

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.463.5:581.526.325(262.5)

Сезонная изменчивость вертикального распределения спектральных биооптических показателей прибрежных вод Черного моря в районе г. Севастополя

Д.В. Калмыкова[✉], Т.Я. Чурилова, Т.В. Ефимова, Н.А. Моисеева,
Е.Ю. Скороход, Е.А. Землянская*

ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»
299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2

Поступила в редакцию 20.07.2023;
после доработки 05.09.2023;
принята к печати 21.11.2023

На примере прибрежных вод Черного моря в районе г. Севастополя в 2022–2023 гг. проведено исследование сезонной изменчивости вертикального распределения концентрации хлорофилла *a* (Tchl-*a*), спектральных показателей поглощения света всеми оптически активными компонентами (ОАК) водной среды и спектральных характеристик света. Показано, что Tchl-*a* в зоне фотосинтеза была минимальна зимой (0,66 мг/м³) и максимальна весной (3,57 мг/м³). Установлено доминирование относительного вклада окрашенного растворенного органического вещества в общее поглощение света на длине волны 438 нм во все исследуемые сезоны. Отмечено, что относительный вклад фитопланктона в общее поглощение света всеми ОАК на длине волны 438 нм был наибольшим в летнее время. Доказано, что увеличение общего поглощения света взвешенным и растворенным органическим веществами приводило к сужению зоны фотосинтеза и изменению спектрального состава света в море. Вертикальное распределение Tchl-*a* и ОАК было обусловлено гидрофизическими характеристиками вод.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, фитопланктон, неживое взвешенное вещество, растворенное органическое вещество, поглощение света, Черное море; chlorophyll *a*, phytoplankton, non-algal particles, dissolved organic matter, light absorption, Black Sea.

Введение

В водных экосистемах отмечается высокая вариабельность содержания и соотношения оптически активных компонентов (ОАК) среды, что особенно видно в прибрежных водах, подверженных влиянию берегового и речного стоков [1, 2]. Из-за увеличения антропогенной нагрузки исследования состояния водной экосистемы на основе показателей качества и продуктивности вод становятся все более актуальными. Анализ данных о вертикальном распределении концентрации хлорофилла *a* и спектральных показателей поглощения света всеми ОАК среды позволяет выявить закономерности их изменчивости в зависимости от гидрофизических факторов среды в разные сезоны года.

Цель работы — исследование сезонной изменчивости вертикального распределения концентрации хлорофилла *a*, спектральных показателей поглощения света пигментами фитопланктона, неживым взвешенным веществом (NAP), окрашенным растворенным органическим веществом (CDOM), а также соотношения между ними и спектральных характеристик света в прибрежных водах Черного моря в районе г. Севастополя.

Материалы и методы исследования

Измерения были выполнены в 2022 г. в прибрежных водах на станции, расположенной напротив бухты Севастопольской на расстоянии около мили от берега. Отбор проб воды (5 л) производился на различных горизонтах в слое 0–38 м с помощью батометра. Горизонты для отбора проб выбирали с учетом прозрачности воды, которую оценивали по глубине видимости диска Секки (Z_s). Спектральную квантовую облученность измеряли с помощью погружного спектрорадиометра RAMSES (TriOS) с шагом в 1 м. Нижнюю границу зоны фотосинтеза (Z_{eu}) в Черном море оценивали по глубине

* Дарья Владимировна Калмыкова (daria-k.kalmykova@ibss-ras.ru); Татьяна Яковлевна Чурилова (tanya.churilova@ibss-ras.ru); Татьяна Владимировна Ефимова (tefimova@ibss-ras.ru); Наталья Александровна Моисеева (moiseeva@ibss-ras.ru); Елена Юрьевна Скороход (elenaskorokhod@ibss-ras.ru); Екатерина Александровна Землянская (kova11403@ibss-ras.ru).

проникновения 1% от падающей на поверхность моря фотосинтетически активной радиации (ФАР).

Концентрацию хлорофилла a и феопигментов (Tchl- a) измеряли спектрофотометрическим методом [3, 4]. Для определения Tchl- a и показателей поглощения света взвешенным веществом ($a_p(\lambda)$), неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(\lambda)$) и пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$) пробы воды (0,5–1,5 л) фильтровали через стекловолокнистые фильтры (Whatman GF/F) при слабом вакууме ($\sim 0,2$ атм) в условиях слабой освещенности. Оптические измерения проводили на двухлучевом спектрофотометре Lambda 35 (PerkinElmer) с интегрирующей сферой в диапазоне длин волн $\lambda = 350–750$ нм. Спектры $a_p(\lambda)$, $a_{NAP}(\lambda)$ и $a_{ph}(\lambda)$ измеряли на увлажненных фильтрах по методике [5] в соответствии с [6]. Для разделения этих спектров пробы после измерений оптической плотности взвеси (OD_p) обесцвечивали горячим метанолом [7], затем горячей дистиллированной водой [8].

Спектральные показатели $a_p(\lambda)$ и $a_{NAP}(\lambda)$ рассчитывали следующим образом:

$$a_{p/NAP}(\lambda) = 2,3 \frac{OD_{p/NAP}(\lambda)}{V/S}, \text{ м}^{-1}, \quad (1)$$

где $OD_{p/NAP}$ — оптическая плотность пробы до и после обесцвечивания и β -коррекции [9]; 2,3 — коэффициент перехода от десятичного логарифма к натуральному; V — объем воды, м^3 ; S — площадь рабочей поверхности фильтра, м^2 .

Показатель поглощения света $a_{ph}(\lambda)$ находили по формуле

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_{NAP}(\lambda), \text{ м}^{-1}. \quad (2)$$

Удельные показатели поглощения света пигментами фитопланктона ($\text{м}^2 \cdot \text{мг}^{-1}$) вычисляли делением $a_{ph}(\lambda)$ на Tchl- a .

Определение спектральных показателей поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{CDOM}(\lambda)$) проводили в соответствии с [10]. Пробы объемом 0,2 л фильтровали через нуклеопоровый фильтр (Sartorius) с порами размером 0,2 мкм под вакуумом не более 0,2 атм. Фильтры промывали деионизированной водой (около 50 мл) перед фильтрованием. Спектры OD измеряли от 250 до 750 нм с шагом 1 нм на двухлучевом спектрометре Lambda 35 (PerkinElmer) с использованием 10-сантиметровых кварцевых кювет и деионизированной воды в качестве эталона. Показатель поглощения света рассчитывали по формуле [3]:

$$a_{CDOM}(\lambda) = 2,3 \frac{OD(\lambda)}{l}, \text{ м}^{-1}, \quad (3)$$

где $l = 0,1$ м — оптическая длина пути.

Спектральное распределение показателя поглощения света NAP или CDOM описывали экспоненциальной зависимостью

$$a_{NAP/CDOM}(\lambda) = a_{NAP/CDOM}(\lambda_r) e^{(-S_{NAP/CDOM}(\lambda - \lambda_r))}, \text{ м}^{-1} \quad (4)$$

где $a_{NAP/CDOM}(\lambda_r)$ — показатель поглощения света NAP или CDOM на конкретной длине волны λ_r , м^{-1} ; в настоящем исследовании $\lambda_r = 438$ нм; $S_{NAP/CDOM}$ — показатель экспоненты.

Результаты и обсуждение

Температура воды, ФАР на поверхности моря, прозрачность вод и нижняя граница зоны фотосинтеза на исследуемой станции значительно различались по сезонам (таблица, рис. 1, 2).

Гидрофизические характеристики прибрежных вод Черного моря

Дата	Температура поверхности, °C	Z_s , м	ФАР на 0 м, $\text{мкЭ}/\text{м}^2/\text{с}$	Z_{eu} , м
16.06.2022 г.	21,0	4,0	1220	23
13.07.2022 г.	24,5	3,0	1150	12
06.10.2022 г.	20,0	6,0	830	20
09.11.2022 г.	15,3	9,5	330	18
22.02.2022 г.	10,0	12,5	150	38
29.11.2022 г.	14,0	7,0	300	25
07.03.2023 г.	9,0	9,0	870	23
21.03.2023 г.	9,2	6,0	480	18

Значения и форма спектра $E_d(\lambda)$ изменялись с глубиной (рис. 1), что связано с поглощением света ОАК и самой водой [1]. Пигменты фитопланктона в большей степени поглощают свет в синем и красном диапазонах спектра, а NAP и CDOM — в синем и ультрафиолетовом диапазонах (рис. 2, цв. вкладка). Вода поглощает свет в красной части спектра [1, 11]. В результате к нижней границе зоны фотосинтеза проникает излучение, спектральные свойства которого характеризуются длиной волны максимума λ_{max} спектра $E_d(\lambda)$, которая изменялась от 496 (22.02.2022 г.) до 544 нм (13.07.2022 г.).

Важным показателем продуктивности и качества вод является концентрация основного фотосинтетически активного пигмента фитопланктона — хлорофилла a . На исследуемой станции вертикальное распределение Tchl- a изменялось в зависимости от сезона. Летом в фотическом слое (на оптических глубинах от 0 до 4,5) значение Tchl- a варьировало от 0,80 до 2,20 $\text{мг}/\text{м}^3$ и в среднем составляло $1,40 \pm 0,43 \text{ мг}/\text{м}^3$. На оптической глубине 4,6 значение Tchl- a равнялось 1,80 $\text{мг}/\text{м}^3$. Максимальные температурные градиенты в исследуемый период наблюдались в придонном слое — на глубинах 10,5 (16.06.2022 г.) и 9 м (13.07.2022 г.). В пределах верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и слоя термоклина вертикальное распределение Tchl- a было относительно однородным 16.06 и 13.07.2022 г. (рис. 3, а, б) с некоторым увеличением Tchl- a в ВКС на оптических глубинах 0,8–1,2. В осенний период диапазон значений Tchl- a в фотическом слое практически не отличался от летнего: 0,90–2,30 $\text{мг}/\text{м}^3$ (среднее значение составило $1,40 \pm 0,52 \text{ мг}/\text{м}^3$). Около нижней границы зоны фотосинтеза наблюдалось снижение Tchl- a ($1,00 \pm 0,76 \text{ мг}/\text{м}^3$). Температурная стратификация вод была отмечена только

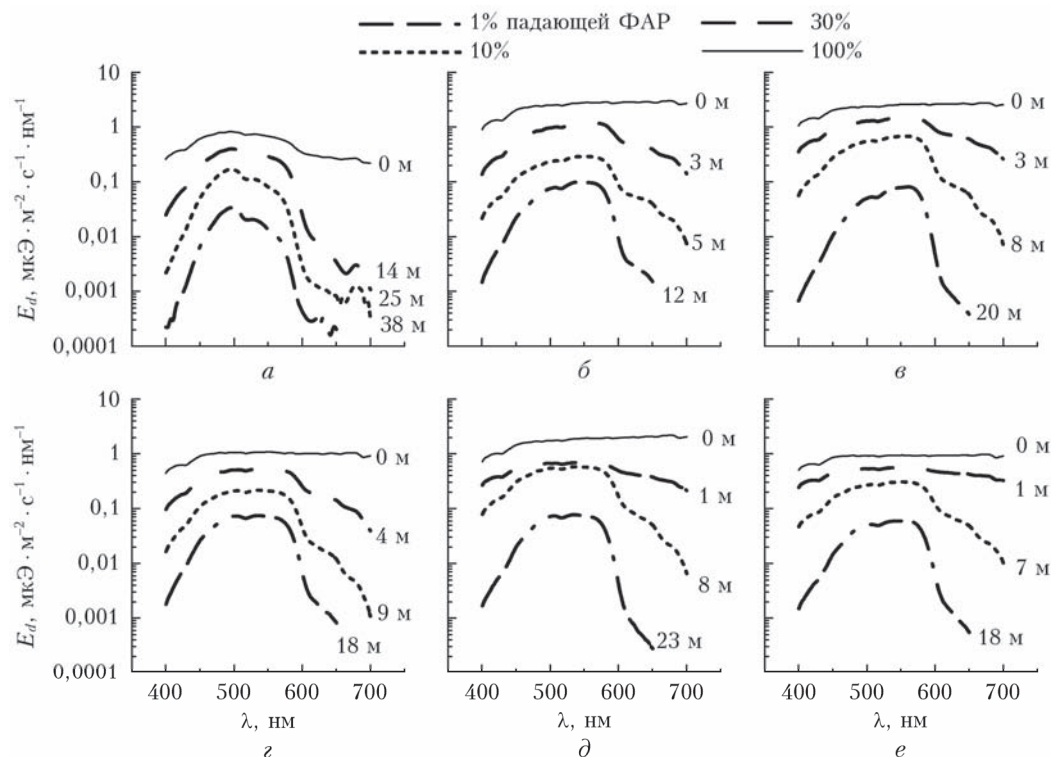


Рис. 1. Спектральная облученность на разных глубинах проникновения ФАР: *a* – 22.02, *б* – 13.07, *в* – 6.10.2022 г., *г* – 9.11, *д* – 7.03, *е* – 21.03.2023 г.

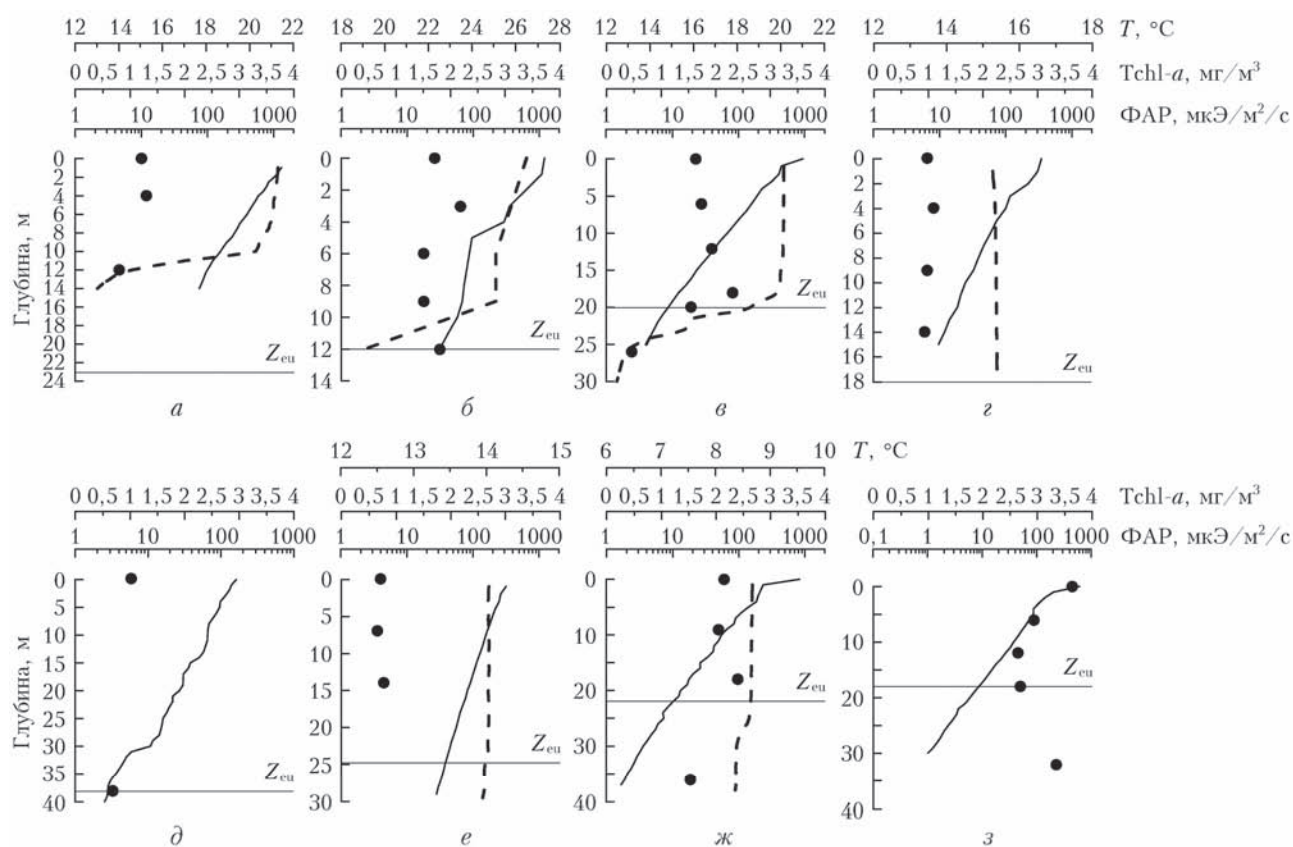


Рис. 3. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла *a* в сумме с феопигментами (точки), температуры (штриховая кривая), проникающей фотосинтетически активной радиации (сплошная кривая) в прибрежной зоне Черного моря: *a* – 16.06, *б* – 13.07, *в* – 6.10, *г* – 9.11, *д* – 22.02, *е* – 29.11.2022 г., *ж* – 7.03, *з* – 21.03.2023 г.

6.10.2022 г. с максимальным температурным градиентом на оптической глубине 4,6. Вертикальное распределение Tchl-*a* характеризовалось снижением значений оптической глубины от 4,6 до 6,2 (рис. 3, *в*). В ноябре вертикальное распределение Tchl-*a* было однородным (рис. 3, *г*). Зима отличалась более низкими значениями Tchl-*a*. В пределах зоны фотосинтеза значение Tchl-*a* находилось в диапазоне от 0,60 до 1,00 мг/м³ и в среднем равнялось 0,80 ± 0,16 мг/м³. Ниже зоны фотосинтеза Tchl-*a* составляла 0,70 мг/м³.

Так как станция отбора проб находится в прибрежных водах Севастополя, то сезонная динамика Tchl-*a* отличается от глубоководных районов, где зимой происходит увеличение данного показателя, обусловленное подъемом биогенных элементов с глубины в результате эрозии пикноклина. Минимальными концентрациями хлорофилла *a* в годовой динамике обусловлена более высокая прозрачность вод в феврале по сравнению с другими периодами года. В целом в холодный период, для которого характерно активное перемешивание вод, можно отметить более однородное распределение Tchl-*a*, чем летом (рис. 3, *д*, *е*). Ранней весной наблюдались относительно высокие, в сравнении с другими сезонами, значения Tchl-*a* как в фотическом слое (2,60 ± 0,55 мг/м³), так и глубже (2,50 ± 0,87 мг/м³) (рис. 3, *ж*, *з*). В среднем значения Tchl-*a* весной были в 3,3 раза выше, чем зимой, и в 1,8 раз выше, чем летом и осенью. Увеличение Tchl-*a* в весенний период связано с цветением планктонных водорослей. В марте в прибрежных водах часто наблюдается пик развития фитопланктона, связанный с доминированием диатомовых водорослей [12–14].

Форма спектров $a_{ph}(\lambda)$ изменялась в зависимости от времени года, а также глубины в пределах зоны фотосинтеза. В спектрах $a_{ph}(\lambda)$ отмечаются два основных пика: на $\lambda = 438$ и 678 нм. Соотношение между показателями поглощения в этих пиках (R) летом было максимальным и составляло 2,60 ± 0,28 в фотическом слое, а глубже — 2,40 ± 0,10. Осенью наблюдалось снижение R до 2,50 ± 0,44 и 2,30 ± 0,03 соответственно. Зимой спектры $a_{ph}(\lambda)$ были более сглаженными, $R = 2,30 \pm 0,36$ и 2,2 в фотическом слое и глубже. В марте отмечены самые низкие значения R (1,90 ± 0,35 и 1,80 ± 0,31 в фотическом слое и глубже).

Спектры удельных показателей поглощения света пигментами фитопланктона $a_{ph}^*(\lambda)$, характеризующие способность фитопланктона поглощать свет в расчете на единичную концентрацию хлорофилла *a*, являются наиболее информативной физиологической характеристикой фитопланктона. В исследуемый период наблюдалось снижение данного показателя от лета (максимальные значения) к весне (минимальные значения). Летом значения $a_{ph}^*(438)$ и $a_{ph}^*(678)$ составляли 0,067 ± 0,010 и 0,026 ± 0,004 м² · мг⁻¹ соответственно (см. рис. 2, *а*). Осенью данные показатели в среднем были равны 0,055 ± 0,012 и 0,022 ± 0,002 м² · мг⁻¹ (см. рис. 2, *б*).

Зимой $a_{ph}^*(438)$ и $a_{ph}^*(678)$ были примерно в 1,6 раза ниже, чем летом (см. рис. 2, *в*). Весной значения $a_{ph}^*(438)$ (0,027 ± 0,010 м² · мг⁻¹) и $a_{ph}^*(678)$ (0,015 ± 0,004 м² · мг⁻¹) были в 2,5 раза ниже, чем летом (см. рис. 2, *г*).

Сезонная динамика $a_{ph}^*(\lambda)$ связана «эффектом упаковки» пигментов в клетках, который зависит от внутриклеточной концентрации пигментов и размера клеток планктонных водорослей [15]. Высокая концентрация пигментов в клетках приводит к их самозатенению, что усиливается в крупных клетках [15]. Изменения $a_{ph}^*(438)$ связаны с суммарным влиянием «эффекта упаковки» хлорофилла *a* и вспомогательных пигментов. В условиях высокой освещенности (летом и осенью) повышается относительное содержание каротиноидов, выполняющих фотопротекторную функцию, в ходе акклиматизации, направленной на минимизацию повреждения фотосинтетического аппарата, которое может возникнуть в результате воздействия избыточного облучения [16]. Зимой и ранней весной при меньшей инсоляции поверхности моря относительное содержание каротиноидов снижается. В результате «эффекта упаковки» сильнее проявляется на $\lambda = \sim 438$ нм, чем на $\lambda = \sim 678$ нм, где поглощение света обусловлено только хлорофиллом *a* и феофитином [17], что приводит к уменьшению R [15]. Сезонная динамика $a_{ph}^*(678)$ и R представлена на рис. 4.

Спектры $a_{NAP}(\lambda)$ показаны на рис. 2. Летом в фотическом слое значение $a_{NAP}(438)$, соответствующее максимуму значению $a_{ph}(\lambda)$ в синем диапазоне, составляло в среднем 0,074 ± 0,030 м⁻¹. В более глубоком слое значения $a_{NAP}(438)$ снижались до 0,060 и 0,024 м⁻¹ в летний и зимний периоды соответственно. Максимальные значения $a_{NAP}(438)$ наблюдались осенью: 0,084 ± 0,050 м⁻¹ в фотическом слое и 0,061 ± 0,020 м⁻¹ в нижележащих слоях. Весной отмечены самые низкие значения $a_{NAP}(438)$: 0,037 ± 0,015 и 0,031 ± 0,005 м⁻¹ соответственно. Максимальный вклад NAP в общее поглощение взвесью на $\lambda = 438$ нм отмечен 29.11.2022 г. (75%), а минимальный — 7.03.2023 г. (32%) (рис. 5, *и*).

Поглощение CDOM экспоненциально увеличивается в сторону более коротких длин волн (см. рис. 2). Отмечено неоднородное вертикальное распределение показателя $a_{CDOM}(438)$ в летнее время. В среднем в фотическом слое $a_{CDOM}(438)$ равнялся 0,094 ± 0,005 м⁻¹, а глубже значения $a_{CDOM}(438)$ увеличивались до 0,130 м⁻¹. Осенью наблюдалось наиболее однородное вертикальное распределение $a_{CDOM}(438)$ по сравнению с остальными сезонами. Зимой $a_{CDOM}(438)$ в фотическом слое составлял 0,088 ± 0,015 м⁻¹. Весной значения $a_{CDOM}(438)$ находились в диапазоне 0,110–0,133 м⁻¹, увеличиваясь в пределах исследуемого слоя.

Поглощение CDOM сильно влияет на цвет вод [15, 18], особенно в прибрежных районах, где оно является основным поглощающим веществом в синей части видимого спектра [19]. Главными источниками CDOM в прибрежных водах являются реки и грунтовые воды вблизи береговой линии,

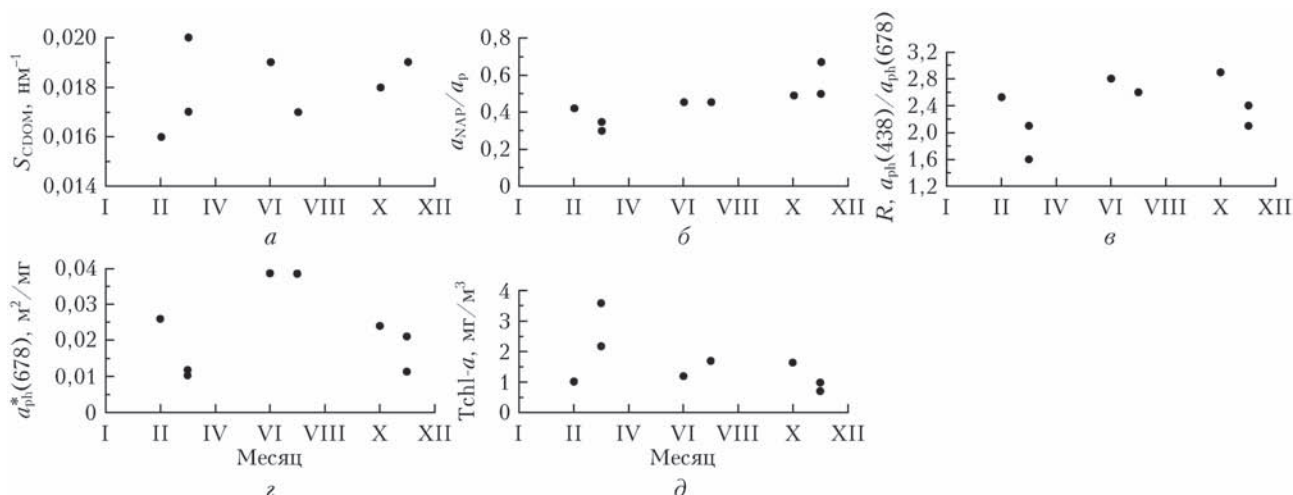


Рис. 4. Динамика значений S_{CDOM} (а), a_{NAP}/a_p (б), R (в), $a_{ph}(678)$ (г), $Tchl-a$ (д) в поверхностном слое моря

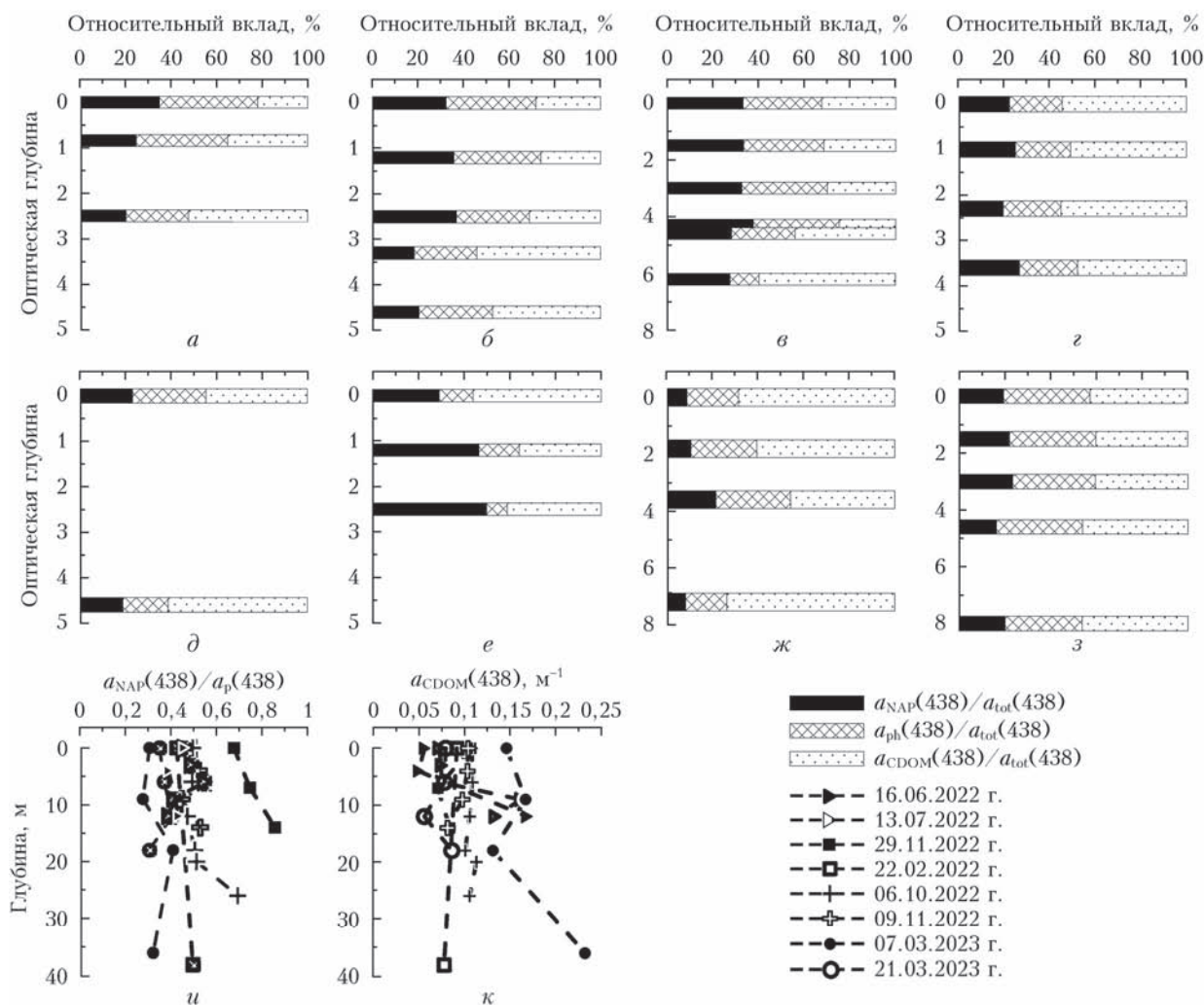


Рис. 5. Относительный вклад ОАК в $a_{tot}(438)$ (а – 16.06, б – 13.07, в – 6.10, г – 9.11, д – 22.02, е – 29.11.2022 г., ж – 7.03, з – 21.03.2023 г.) и вертикальное распределение отношения $a_{NAP}(438)/a_p(438)$ (и) и $a_{CDOM}(438)$ (к) в исследуемые периоды

а также сточные воды. Под воздействием солнечного света высокомолекулярные соединения CDOM превращаются в низкомолекулярные, что сопровождается

увеличением S_{CDOM} и снижением $a_{CDOM}(438)$ [20]. Значения S_{CDOM} изменялись незначительно между сезонами (см. рис. 4). Резкое увеличение $a_{CDOM}(438)$

с глубиной (см. рис. 5, κ) летом по сравнению с другими сезонами, связано с фотодеградацией в поверхностном слое. Увеличение $a_{\text{CDOM}}(438)$ в придонном слое может быть связано с деструкцией органических соединений в донных отложениях, которая положительно связана с температурой. В холодное время года, когда происходит активное перемешивание вод, а также количество падающей на поверхность моря солнечной радиации снижается, распределение растворенного органического вещества становится более однородным (см. рис. 5, κ).

Во все исследованные периоды CDOM доминировал в поглощении света на $\lambda = 438$ нм ($a_{\text{tot}}(438)$). Вклад фитопланктона в $a_{\text{tot}}(438)$ был максимальным летом (см. рис. 5).

Заключение

В оптические свойства прибрежных вод Черного моря доминирующий вклад вносят неживое взвешенное вещество и окрашенное растворенное органическое вещество из-за значительного антропогенного и естественного воздействия. Ранней весной наблюдались наибольшие значения концентрации хлорофилла a и феопигментов, что связано с «цветением» воды в марте, вызванным, вероятно, активным развитием крупных видов диатомовых водорослей, на что указывает значительное снижение $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ и R . В поверхностном слое вод максимальные значения $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ и R были получены в летний период, что связано со снижением внутриклеточной концентрации пигментов и увеличением доли фотопротекторов. В нижней части зоны фотосинтеза спектры $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ были более сглаженные, чем в поверхностном слое. Летом фитопланктон вносил наибольший относительный вклад в общее поглощение света на $\lambda = 438$ нм, что может являться причиной относительно высокой, по сравнению с другими сезонами года, мутности воды. Минимальные значения Tchl- a и $a_{\text{CDOM}}(438)$ наблюдались зимой, что отразилось на прозрачности воды. Характер вертикального распределения Tchl- a , NAP и CDOM в течение года изменялся и был обусловлен гидрофизическими характеристиками прибрежных вод Черного моря (изменение интенсивности ФАР, устойчивости водного столба).

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания № 121040100327-3.

Список литературы

1. Kirk J. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 649 p.
2. Babin M., Stramski D., Ferrari G., Claustre H., Bricaud A., Obolensky G., Hoepffner N. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, non-algal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N C7. P. 1–20.
3. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a , b , $c1$, and $c2$ in higher plants, algae and natural phytoplankton // Bioch. Physiol. Pfl. 1975. V. 167, N 2. P. 191–194.
4. Lorenzen C.J. Determination of chlorophyll and phaeopigments: Spectrophotometric equations // Limnol. Oceanogr. 1967. V. 12, N 2. P. 343–346.
5. Mitchell B.G., Kieffer D.A. Chlorophyll a specific absorption and fluorescence excitation spectra for light-limited phytoplankton // Deep-Sea Res. 1988. V. 35, N 5. P. 639–663.
6. Neeley A.R., Mannino A., Boss E., D'sa E.J., Freeman S., Fry E., Mueller J.L., Pegau S., Reynolds R.A., Roesler C., Rottgers R., Stramski D., Twardowski M., Ronald J., Zaneveld V. Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient. Dartmouth: IOCCG, 2018. 83 p.
7. Kishino M., Takahashi N., Okami N., Ichimura S. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea // Bull. Mar. Sci. 1985. V. 37. P. 634–642.
8. Roesler C.S., Perry M.J. In situ phytoplankton absorption, fluorescence emission, and particulate backscattering spectra determined from reflectance // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, N C7. P. 279–294.
9. Mitchell B.G. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique // Ocean. Optic X. 1990. V. 1302. P. 137–148.
10. Mannino A., Novak M.G., Nelson N.B., Belz M., Berton J.-F., Blough N.V., Boss E., Bricaud A., Chaves J., Del Castillo C., Del Vecchio R.D., D'Sa E.J., Freeman S., Matsuoka A., Miller R.L., Neeley A., Rottgers R., Tzortziou M., Werdell P.J. Measurement Protocol of Absorption by Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) and other Dissolved Materials. Dartmouth: IOCCG, 2019. 77 p.
11. Carder K.L., Hawes S.K., Baker K.A., Smith R.C., Steward R.G., Mitchell B.G. Reflectance model for quantifying chlorophyll a in the presence of productivity degradation products // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, N C11. P. 599–611.
12. Финенко З.З., Стельмах Л.В., Мансурова И.М., Георгиева Е.Ю., Цилинский В.С. Сезонная динамика структурных и функциональных показателей фитопланктонного сообщества в Севастопольской бухте // Системы контроля окружающей среды. 2017. № 9. С. 73–82.
13. Рябушко В.И., Шутов С.В., Ковригина Н.П., Лисицкая Е.В., Поспелова Н.В. Комплексные исследования экологического состояния прибрежной акватории Севастополя (Западный Крым, Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 103–118.
14. Сеничева М.И. Видовое разнообразие, сезонная и межгодовая изменчивость микроводорослей в планктоне у берегов Крыма // Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования / под ред. Ю.Н. Токарева, З.З. Финенко, Н.В. Шадрина. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 5–17.
15. Morel A., Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton // Deep-Sea Res. 1981. V. 28A, N 11. P. 1375–1393.
16. Demmig-Adams B. Carotenoids and photoprotection in plants: A role for the xanthophyll zeaxanthin // BBA – Bioenergetics. 1990. V. 1020. P. 1–24.
17. Jeffrey S.W., Mantoura R.F.C., Wright S.W. Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods. Paris: UNESCO Pub, 1997. 639 p.
18. Carder K.L., Steward R.G., Harvey G.R., Ortner P.B. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll // Limnol. Oceanogr. 1989. V. 34. P. 68–81.

19. *Bukata R.P., Jerome J.H., Kondratyev A.S., Pozdnyakov D.* Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. CRC Press, 1995. 384 p.
20. *Coble P.* Marine optical biogeochemistry: The chemistry of ocean color // *Chem. Rev.* 2007. V. 107. P. 402–418.

D.V. Kalmykova, T.Ya. Churilova, T.V. Efimova, N.A. Moiseeva, E.Yu. Skorokhod, E.A. Zemlianskaia. **Seasonal variability of the vertical distribution of spectral bio-optical properties of the Black Sea coastal waters near Sevastopol.**

Seasonal variability of the vertical distribution of chlorophyll *a* concentration, coefficients of spectral light absorption by optically active components of water and, spectral downwelling irradiance has been investigated in coastal waters of the Black Sea near Sevastopol in 2022–2023. Concentration of chlorophyll *a* in euphotic zone was minimal in winter (0.66 mg/m³) and maximal in spring (3.57 mg/m³). It has been revealed that colored dissolved organic matter was dominated in absorption at 438 nm in all the seasons. It was noted that the relative contribution of phytoplankton to the total non-water light absorption by all optically active components at 438 nm was the highest in summer. It has been shown that an increase in the total light absorption by suspended and dissolved organic matters led to a narrowing of the euphotic zone and a change in the spectral features of downwelling irradiance. Vertical distribution of Tchl-*a* and optically active components was associated with hydrophysical characteristics of waters.

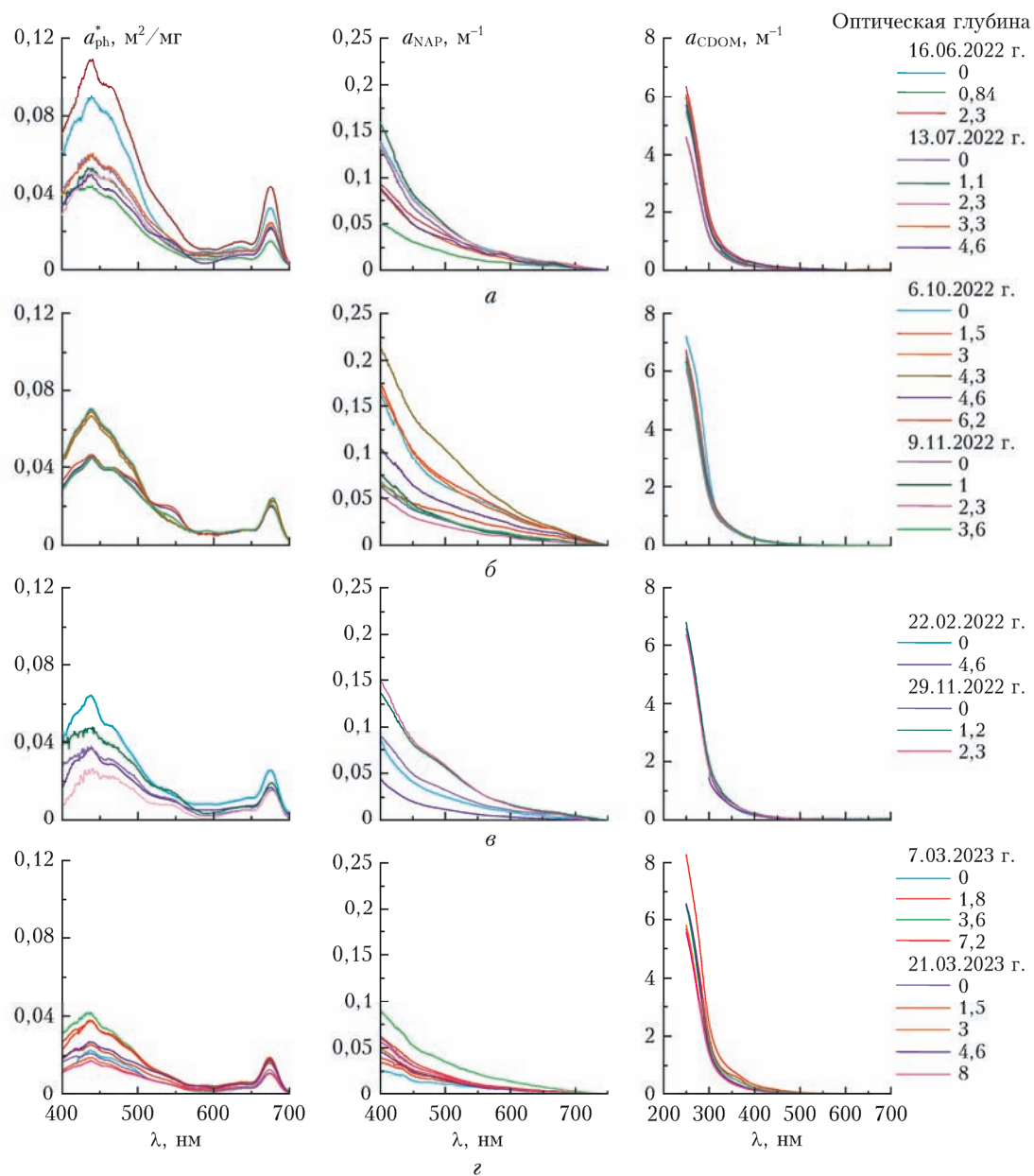


Рис. 2. Спектры удельных показателей поглощения света пигментами фитопланктона, показателей поглощения света неживым взвешенным веществом и окрашенным растворенным органическим веществом в прибрежной зоне Черного моря: a – 16.06 и 13.07.2022 г., b – 6.10 и 9.11.2022 г., c – 22.02 и 29.11.2022 г., d – 7.03 и 21.03.2023 г.