



УДК [[551.463.5:535.34]:581.132.1](269.4)

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ БИООПТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВОД АТЛАНТИЧЕСКОГО СЕКТОРА АНТАРКТИКИ

© 2020 г. Н. А. Моисеева<sup>1</sup>, Т. Я. Чурилова<sup>1</sup>, Т. В. Ефимова<sup>1</sup>,  
В. А. Артемьев<sup>2</sup>, Е. Ю. Скороход<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей  
имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва, Российская Федерация  
E-mail: [nataliya-moiseeva@yandex.ru](mailto:nataliya-moiseeva@yandex.ru)

Поступила в редакцию 22.09.2020; после доработки 06.11.2020;  
принята к публикации 25.12.2020; опубликована онлайн 30.12.2020.

Исследования изменчивости спектральных биооптических показателей вод Атлантического сектора Антарктики проводили в 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в период с 11.01.2020 по 04.02.2020. Получено, что концентрация хлорофилла *a* в сумме с феопигментами изменялась в исследованном слое на большинстве станций от 0,1 до 1,8 мг·м<sup>-3</sup>, за исключением двух станций, где достигала 2,2 и 4,4 мг·м<sup>-3</sup>. Установлена связь показателей поглощения света пигментами фитопланктона с концентрацией хлорофилла *a* на длинах волн, соответствующих основным максимумам спектра:  $a_{ph}(438) = 0,044 \times C_a^{1,2}$ ,  $r^2 = 0,84$  ( $n = 117$ );  $a_{ph}(678) = 0,021 \times C_a^{1,1}$ ,  $r^2 = 0,89$  ( $n = 117$ ). Спектры показателей поглощения света неживым взвешенным веществом и окрашенным растворённым органическим веществом описаны экспоненциальной зависимостью. Подобраны коэффициенты параметризации: (1) показатели поглощения света неживым взвешенным (0,001–0,027 м<sup>-1</sup>) и растворённым органическим веществом (0,016–0,19 м<sup>-1</sup>) на длине волны 438 нм; (2) коэффициенты наклона экспоненты спектров этих компонент (0,005–0,016 и 0,009–0,022 нм<sup>-1</sup> соответственно).

**Ключевые слова:** хлорофилл *a*, спектральный показатель поглощения света, фитопланктон, неживое взвешенное вещество, окрашенное растворённое органическое вещество, Антарктида

Исследование спектральных биооптических показателей вод необходимо для понимания закономерностей формирования оптического сигнала, регистрируемого спутниками, и решения задачи восстановления биологических характеристик вод на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса (IOCCG. [Uncertainties in Ocean...](#), 2019). Спектральные оптические свойства взвешенных и растворённых веществ в воде, а именно их способность к рассеянию света и в большей степени к его поглощению, определяет формирование светового поля в море и восходящего из водной толщи излучения, фиксируемого оптическими сканерами спутников (Kirk, 2011 ; Reynolds et al., 2001). Для корректной трансформации спутниковой информации, в частности коэффициента яркости моря  $R_{rs}$ , в характеристики качества среды и продуктивности необходимы региональные алгоритмы, разработанные на основе эмпирически установленных закономерностей изменчивости спектральных показателей поглощения света

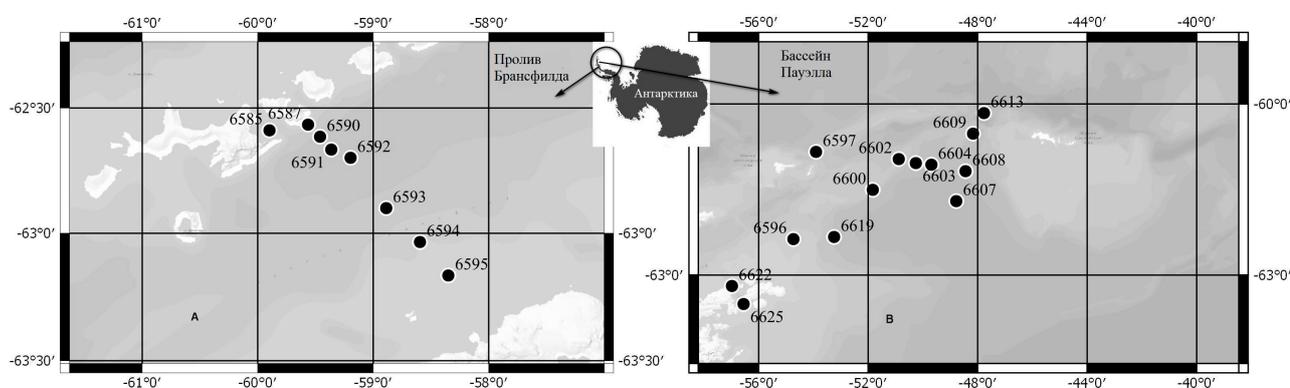
пигментами фитопланктона, неживым взвешенным веществом и окрашенным растворённым органическим веществом, а также их связи с концентрацией основного фотосинтетически активного пигмента — хлорофилла *a*.

В водах Антарктики исследования, которые направлены на понимание влияния содержания оптически активных компонент среды и их спектральных свойств на формирование сигнала, «видимого» дистанционными сканерами, развивались от сравнительно простых, основанных на анализе зависимостей между концентрацией хлорофилла *a* и спектральными показателями ослабления света и коэффициентами яркости (Dierssen & Smith, 2000 ; Figueroa, 2002 ; Mitchell & Holm-Hansen, 1991), до комплексных — изучения спектральных показателей поглощения и рассеяния всеми оптически активными компонентами среды (Ferreira et al., 2018, 2017). К настоящему времени известно лишь о единичных работах комплексного характера (Ferreira et al., 2018, 2017), проведённых в акватории западнее Антарктического полуострова.

В связи с этим целью данной работы было исследовать вариабельность спектральных показателей поглощения света взвешенным и растворённым органическим веществом в водах Атлантического сектора Антарктики в летнее время по материалам экспедиционных исследований с 11 января по 04 февраля 2020 г.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в водах Атлантического сектора Антарктики с 11.01.2020 по 04.02.2020. Основное количество станций выполнено в проливе Брансфилда (рис. 1А) и в бассейне Пауэлла (рис. 1В).



**Рис. 1.** Карта станций (●) биооптических исследований в 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в проливе Брансфилда (А) и бассейне Пауэлла (В) (11.01.2020–04.02.2020)

**Fig. 1.** Map of stations (●) of bio-optical studies, carried out in the 79<sup>th</sup> cruise of the RV “Akademik Mstislav Keldysh” in the Bransfield Strait (A) and the Powell Basin (B) (11.01.2020–04.02.2020)

Измерение падающей на поверхность моря фотосинтетически активной радиации (далее — ФАР) и её изменения с глубиной до 100 м проводили с помощью палубного и погружаемого приборов Li-Cor. Вертикальные профили изменения температуры и интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* регистрировали зондирующим прозрачномером ПУМ-200. Пробы отбирали с помощью кассеты батометров на горизонтах, выбранных на основе измеренных профилей гидрофизических параметров. Глубину зоны фотосинтеза  $Z_{eu}$  принимали равной глубине проникновения 1 % от падающей на поверхность моря величины ФАР.

Концентрацию хлорофилла  $a$  и феопигментов  $C_a$  определяли стандартным спектрофотометрическим методом (Jeffrey & Humphrey, 1975 ; Lorenzen, 1967). Пробы воды (1,5–2 л) фильтровали через стекловолокнистые фильтры (GF/F, Whatman) при слабом вакууме ( $< 0,2$  атм). Фильтры заворачивали в фольгу и хранили в сжиженном азоте в сосуде Дьюара до измерения в лаборатории.

Поглощение света взвешенным веществом  $a_p(\lambda)$  определяли в соответствии с протоколом NASA (IOCCG. Ocean Optics..., 2019). Измерения проводили на двулучевом спектрофотометре Lambda 35 (PerkinElmer) с интегрирующей сферой в диапазоне длин волн от 350 до 750 нм с шагом в 1 нм. Разделение  $a_p(\lambda)$  на поглощение света пигментами фитопланктона (phytoplankton, ph)  $a_{ph}(\lambda)$  и неживой взвесью (non-algal particles, NAP)  $a_{NAP}(\lambda)$  проводили по (Kishino et al., 1985). Коррекцию поглощения ( $\beta$ -correction) выполняли в соответствии с (Mitchell, 1990). Поправку на неспецифическое поглощение проводили путём «зануления» по средней величине для 700–750 нм.

Поглощение света окрашенным растворённым органическим веществом (colored dissolved organic matter, CDOM)  $a_{CDOM}(\lambda)$  измеряли в соответствии с протоколом NASA (IOCCG. Ocean Optics..., 2019). Пробы воды фильтровали через нуклеопоровый фильтр (Sartorius, 0,2 мкм), предварительно промытый деионизированной водой. Для префильтрации использовали фильтры GF/F. Измерения проводили на спектрофотометре Lambda 35 в диапазоне длин волн от 250 до 750 нм с шагом в 1 нм.

Спектральное распределение показателей  $a_{NAP}(\lambda)$  и  $a_{CDOM}(\lambda)$  описывали экспоненциальной зависимостью. Параметризацию проводили в спектральных диапазонах 400–700 и 350–500 нм соответственно:

$$a_i(\lambda) = a_i(\lambda_{ref}) \times e^{-S_i \times (\lambda - \lambda_{ref})}, \quad (1)$$

где  $i$  — неживое взвешенное вещество (NAP) или окрашенное растворённое органическое вещество (CDOM);

$\lambda_{ref}$  — расчётная длина волны (в нашем случае  $\lambda_{ref} = 438$  нм);

$S_i$  — коэффициент спектрального наклона,  $\text{нм}^{-1}$ .

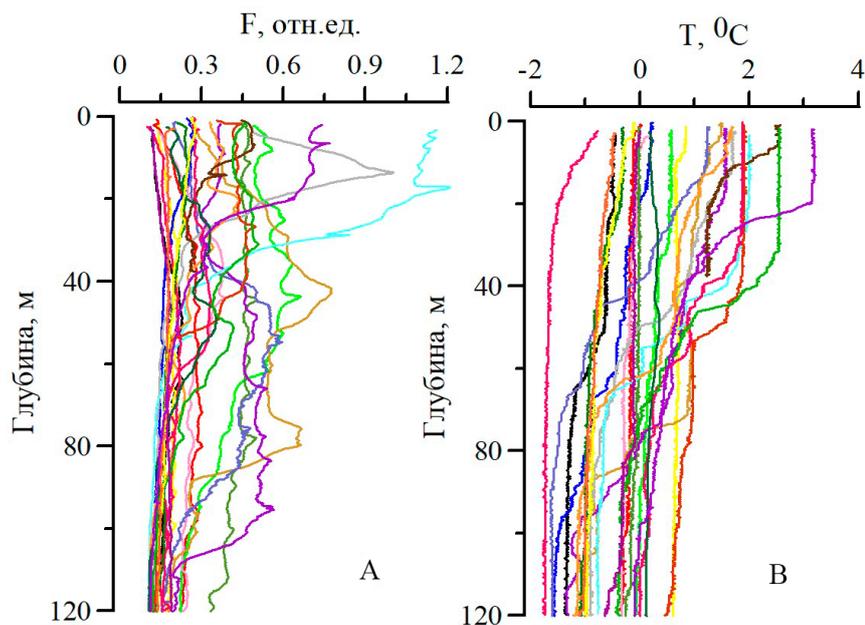
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Температура поверхностного слоя воды в проливе Брансфилда в исследуемый период изменялась от  $-0,47$  до  $+3,2$  °C, составляя в среднем  $+1,3$  °C; в бассейне Пауэлла — от  $-0,77$  до  $+2,0$  °C, в среднем  $+0,72$  °C.

В районе исследований отмечена высокая неоднородность гидрологической структуры вод (рис. 2). На большинстве станций температура во всём исследованном слое была практически одинаковой; на отдельных станциях (6591, 6592, 6593) наблюдали сформированный верхний квазиоднородный слой толщиной от 7 до 47 м. Сложность и неоднородность гидрологической структуры вод сопровождалась аналогичной неоднородностью по вертикальному распределению флуоресценции хлорофилла  $a$  с глубиной (рис. 2).

Глубина зоны фотосинтеза изменялась между станциями в узком диапазоне от 50 м (ст. 6614) до 83 м (ст. 6619), за исключением двух станций (ст. 6609 и 6613), где отмечена более низкая прозрачность вод. На этих станциях  $Z_{eu}$  равнялась 28 и 35 м соответственно. В среднем  $Z_{eu}$  составляла  $(64 \pm 12)$  м.

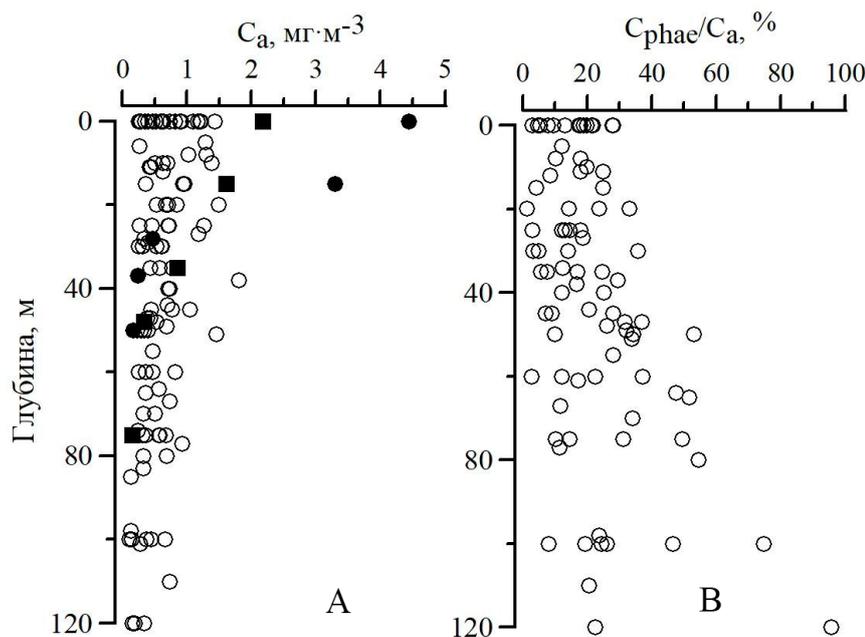
Важным показателем продуктивности и качества вод является концентрация основного фотосинтетически активного пигмента фитопланктона — хлорофилла  $a$ .



**Рис. 2.** Профили ( $n = 26$ ) вертикального изменения интенсивности флуоресценции хлорофилла  $a$  (А) и температуры (В) в водах Атлантического сектора Антарктики (11.01.2020–04.02.2020)

**Fig. 2.** Vertical profiles ( $n = 26$ ) of chlorophyll  $a$  fluorescence intensity (А) and water temperature (В) of Atlantic sector of Antarctic (11.01.2020–04.02.2020)

Концентрация хлорофилла  $a$  в сумме с феопигментами в поверхностном слое исследуемых районов (пролив Брансфилда и бассейн Пауэлла) изменялась значительно — от  $0,25$  до  $4,4$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$  (рис. 3А). Максимальные значения отмечены на ст. 6609 ( $C_a = 4,4$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ) и ст. 6613 ( $C_a = 2,2$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ) в бассейне Пауэлла. При этом средняя величина параметра  $C_a$  в поверхностном слое для всех станций, за исключением ст. 6609 и 6613, составляла  $(0,72 \pm 0,35)$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Для эвфотического слоя, кроме ст. 6609 и 6613, отмечен диапазон variability от  $0,1$  до  $1,8$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . В среднем для всего слоя величина  $C_a$  равна  $(0,61 \pm 0,35)$   $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

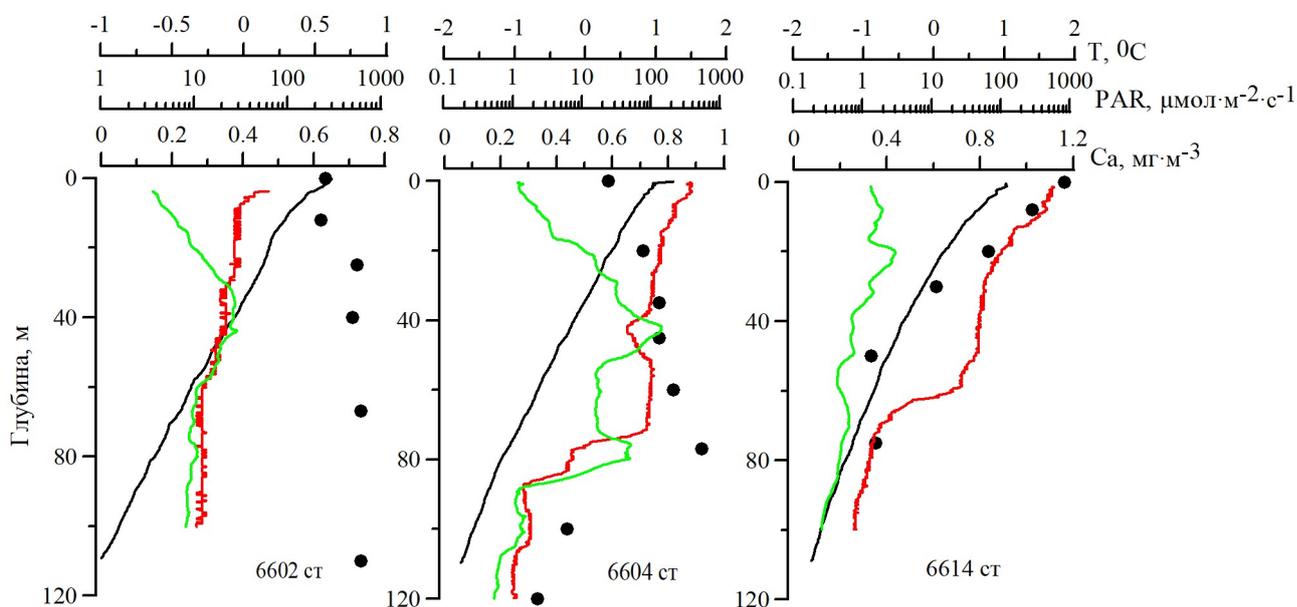


**Рис. 3.** Профили вертикального распределения концентрации хлорофилла  $a$  в сумме с феопигментами ( $C_a$ ) (А) на ст. 6609 (●), на ст. 6613 (■) и на остальных станциях (○) и относительного содержания феопигментов ( $C_{\text{phae}}/C_a$ ) (В) в водах Атлантического сектора Антарктики (11.01.2020–04.02.2020)

**Fig. 3.** Vertical profiles of chlorophyll  $a$  and phaeopigment concentration ( $C_a$ ) at st. 6609 (●), at st. 6613 (■), and at other stations (○) (А); vertical profiles of relative phaeopigment concentration ( $C_{\text{phae}}/C_a$ ) (В) in water of Atlantic sector of Antarctic (11.01.2020–04.02.2020)

В вертикальном распределении  $C_a$  выделены три типа профилей (рис. 4):

- 1) равномерное распределение  $C_a$  по всей толще эвфотического слоя (например, на ст. 6602);
- 2) с максимумом  $C_a$  в нижней части зоны фотосинтеза (~ 1–0,1 % ФАР) (например, на ст. 6604);
- 3) уменьшение  $C_a$  с глубиной в пределах исследованного слоя (например, на ст. 6614).



**Рис. 4.** Примеры типичных профилей вертикального распределения температуры (Т, красная линия), интенсивности флуоресценции хлорофилла  $a$  (F, зелёная линия), фотосинтетически активной радиации (ФАР, чёрная линия) и концентрации хлорофилла  $a$  в сумме с феофитином ( $C_a$ , ●) на отдельных станциях в водах Атлантического сектора Антарктики (11.01.2020–04.02.2020)

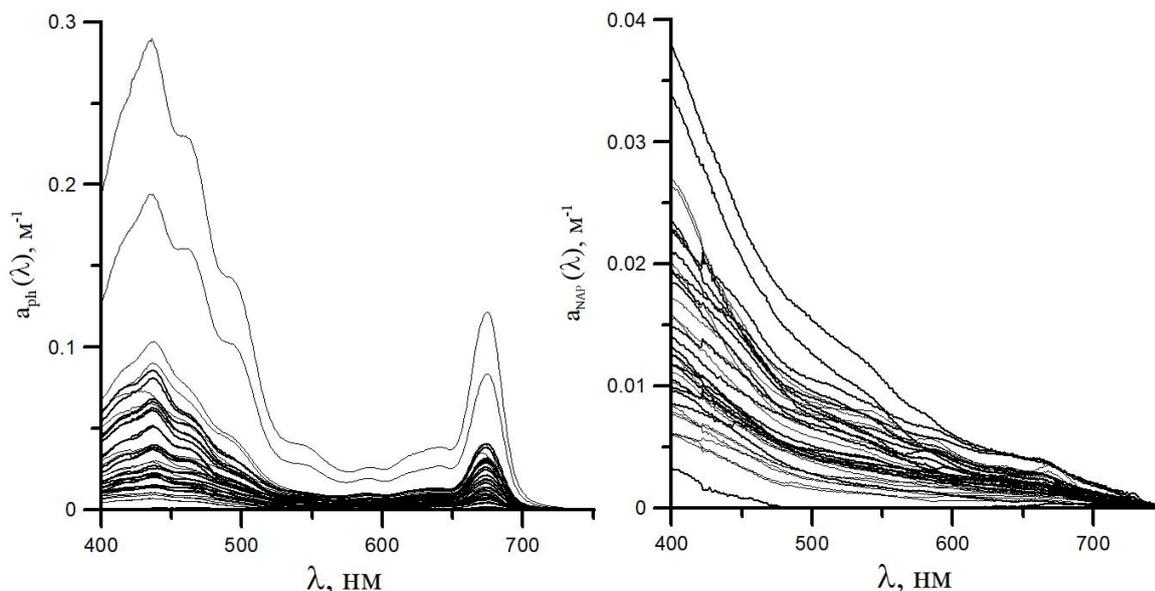
**Fig. 4.** Examples of typical vertical profiles of temperature (T, red line), chlorophyll  $a$  fluorescence intensity (F, green line), photosynthetically active radiation (PAR, black line), and chlorophyll  $a$  and phaeophytin concentration ( $C_a$ , ●) at single stations in water of Atlantic sector of Antarctic (11.01.2020–04.02.2020)

Наиболее распространёнными были профили третьего типа — характеризовавшиеся уменьшением  $C_a$  с глубиной. Они зарегистрированы на 16 станциях из 26.

Доля феопигментов в общем содержании их в сумме с хлорофиллом  $a$  изменялась в широком диапазоне — от 1 до 96 %, составляя в среднем ( $22 \pm 16$ ) % (рис. 3B). Максимальные значения (47–96 %) зарегистрированы в слое, расположенном глубже 50 м. В верхнем, освещённом слое (от 0 до 50 м) доля феопигментов не превышала 30 %, что свидетельствует о хорошем физиологическом состоянии фитопланктона в этом слое.

В исследуемой акватории отмечена высокая изменчивость спектральных показателей  $a_{ph}(\lambda)$  и  $a_{NAP}(\lambda)$  (рис. 5).

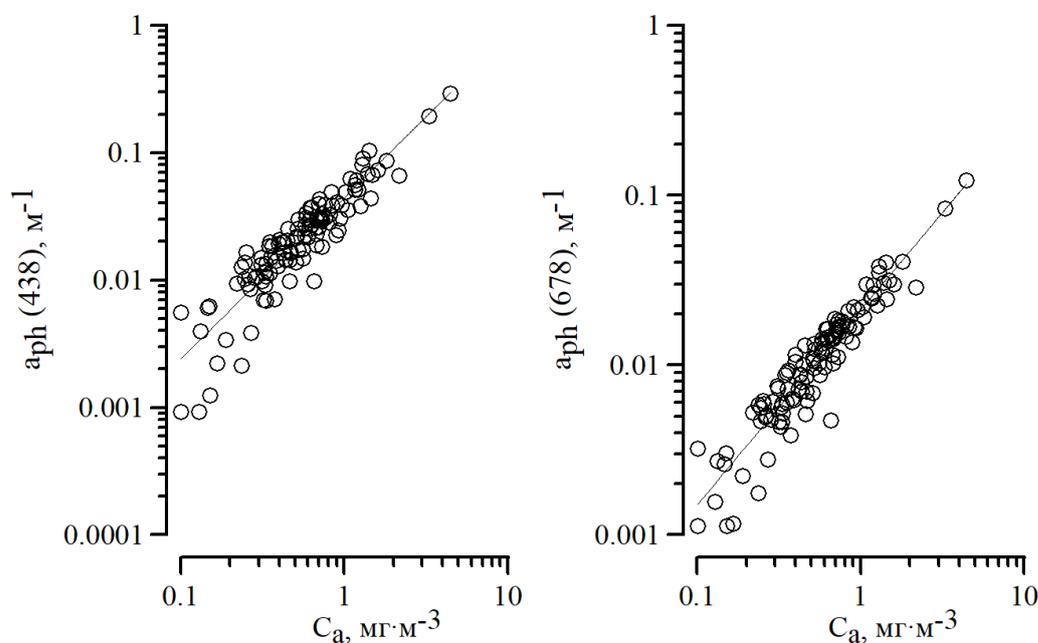
В спектрах  $a_{ph}(\lambda)$  отмечены два основных максимума поглощения — в синей и красной областях (на ~ 438 и ~ 678 нм соответственно). Для всего массива данных получено, что соотношение между показателями в этих пиках (R) изменялось от 1,1 до 2,8; прослеживается тренд к снижению данного параметра с глубиной. Величина R варьировала от 2,8–2,3 в поверхностном слое до 2,1–1,1 в конце исследованного слоя. Показатели поглощения света пигментами фитопланктона в синем [ $a_{ph}(438)$ ] и красном [ $a_{ph}(678)$ ] максимумах изменялись от 0,001 до 0,29  $m^{-1}$  и от 0,001 до 0,12  $m^{-1}$  соответственно. Наибольшие значения зафиксированы на станциях с высокой концентрацией хлорофилла  $a$  (ст. 6609 и 6613), наименьшие — в нижней части эвфотического слоя.



**Рис. 5.** Спектры поглощения света пигментами фитопланктона  $a_{ph}(\lambda)$  и неживым взвешенным веществом  $a_{NAP}(\lambda)$  в водах Атлантического сектора Антарктики (11.01.2020–04.02.2020)

**Fig. 5.** Light absorption spectra of phytoplankton pigments  $a_{ph}(\lambda)$  and non-algal particles  $a_{NAP}(\lambda)$  in water of Atlantic sector of Antarctic (11.01.2020–04.02.2020)

Установлена зависимость между содержанием  $C_a$  и показателями поглощения  $a_{ph}(\lambda)$  на отдельных длинах волн, соответствующих максимумам спектра, —  $a_{ph}(438)$  и  $a_{ph}(678)$  (рис. 6).



**Рис. 6.** Зависимость показателей поглощения света пигментами фитопланктона на длинах волн 438 нм [ $a_{ph}(438)$ ] и 678 нм [ $a_{ph}(678)$ ] от концентрации хлорофилла  $a$  в сумме с феопигментами ( $C_a$ ) в водах Атлантического сектора Антарктики (11.01.2020–04.02.2020)

**Fig. 6.** Dependence of light absorption coefficient by phytoplankton pigments at wavelengths of 438 nm [ $a_{ph}(438)$ ] and 678 nm [ $a_{ph}(678)$ ] on chlorophyll  $a$  and phaeopigment concentration ( $C_a$ ) in water of Atlantic sector of Antarctic (11.01.2020–04.02.2020)

Данные зависимости можно описать степенными уравнениями с высокими коэффициентами детерминации:

$$a_{ph}(438) = 0,044 \times C_a^{1,2}, r^2 = 0,84, n = 117, \quad (2)$$

$$a_{ph}(678) = 0,021 \times C_a^{1,1}, r^2 = 0,89, n = 117. \quad (3)$$

Показатели поглощения света на длине волны 438 нм неживым взвешенным веществом [ $a_{NAP}(438)$ ] и окрашенным растворённым органическим веществом [ $a_{CDOM}(438)$ ] изменялись в пределах 0,001–0,027 м<sup>-1</sup> и 0,016–0,19 м<sup>-1</sup> соответственно. Коэффициенты наклона экспоненты  $S_{NAP}$  и  $S_{CDOM}$  варьировали в диапазонах 0,005–0,016 нм<sup>-1</sup> и 0,009–0,022 нм<sup>-1</sup> соответственно. Средние значения параметра составили (0,010 ± 0,002) нм<sup>-1</sup> для  $S_{NAP}$  и (0,013 ± 0,003) нм<sup>-1</sup> для  $S_{CDOM}$ .

Для поверхностного слоя (0–1 м) проведена оценка относительного вклада показателей поглощения света всех оптических компонент на 438 нм. Установлено, что наибольший вклад в общее поглощение света вносит окрашенное растворённое органическое вещество (от 6 до 88 %, в среднем (54 ± 22) %). Вклад фитопланктона несколько меньше (от 7 до 78 %, в среднем (36 ± 19) %). Минимальный вклад отмечен для неживой взвеси (от 4 до 20 %, в среднем (10 ± 5) %).

## ОБСУЖДЕНИЕ

В исследуемый период зарегистрированы разные типы вертикальных профилей флуоресценции хлорофилла *a* (см. рис. 2): однородное распределение; профили с максимумом на разных глубинах; снижение флуоресценции с глубиной. Это связано, вероятно, с вертикальным распределением температуры и плотности воды. Такие типы распределения флуоресценции хлорофилла *a* были отмечены ранее в водах около Антарктического полуострова (Figueiras et al., 1999).

Глубина зоны фотосинтеза была соизмерима с таковой верхнего квазиоднородного слоя, за исключением нескольких станций, где зарегистрирована температурная стратификация вод в пределах зоны фотосинтеза (см. рис. 2). Форма спектра  $a_{ph}(\lambda)$  отражает пигментный состав клетки, который, в свою очередь, зависит от видового состава фитопланктона (Чурилова и др., 2008; Ciotti et al., 2002; Morel & Bricaud, 1981). Показатель удельного (нормированного на концентрацию хлорофилла *a*) поглощения света пигментами фитопланктона определяется внутриклеточным содержанием пигментов, а также формой и размерами клеток фитопланктона (Bricaud et al., 1995; Morel & Bricaud, 1981).

Полученные уравнения зависимости между показателями поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 438 и 678 нм и концентрацией хлорофилла *a* в сумме с феопигментами могут быть использованы для расчёта  $a_{ph}(438)$  и  $a_{ph}(678)$  на основе данных по  $C_a$ . В этих уравнениях степенной показатель выше 1. Это свидетельствует о некотором увеличении удельных (нормированных на  $C_a$ ) величин показателей поглощения с ростом содержания  $C_a$  в воде, что отражает снижение степени упаковки пигментов в клетках фитопланктона (Morel & Bricaud, 1981). Вероятно, это связано с тем, что в более трофных водах (где повышается  $C_a$ ) фитопланктон представлен более мелкоклеточными видами.

Спектры  $a_{ph}(\lambda)$  в нижней части зоны фотосинтеза (на глубине проникновения 1–0,1 % ФАР) были более сглаженными; здесь зарегистрированы минимальные значения величины *R*. В синей части спектра свет поглощают вспомогательные пигменты и хлорофилл *a* (Phytoplankton Pigments in Oceanography..., 1997). Красный максимум спектра (на 678 нм) формируется за счёт поглощения света хлорофиллом *a* и феопигментами. Уменьшение величины *R* с глубиной указывает на снижение доли вспомогательных пигментов относительно содержания хлорофилла *a*.

На всех станциях, кроме ст. 6609 (на глубинах 0 и 15 м), в полученных спектрах поглощения света пигментами фитопланктона не отмечен локальный максимум на длине волны 544 нм, соответствующей полосе поглощения фикоэритрина (Ting et al., 2002).

Полученные в настоящих исследованиях величины  $a_{\text{NAP}}(438)$ ,  $a_{\text{CDOM}}(438)$ ,  $S_{\text{NAP}}$  и  $S_{\text{CDOM}}$  соответствовали значениям, зарегистрированным ранее в водах вблизи Антарктического полуострова (Ferreira et al., 2018), а также были близки к величинам, отмеченным для зимнего периода в Чёрном море (Churilova et al., 2017).

Относительный вклад в поглощение света в поверхностном слое всех оптически активных компонент среды не одинаков. Так, большая часть поглощения света приходится на неживую компоненту. Запланировано проведение детального анализа факторов, влияющих на соотношение между всеми оптически активными компонентами, для последующего использования его как основы разработки уточнённого алгоритма восстановления  $C_a$  по спутниковым данным.

Полученный массив данных даёт возможность провести в дальнейшем анализ вариабельности показателей в зависимости от гидрофизических и гидрохимических условий среды. Кроме того, он позволяет выявить закономерности, которые могут быть применены в работах по изучению влияния взвешенного и растворённого вещества на спектральные свойства ФАР в море и способности фитопланктона использовать её в процессе фотосинтеза, а также в работах по моделированию показателей качества и продуктивности вод на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

#### **Выводы:**

1. Получены новые данные об изменчивости концентрации хлорофилла *a* в сумме с фео-пигментами и спектральных показателей поглощения света всеми оптически активными компонентами среды в проливе Брансфилда и в бассейне Пауэлла.
2. Отмечена неоднородность в вертикальном распределении концентрации хлорофилла *a*. Зарегистрирована высокая изменчивость (более чем на порядок величин) спектральных показателей поглощения света пигментами фитопланктона, взвешенным веществом и окрашенным растворённым органическим веществом.
3. Проведена параметризация поглощения света взвешенным и растворённым веществом. Получены коэффициенты, на основе которых можно восстанавливать спектры поглощения света этими компонентами.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по темам «Изучение пространственно-временной организации водных и сухопутных экосистем с целью развития системы оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий» (№ гос. регистрации АААА-А19-119061190081-9) и «Комплексные исследования современного состояния экосистемы Атлантического сектора Антарктики» (№ гос. регистрации АААА-А19-119100290162-0), а также в рамках государственного задания № 0128-2019-0008. Анализ оптических данных выполнен при поддержке гранта РФФИ № 19-55-45024 ИНД\_а.*

**Благодарность.** Авторы благодарят к. ф.-м. н. А. Бучельникова (СевГУ) за создание специальных программ, необходимых для проведения расчётов показателей поглощения на основе измеренных значений оптических плотностей проб.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- |  |  |
|--|--|
| <p>1. Чурилова Т. Я., Финенко З. З., Акимов А. И. Пигменты микроводорослей // <i>Микроводоросли Чёрного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования</i> / под ред. Ю. Н. Токарева,</p> | <p>З. З. Финенко, Н. В. Шадрин. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Гл. 11. С. 301–320. [Churilova T. Ya., Finenko Z. Z., Akimov A. I. Pigments of microalgae. In: <i>The Black Sea Microalgae: Problems of Biodiversity Preservation</i></p> |
|--|--|

- and Biotechnological Usage / Eds: Yu. N. Tokarev, Z. Z. Finenko, N. V. Shadrin. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2008, chap. 11, pp. 301–320. (in Russ.)]
2. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, vol. 100, iss. C7, pp. 13321–13332. <https://doi.org/10.1029/95JC00463>
  3. Churilova T., Moiseeva N., Efimova T., Suslin V., Krivenko O., Zemlianskaia E. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in the Crimean coastal waters (the Black Sea). *Proceedings of SPIE : 23<sup>th</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2017, vol. 10466, art. no. 104664B (14 p.). <https://doi.org/10.1117/12.2288339>
  4. Ciotti Á. M., Lewis M. R., Cullen J. J. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. *Limnology and Oceanography*, 2002, vol. 4, iss. 2, pp. 404–417. <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.2.0404>
  5. Dierssen H. M., Smith R. C. Bio-optical properties and remote sensing ocean color algorithms for Antarctic Peninsula waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, vol. 105, iss. C11, pp. 26301–26312. <https://doi.org/10.1029/1999JC000296>
  6. 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, pp. 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.007>
  7. Ferreira A., Ciotti Á. M., Mendes C. R. B., Uitz J., Bricaud A. Phytoplankton light absorption and the package effect in relation to photosynthetic and photoprotective pigments in the northern tip of Antarctic Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, vol. 122, iss. 9, pp. 7344–7363. <https://doi.org/10.1002/2017JC012964>
  8. Figueiras F. G., Arbones B., Estrada M. Implications of bio-optical modeling of phytoplankton photosynthesis in Antarctic waters: Further evidence of no light limitation in the Bransfield Strait. *Limnology and Oceanography*, 1999, vol. 44, iss. 7, pp. 1599–1608. <https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.7.1599>
  9. Figueroa F. L. Bio-optical characteristics of Gerlache and Bransfield Strait waters during an Antarctic summer cruise. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, vol. 49, pp. 675–691.
  10. IOCCG. *Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*. Vol. 4.0. *Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Best Practices for the Collection and Processing of Ship-based Underway Flow-through Optical Data* / Eds: A. R. Neely, A. Mannino. Dartmouth, NS, Canada : International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG), 2019, 22 p. (IOCCG Protocol Series ; vol. 4.0). <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-664>
  11. IOCCG. *Uncertainties in Ocean Colour Remote Sensing* / Ed.: Mélin F. Dartmouth, NS, Canada : International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG), 2019, 164 p. (Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group ; no. 18). <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-696>
  12. Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*<sub>1</sub> and *c*<sub>2</sub> in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 1975, vol. 167, iss. 2, pp. 191–194. [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3)
  13. Kirk J. T. O. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge : University Press, 2011, 649 p.
  14. Kishino M., Takahashi N., Okami N., Ichimura S. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bulletin of Marine Science*, 1985, vol. 37, no. 2, pp. 634–642.
  15. Lorenzen C. J. Determination of chlorophyll and phaeopigments: Spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*, 1967, vol. 12, iss. 2, pp. 343–346. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>
  16. Mitchell B. G. Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the quantitative filter technique. *Proceedings of SPIE: Ocean Optics X*, 1990, vol. 1302, pp. 137–148. <https://doi.org/10.1117/12.21440>
  17. Mitchell B. G., Holm-Hansen O. Bio-optical properties of Antarctic Peninsula waters:

- Differentiation from temperate ocean model. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1991, vol. 38, iss. 8–9, pp. 1009–1028. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(91\)90094-V](https://doi.org/10.1016/0198-0149(91)90094-V)
18. Morel A., Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1981, vol. 28, iss. 11, pp. 1375–1393. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(81\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0198-0149(81)90039-X)
19. *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods* / Eds: S. W. Jeffrey, R. F. C. Mantoura, S. W. Wright. Paris : UNESCO Publishing, 1997, 661 p. (Monographs on Oceanographic Methodology ; no. 10).
20. Reynolds R. A., Stramski D., Mitchell B. G. A chlorophyll-dependent semianalytical reflectance model derived from field measurements of absorption and backscattering coefficients within the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, vol. 106, iss. C4, pp. 7125–7138. <https://doi.org/10.1029/1999JC000311>
21. Ting C. S., Rocap G., King J., Chisholm S. W. Cyanobacterial photosynthesis in the oceans: The origins and significance of divergent light-harvesting strategies. *Trends in Microbiology*, 2002, vol. 10, iss. 3, pp. 134–142. [https://doi.org/10.1016/S0966-842X\(02\)02319-3](https://doi.org/10.1016/S0966-842X(02)02319-3)

## SPECTRAL BIO-OPTICAL PROPERTIES OF WATER OF ATLANTIC SECTOR OF ANTARCTIC

N. A. Moiseeva<sup>1</sup>, T. Ya. Churilova<sup>1</sup>,  
T. V. Efimova<sup>1</sup>, V. A. Artemiev<sup>2</sup>, and E. Yu. Skorokhod<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation

<sup>2</sup>P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russian Federation

E-mail: [nataliya-moiseeva@yandex.ru](mailto:nataliya-moiseeva@yandex.ru)

Studies of variability of spectral bio-optical properties of water of Atlantic sector of Antarctic were carried out during the 79<sup>th</sup> cruise of the RV “Akademik Mstislav Keldysh” (11.01.2020–04.02.2020). Chlorophyll *a* and phaeopigment concentration varied in the layer studied from 0.1 to 1.8 mg·m<sup>-3</sup>, except for two stations with content reaching 2.2 and 4.4 mg·m<sup>-3</sup>. The relationship was revealed between light absorption coefficient by phytoplankton and chlorophyll *a* concentration at a wavelength, corresponding to spectrum maxima:  $a_{ph}(438) = 0.044 \times C_a^{1.2}$ ,  $r^2 = 0.84$  ( $n = 117$ );  $a_{ph}(678) = 0.021 \times C_a^{1.1}$ ,  $r^2 = 0.89$  ( $n = 117$ ). Spectral distribution of light absorption coefficient by non-algal particles and colored dissolved organic matter was described by exponential function. Absorption parameterization coefficients were retrieved: (1) light absorption coefficient by non-algal particles (0.001–0.027 m<sup>-1</sup>) and by colored dissolved organic matter (0.016–0.19 m<sup>-1</sup>) at a wavelength of 438 nm; (2) spectral slope coefficients of these components (0.005–0.016 and 0.009–0.022 nm<sup>-1</sup>, respectively).

**Keywords:** chlorophyll *a*, spectral light absorption coefficient, phytoplankton, non-algal particles, colored dissolved organic matter, Antarctic