):1241–1272. doi:10.1016/0967-0637(96)00058-1
33. Finenko Z.Z. et al. Phytoplankton carbon to chlorophyll a ratio: response to light, temperature and nutrient limitation. *Marine Ecological Journal*. 2003;2(2):40–64 (in Russian).
34. Falkowski P.G., Owens T.G. Light — Shade Adaptation: Two Strategies In Marine Phytoplankton. *Plant Physiology*. 1980;66(4):592–595. doi:10.1104/pp.66.4.592

35. Finenko Z.Z., Churilova T. Ya., Lee R.I. Vertical distribution of chlorophyll and fluorescence in the Black Sea. *Marine Ecological Journal*. 2005;4(1):15–45 (in Russian).
36. Churilova T. et al. Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea. *European Journal of Remote Sensing*. 2019;52:123–136. doi:10.1080/22797254.2018.1533389
37. Twardowski M.S., Donaghay P.L. Photobleaching of aquatic dissolved materials: Absorption removal, spectral alteration, and their interrelationship. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2002;107(C8). doi:10.1029/1999JC000281
38. Suslin V.V., Korolev S.N., Kucheryaviy A.A., Churilova T.Y., Krivenko O.V. Photosynthetically available radiation on surface of the Black Sea based on Ocean Color data. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, Tomsk, 2015. P. 96800T.
39. Nelson N.B., Siegel D.A. Chromophoric DOM in the Open Ocean. *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. Elsevier. 2002, 547–578.
40. Churilova T. et al. Parameterization of Light Absorption of Phytoplankton, Non-Algal Particles and Coloured Dissolved Organic Matter in the Atlantic Region of the Southern Ocean (Austral Summer of 2020). *Remote Sensing. Seawater Bio-Optical Characteristics from Satellite Ocean Color Data II*. 2023;15(3):634. doi:10.3390/rs15030634
41. Efimova T. et al. Light Absorption by Optically Active Components in the Arctic Region (August 2020) and the Possibility of Application to Satellite Products for Water Quality Assessment. *Remote Sensing*. 2023;15(17):4346.
42. Matsuoka A. et al. Seasonal variability in the light absorption properties of western Arctic waters: Parameterization of the individual components of absorption for ocean color applications. *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2011;116(2). doi:10.1029/2009JC005594
43. Ferreira A., Ciotti Á.M., Garcia C.A.E. Bio-optical characterization of the northern Antarctic Peninsula waters: Absorption budget and insights on particulate backscattering. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018;149:138–149. doi:10.1016/j.dsr2.2017.09.007
44. Bricaud A. et al. Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters. *Journal of Geophysical Research*. 2010;115(C8): C08009. doi:10.1029/2009JC005517
45. Babin M., Stramski D., Ferrari G.M., Claustre H., Bricaud A., Obolensky G., Hoepffner N. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2003;108(C7). doi:10.1029/2001JC000882
46. Gonçalves-Araujo R., Röttgers R., Haraguchi L., Brandini F.P. Hydrography-Driven Variability of Optically Active Constituents of Water in the South Brazilian Bight: Biogeochemical Implications. *Frontiers Marine Science*. 2019;6. doi:10.3389/fmars.2019.00716
47. Carder K.L., Steward R. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnology and Oceanography*. 1989;34:68–81. doi:10.4319/lo.1989.34.1.0068
48. Vantrepotte V. et al. CDOM-DOC relationship in contrasted coastal waters: implication for DOC retrieval from ocean color remote sensing observation. *Optics Express*. 2015;23(1):33. doi:10.1364/OE.23.000033
49. Danhiez F.P. et al. Optical properties of chromophoric dissolved organic matter during a phytoplankton bloom. Implication for DOC estimates from CDOM absorption. *Limnology and Oceanography*. 2017;62(4):1409–1425. doi:10.1002/lno.10507
50. Churilova T. Ya. et al. Spectral Light Absorption Coefficient of Particles and Colored Dissolved Organic Matter in the Sea of Azov. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(3):73–83. doi:10.59887/fpg/ex1p-9vtp-phu8 (in Russian).

Об авторах

ЧУРИЛОВА Татьяна Яковлевна, ведущий научный сотрудник ФИЦ ИнБЮМ, кандидат биологических наук, ORCID: 0000-0002-0045-7284, WoS ResearcherID: O-8437-2016, Scopus AuthorID: 6603622802, SPIN-код (РИНЦ): 2238-9533, e-mail: tanya.churilova@ibss-ras.ru

СКОРОХОД Елена Юрьевна, научный сотрудник ФИЦ ИнБЮМ, ORCID: 0000-0002-3057-3964, WoS ResearcherID: A-6831-2019, Scopus AuthorID: 57215009764, SPIN-код (РИНЦ): 3314-5775, e-mail: elenaskorokhod@ibss-ras.ru

ЕФИМОВА Татьяна Владимировна, старший научный сотрудник ФИЦ ИнБЮМ, кандидат биологических наук, ORCID: 0000-0003-3908-4160, WoS ResearcherID: X-1355-2019, Scopus AuthorID: 57194423783, SPIN-код (РИНЦ): 1668-0742, e-mail: tefimova@ibss-ras.ru

МОИСЕЕВА Наталия Александровна, научный сотрудник ФИЦ ИнБЮМ, ORCID: 0000-0003-1356-7981, WoS ResearcherID: AАН-2819-2019, Scopus AuthorID: 57194431032, SPIN-код (РИНЦ): 8946-3315, e-mail: moiseeva@ibss-ras.ru