

Вертикальное распределение биооптических показателей вод Азово-Черноморского бассейна в апреле – мае 2019 года

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

*Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия
E-mail: tefimova@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 16.04.2020 г., после доработки – 20.05.2020 г.

Цель. Цель работы – исследовать пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* и спектральных показателей поглощения света оптически активными компонентами среды в водах Азово-Черноморского бассейна в период весенней перестройки гидрологической структуры вод.

Методы и результаты. В работе использованы результаты исследований, выполненных в 106-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» с 19 апреля по 10 мая 2019 г. Концентрацию хлорофилла *a* измеряли спектрофотометрическим методом. Определение спектральных показателей поглощения света проводили в соответствии с протоколом NASA 2018 г. Оптические измерения проводили на двулучевом спектрофотометре LAMBDA 35 (PerkinElmer). Показано, что концентрация хлорофилла *a* в поверхностном слое Черного моря менялась от 0,21 до 1,2 мг/м³. На некоторых глубоководных станциях наблюдалось увеличение содержания пигментов в нижней части зоны фотосинтеза, связанное с началом прогрева поверхностных вод и процессом формирования сезонной стратификации вод. В нижней части зоны фотосинтеза спектры показателей поглощения света пигментами фитопланктона были более сглаженные, чем в поверхностном слое. Вклад неживой взвеси в поглощение света взвешенным веществом на длине волны 438 нм в глубоководной части моря изменялся от 40 ± 15 % на поверхности до 29 ± 12 % на глубине, а в прибрежной части составлял 54 ± 11 %. Вклад растворенного органического вещества в поглощение света взвешенным и растворенным веществом был в среднем 69 %. В Азовском море наблюдалось однородное вертикальное распределение концентрации хлорофилла *a* (в среднем 6,2 мг/м³) и спектральных показателей поглощения света пигментами фитопланктона. Вклад неживой взвеси в поглощение света взвешенным веществом составлял 40 ± 14 %, а растворенного органического вещества в поглощение света взвешенным и растворенным веществом – 52 ± 6 %.

Выводы. Получены новые данные о пространственном распределении концентрации хлорофилла *a* и спектральных показателей поглощения света оптически активными компонентами среды в период весенней перестройки гидрологической структуры вод Черного и Азовского морей.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, спектральный показатель поглощения света, неживое взвешенное вещество, окрашенное растворенное органическое вещество, Черное море, Азовское море.

Благодарности: работа выполнена по теме ГЗ № АААА-А19-119061190081-9 и при финансовой поддержке проектов РФФИ № 18-45-920070 и № 18-05-80025.

Для цитирования: Вертикальное распределение биооптических показателей вод Азово-Черноморского бассейна в апреле – мае 2019 года / Т. В. Ефимова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 571–581. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-571-581

Vertical Distribution of Bio-Optical Characteristics of the Azov – Black Sea Basin Waters in April – May, 2019

T. V. Efimova*, T. Ya. Churilova, E. Yu. Skorokhod, N. A. Moiseeva, E. A. Zemlianskaia

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

*e-mail: tefimova@ibss-ras.ru

Purpose. The work is aimed at investigating spatial distribution of the chlorophyll *a* concentration and the spectral light absorption coefficients by all the optically active components in the Azov and Black seas in spring, when the seawater hydrophysical structure changes.

Methods and Results. The data collected in the 106th scientific cruise of R/V «Professor Vodyanitsky» in April 19 – May 10, 2019 were used. The chlorophyll *a* concentration was measured by the spectrophotometric method. The spectral light absorption coefficients were determined in accordance with the NASA protocol 2018. The optical measurements were performed using the dual-beam spectrophotometer *Lambda 35* (PerkinElmer). It was shown that in the surface waters of the Black Sea, the chlorophyll *a* concentration varied from 0.21 to 1.2 mg/m³. At some stations in the deep-sea region, the increased values of this parameter were observed in the lower part of the euphotic zone that was associated with the beginning of seasonal water stratification due to the surface water heating. In this case, the spectra of the phytoplankton light absorption coefficients were more smoothed in the lower part of the euphotic zone than those in the upper layer. In the deep-sea region, the non-algal particles contribution to the total particulate light absorption at wavelength 438 nm changed with depth from 40 ± 15 % at the surface to 29 ± 12 % near the bottom of the euphotic zone; whereas in the coastal waters this parameter was almost unchangeable within the water column (54 ± 11 %). No significant change of the colored dissolved organic matter contribution to the total light absorption with depth was revealed (69 % on average). In the Sea of Azov, vertical distribution both of the chlorophyll *a* concentration (6.2 mg/m³ on average) and the spectral light absorption coefficients by all the optically active components was observed uniform. The non-algal particles contribution to the particulate light absorption was 40 ± 14 %, and the colored dissolved organic matter contribution to the total light absorption constituted 52 ± 6 %.

Conclusions. New data on spatial distribution of the chlorophyll *a* concentration and the spectral light absorption coefficients by the optically active components in the Black and Azov seas were obtained for the spring period when the seawater hydrophysical characteristics changed.

Keywords: chlorophyll *a*, spectral light absorption coefficients, non-algal particles, colored dissolved organic matter, Black Sea, Sea of Azov.

Acknowledgments: The research was funded by Russian Academy of Sciences (grant No. AAAA-A19-119061190081-9) and partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants No. 18-45-920070 and 18-05-80025).

For citation: Efimova, T.V., Churilova, T.Ya., Skorokhod, E.Yu., Moiseeva, N.A. and Zemlianskaia, E.A., 2020. Vertical Distribution of Bio-Optical Characteristics of the Azov – Black Sea Basin Waters in April – May, 2019. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(5), pp. 525-534. doi:10.22449/1573-160X-2020-5-525-534

Введение

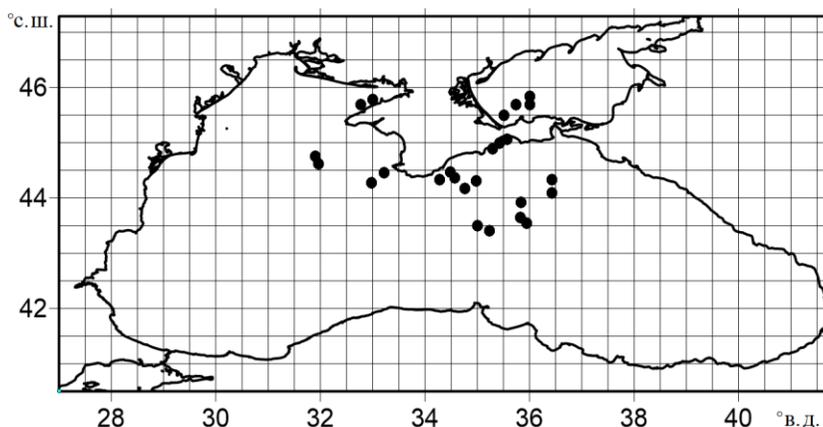
Основными оптически активными компонентами водной среды являются фитопланктон, неживая взвесь и окрашенное растворенное органическое вещество. На распределение фитопланктона в толще воды влияют освещенность, температура и условия минерального питания. Анализ данных о пространственном распределении концентрации хлорофилла *a* и спектральных показателей поглощения света всеми оптически активными компонентами

среды позволяет выявить закономерности их изменчивости в зависимости от гидрофизических факторов среды в период весенней перестройки гидрологической структуры вод. Эти закономерности необходимы для развития региональных моделей определения концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое [1], восстановления профиля концентрации хлорофилла *a* [2] и для оценки спектральной облученности, проникающей в водную толщу [3] Черного и Азовского морей, с учетом сезонных особенностей среды.

Цель работы заключается в исследовании вертикального распределения концентрации хлорофилла *a* и спектральных показателей поглощения света всеми оптически активными компонентами среды в водах Азово-Черноморского бассейна в период весенней перестройки гидрологической структуры вод.

Материал и методы

Измерения спектральных биооптических показателей вод Азово-Черноморского бассейна были выполнены в 106-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» с 19 апреля по 10 мая 2019 г. (рис. 1).



Р и с. 1. Карта расположения станций биооптических исследований в 106-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» 19 апреля – 10 мая 2019 г.

F i g. 1. Map of location of bio-optical stations in the 106th cruise of R/V “Professor Vodyanitsky”, April 19 – May 10, 2019

Отбор проб воды (4 л) на различных горизонтах в слое 0–70 м производился на дневных станциях с помощью батометров. Горизонты для отбора проб выбирали с учетом вертикальных профилей температуры, флуоресценции хлорофилла *a*, проникающей фотосинтетически активной радиации (ФАР) и прозрачности воды. Прозрачность воды оценивали по глубине видимости диска Секки (Z_s). Вертикальные профили температуры, флуоресценции хлорофилла *a* и ФАР получали с помощью глубоководного зондирующего комплекса *Idronaut Ocean Seven 320Plus*.

Нижнюю границу зоны фотосинтеза (Z_{eu}) в Черном море оценивали по глубине проникновения 1 % от падающей на поверхность моря ФАР. В Азовском море, где датчик ФАР не использовали, Z_{eu} рассчитывали на основе зависимости ослабления света (I) с глубиной (z):

$$I(z) = I(0) \exp(-k_d z), \quad (1)$$

где k_d – показатель диффузионного ослабления света для всего спектрального диапазона ФАР в среднем для слоя Z_{eu} . На основании уравнения (1) можно рассчитать глубину зоны фотосинтеза:

$$Z_{eu} = 4,6/k_d.$$

Величину k_d рассчитывали по значениям Z_s , используя зависимость [4, с. 68].

Чтобы определить концентрацию хлорофилла a в сумме с феопигментами ($Chl-a$) и спектры показателей поглощения света взвешенным веществом и пигментами фитопланктона, пробы воды объемом 1–2 л фильтровали через стекловолкнистые фильтры (*Whatman GF/F*) при слабом вакууме (~ 0,2 атм). Фильтры с пробой на определение $Chl-a$ складывали и заворачивали в фольгу. Фильтры с пробой фитопланктона на определение показателей спектров поглощения света помещали в пластиковые держатели. Пробы хранили в сжиженном азоте до измерений в лаборатории с соблюдением необходимых условий [5]. Для определения спектров показателей поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом ($CDOM$) пробы объемом 0,2 л фильтровали через нуклеопоровый фильтр (*Sartorius*) с размерами пор 0,2 мкм под вакуумом при давлении не более 0,2 атм.

$Chl-a$ в море определяли спектрофотометрическим методом [6].

Определение спектральных показателей поглощения света взвешенным и растворенным органическим веществом проводили в соответствии с современным протоколом *NASA* [7]. Спектры показателей поглощения света взвешенным веществом и пигментами фитопланктона измеряли по стандартной методике «количественного определения на увлажненных фильтрах» [8, 9]. Разделение общего поглощения света взвешенным веществом ($a_p(\lambda)$) на фитопланктонную ($a_{ph}(\lambda)$) и не связанную с фитопланктоном ($a_{NAP}(\lambda)$) составляющие проводили по методу, описанному в работе [10]. Коррекцию показателей поглощения света взвесью, обусловленную изменением оптических свойств взвеси при осаждении частиц на фильтр в сравнении с оптическими свойствами суспензии (β -correction), проводили с использованием уравнения, приведенного в работе [11, с. 146].

Оптические измерения проводили на двулучевом спектрофотометре *LAMBDA 35 (PerkinElmer)* с интегрирующей сферой в диапазоне длин волн (λ) от 350 до 750 нм (ацетоновые экстракты и взвешенное вещество на фильтре) и от 250 до 750 нм ($CDOM$).

Спектральное распределение показателей поглощения света неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(\lambda)$) и $CDOM$ ($a_{CDOM}(\lambda)$) описывали экспоненциальной зависимостью

$$a(\lambda) = a(438) \exp(-S(\lambda - 438)),$$

где S – показатель экспоненты, нм^{-1} , значение которого подбирали методом наименьших квадратов с использованием диапазона длин волн от 400 до 700 нм для NAP и от 350 до 500 нм для $CDOM$.

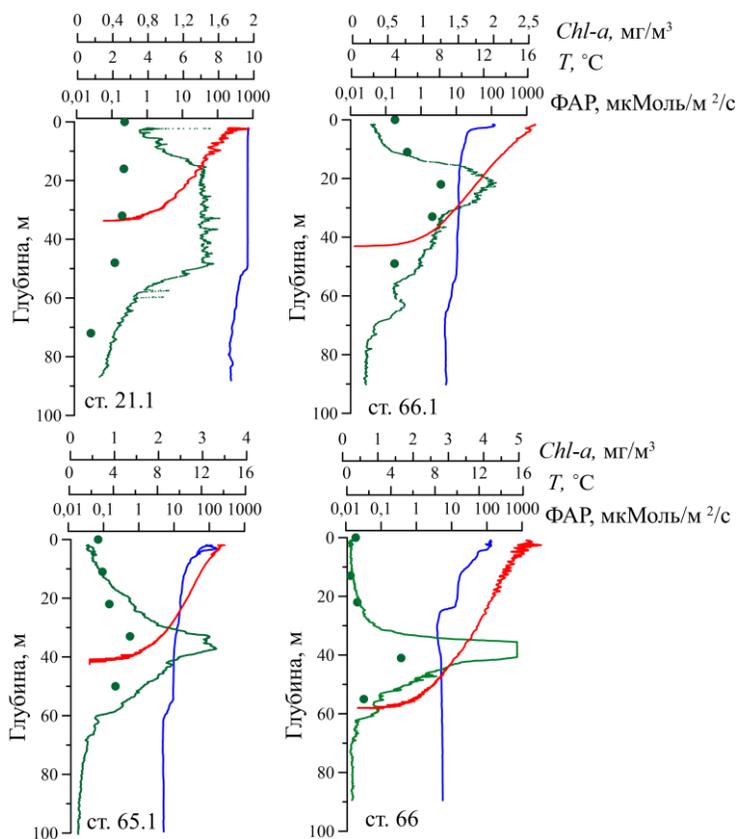
Результаты и обсуждение

Прозрачность вод и глубина зоны фотосинтеза в исследуемый период в Черном море значительно различались между станциями. В глубоководном районе Черного моря значение Z_s изменялось от 11 до 19 м и равнялось в среднем 14 м. Z_{eu} варьировала от 28 до 44 м и достигала в среднем 35 м. Прибрежная зона моря отличалась более низкой прозрачностью вод: Z_s находилась в диапазоне от 5 до 11 м и составляла в среднем 7,5 м, а Z_{eu} изменялась от 15 до 28 м. Глубина верхнего перемешанного слоя (ВКС) в связи с весенним прогревом поверхностных вод и началом сезонной стратификации варьировала между станциями от 3 до 50 м.

Важным показателем продуктивности и качества вод является концентрация основного фотосинтетически активного пигмента фитопланктона хлорофилла *a*. В Черном море в период исследований величина *Chl-a* в поверхностном слое изменялась от 0,21 до 1,2 мг/м³ и в среднем составляла 0,60 мг/м³. Существенные различия наблюдали в характере вертикального распределения значений *Chl-a*. Отмечены профили с однородным распределением этого параметра и профили с увеличением *Chl-a* в нижней части зоны фотосинтеза в 1,5–2,5 раза в сравнении со значениями в поверхностном слое моря (рис. 2).

В связи с тем, что весна является переходным периодом, в котором происходит перестройка гидрологической/гидрофизической вертикальной структуры вод, вертикальное распределение пигментов фитопланктона различалось по станциям. На одних глубоководных станциях еще наблюдалось характерное для зимнего периода года почти однородное вертикальное распределение хлорофилла *a* в пределах ВКС, ограниченного снизу слоем максимального температурного градиента (рис. 2). На других станциях, где в результате начавшейся сезонной стратификации поверхностных вод слой существования фитопланктона оказался разделен термоклинном на два квазиизолированных слоя (ВКС и слой, расположенный под термоклинном), на глубине появился максимум хлорофилла *a*. Фитопланктон в этих слоях зоны фотосинтеза существовал в разных условиях. Фитопланктон в ВКС находился в условиях более высокой солнечной инсоляции и температуры, но меньшей биогенной обеспеченности, чем в слое под термоклинном. Фитопланктон в нижнем слое фотосинтеза существовал при более низкой солнечной облученности и температуре, но в условиях лучшей биогенной обеспеченности, чем в ВКС. Эти различия обуславливают изменения в структурных и функциональных характеристиках фитопланктона, существующего в верхних и нижних слоях зоны фотосинтеза, разделенных сезонным термоклинном. В частности, уменьшение солнечной инсоляции с глубиной в пределах зоны фотосинтеза приводит к увеличению содержания хлорофилла *a* в клетках планктонных водорослей, обитающих в глубинном слое под термоклинном [12, 13].

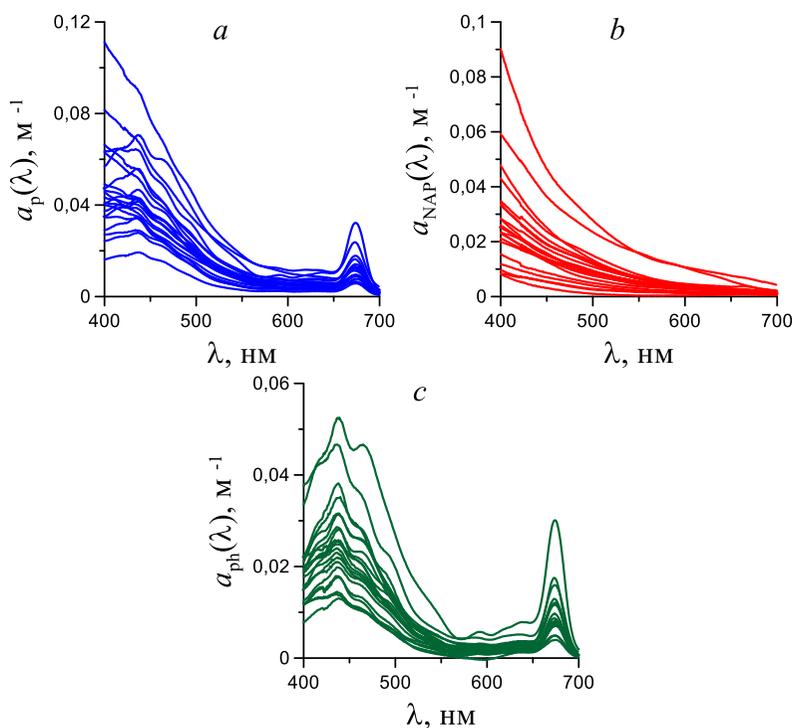
Таким образом, начавшееся нарушение типичного для зимы однородного вертикального распределения *Chl-a* и увеличение содержания хлорофилла *a* в нижней части зоны фотосинтеза связано с началом весеннего прогрева поверхностных вод и процессом формирования сезонной стратификации, приведшими к затруднению глубокого вертикального перемешивания вод.



Р и с. 2. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла *a* в сумме с феопигментами *Chl-a* по натуральным измерениям (зеленые круги) и по данным датчика флуоресценции зондирующего комплекса *Idronaut Ocean Seven 320 Plus* (зеленая линия), температуры *T* (синяя линия), проникающей фотосинтетически активной радиации ФАР (красная линия) на отдельных станциях в глубоководной части Черного моря во второй половине апреля – первой половине мая 2019 г.

F i g. 2. Vertical distribution of the measured chlorophyll *a* concentration taken together with phaeopigment *Chl-a* (green circles) and the *Chl-a* data from the CTD *Idronaut Ocean Seven 320 Plus* (green line), temperature *T* (blue line) and photosynthetically available radiation (PAR) (red line) at some stations in the deep part of the Black Sea in the second half of April – the first half of May, 2019

В спектрах поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$) отмечаются два основных пика – на длинах волн 438 и 678 нм (рис. 3). Соотношение между показателями поглощения в этих пиках (R) в поверхностном слое Черного моря составляло $2,8 \pm 0,4$. В нижней части зоны фотосинтеза спектры $a_{ph}(\lambda)$ были более сглаженные и соотношение R составляло $2,3 \pm 0,3$. Такое изменение светопоглощающей способности фитопланктона может отражать фотоадаптивное уменьшение доли вспомогательных пигментов каротиноидов [14] с глубиной в пределах освещенного слоя и изменение размерного состава клеток [15] в фитопланктонном сообществе.



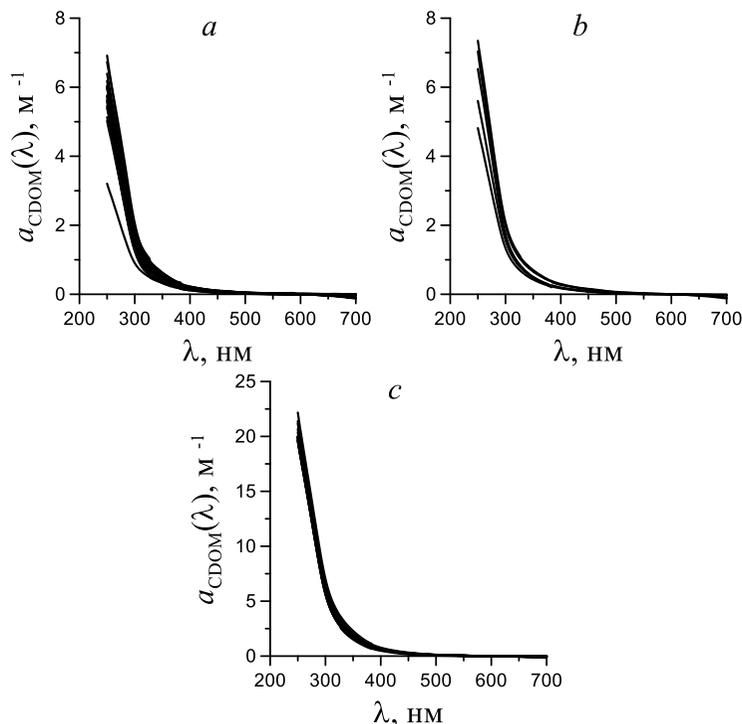
Р и с. 3. Спектры показателей поглощения света всем взвешенным веществом ($a_p(\lambda)$) (a), неживой компонентой ($a_{\text{NAP}}(\lambda)$) (b) и пигментами фитопланктона ($a_{\text{ph}}(\lambda)$) (c) на поверхности Черного моря во второй половине апреля – первой половине мая 2019 г.

Fig. 3. Spectra of the light absorption coefficients by total particles ($a_p(\lambda)$) (a), non-algal particles ($a_{\text{NAP}}(\lambda)$) (b) and phytoplankton pigments ($a_{\text{ph}}(\lambda)$) (c) on the Black Sea surface in the second half of April – the first half of May, 2019

В поверхностном слое глубоководной части Черного моря поглощение света неживым взвешенным веществом на длине волны 438 нм (где находится синий максимум спектра $a_{\text{ph}}(\lambda)$) составляло в среднем $0,017 \pm 0,008 \text{ м}^{-1}$, что совпадает с данными, полученными для зимнего периода года [16]. При этом относительный вклад неживой взвеси $a_{\text{NAP}}(438)$ в общее поглощение света всем взвешенным веществом на длине волны 438 нм ($a_p(438)$) был в среднем $40 \pm 15 \%$. В слое от 20 до 60 м глубоководной части Черного моря значение $a_{\text{NAP}}(438)$ составляло $0,014 \pm 0,006 \text{ м}^{-1}$, вклад $a_{\text{NAP}}(438)$ в $a_p(438)$ равнялся $29 \pm 12 \%$. В водах прибрежной части Черного моря показатель $a_{\text{NAP}}(438)$ был в два раза больше ($0,037 \pm 0,019 \text{ м}^{-1}$), чем в глубоководной части, доля $a_{\text{NAP}}(438)$ в $a_p(438)$ составляла $54 \pm 11 \%$. Такие же высокие значения ($\sim 50 \%$) вклада $a_{\text{NAP}}(438)$ в общее поглощение взвешенным веществом ранее были получены в прибрежных водах в районе п. Кацивели [17].

Спектральное распределение $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ описывается экспоненциальной зависимостью (рис. 3). Анализ изменчивости коэффициента экспоненты (S_{NAP}) в акватории Черного моря выявил его слабую вариабельность как между станциями, так и с глубиной. Значение S_{NAP} составляло в среднем $0,009 \pm 0,001 \text{ нм}^{-1}$, что соответствует данным, полученным ранее для других районов Мирового океана [18].

Показатель поглощения света *CDOM* на длине 438 нм ($a_{\text{CDOM}}(438)$) в поверхностном слое глубоководного района Черного моря в весенний период составлял $0,098 \pm 0,026 \text{ м}^{-1}$ (рис. 4), а в поверхностном слое прибрежной части – $0,13 \pm 0,05 \text{ м}^{-1}$. Вклад $a_{\text{CDOM}}(438)$ в общее поглощение света взвешенным и растворенным веществом составлял $69 \pm 8 \%$.



Р и с. 4. Спектры показателей поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{\text{CDOM}}(\lambda)$) в поверхностном слое глубоководного района Черного моря (a), в поверхностном слое прибрежной части Черного моря (b) и в водах Азовского моря (c) во второй половине апреля – первой половине мая 2019 г.

Fig. 4. Spectra of the light absorption coefficients by colored dissolved organic matter ($a_{\text{CDOM}}(\lambda)$) in the surface layer of the Black Sea deep part (a), in the surface layer of the Black Sea coastal part (b) and in the Azov Sea waters (c) in the second half of April – the first half of May, 2019

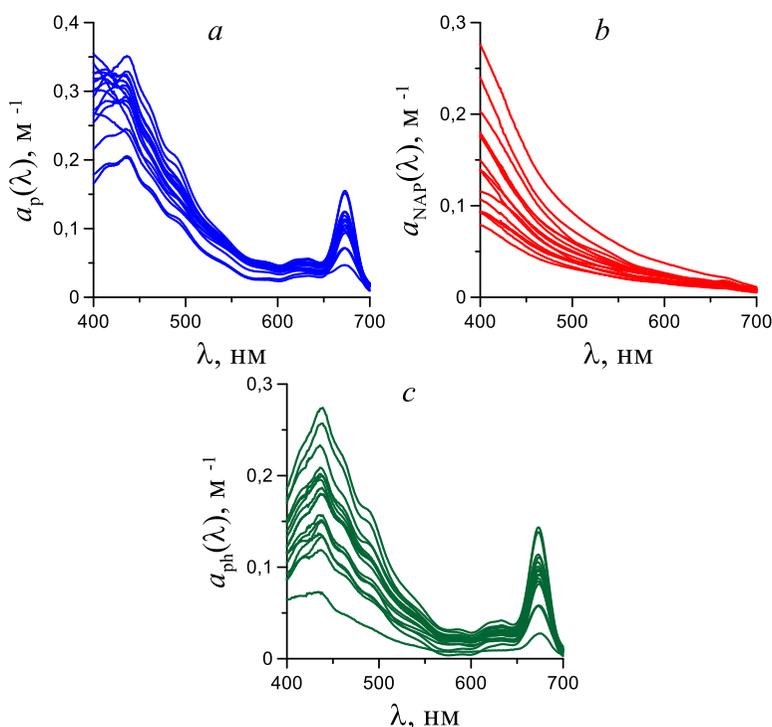
Среднее значение показателя экспоненты S_{CDOM} в поверхностном слое Черного моря в исследуемый период для диапазона 350–500 нм равнялось $0,017 \pm 0,002 \text{ нм}^{-1}$. Это не противоречит литературным данным, в которых для разных районов Мирового океана приводятся значения S_{CDOM} в диапазоне от 0,014 до $0,025 \text{ нм}^{-1}$ [19].

Известно, что на спектры показателей поглощения света *CDOM* влияет соотношение в среде поглощающих свет высоко- и низкомолекулярных фракций растворенных органических соединений [20]. Состав *CDOM* по соотношению в нем высоко- и низкомолекулярных органических соединений характеризует величина S_r – отношение показателей экспоненты для диапазонов длин волн 275–295 и 350–400 нм [21]. Показано, что значение S_r

в поверхностном слое глубоководной и прибрежной частей Черного моря в весенний период было одинаковым и составляло в среднем $1,7 \pm 0,2$.

В Азовском море в весенний период года была отмечена низкая прозрачность вод. Глубина Z_s соответствовала $\sim 2,5$ м. Соответственно, глубина эвфотического слоя равнялась ~ 9 м при глубине станций отбора проб от 10 до 12 м. То есть почти вся водная толща до дна была освещена. При этом наблюдалось почти однородное вертикальное распределение концентрации хлорофилла *a*. Значение *Chl-a* в поверхностном слое моря изменялось между станциями от 4,9 до 8,8 мг/м³.

Соотношение между показателями поглощения света пигментами фитопланктона в синем и красном максимумах спектров $a_{ph}(\lambda)$ в поверхностном слое и в толще Азовского моря было меньше (рис. 5), чем в водах Черного моря, и составляло в среднем $2,00 \pm 0,26$.



Р и с. 5. Спектры показателей поглощения света всем взвешенным веществом ($a_p(\lambda)$) (a), неживой компонентой ($a_{NAP}(\lambda)$) (b) и пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$) (c) на поверхности и в толще Азовского моря во второй половине апреля – первой половине мая 2019 г.

F i g. 5. Spectra of the light absorption coefficients by particles ($a_p(\lambda)$) (a), non-algal particles ($a_{NAP}(\lambda)$) (b) and phytoplankton pigments ($a_{ph}(\lambda)$) (c) on the surface and in the water column of the Sea of Azov in the second half of April – the first half of May, 2019

Воды Азовского моря отличались от вод Черного моря большими на порядок значениями $a_{NAP}(438)$ ($0,11 \pm 0,04$ м⁻¹). Относительный вклад $a_{NAP}(438)$ в $a_p(438)$ при этом равнялся в среднем 40 ± 14 %, как и в поверхностном слое глубоководной части Черного моря. Коэффициент S_{NAP} был таким же, как и в Черном море.

Значение показателя $a_{CDOM}(438)$ в Азовском море было почти в три раза больше, чем в Черном море, и составляло в среднем $0,310 \pm 0,058 \text{ м}^{-1}$ (рис. 4). Соответствующий вклад $a_{CDOM}(438)$ в общее поглощение света всем взвешенным и растворенным веществом был несколько меньше, чем в Черном море, и равнялся $52 \pm 6 \%$. При этом в водах Азовского моря были получены несколько большие значения S_{CDOM} для диапазона 350–500 нм ($0,019 \pm 0,001 \text{ нм}^{-1}$), чем в водах Черного моря. И в Черном, и в Азовском море значения S_{CDOM} находятся в диапазоне, соответствующем литературным данным [19]. Показатель S_r в более эвтрофированных водах Азовского моря, наоборот, был меньше и составил $1,4 \pm 0,1$.

Заключение

Получены новые данные о пространственном распределении концентрации хлорофилла *a* и спектральных показателей поглощения света оптически активными компонентами среды в период весенней перестройки гидрологической структуры вод Черного и Азовского морей. Выявленные закономерности позволят повысить точность имеющихся региональных моделей для Черного моря и разработать соответствующие модели для Азовского моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслин В. В., Чурилова Т. Я., Сосик Х. М. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла *a* в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7, № 2. С. 24–42.
2. Finenko Z. Z., Churilova T. Ya., Lee R. I. Dynamics of the vertical distributions of chlorophyll and phytoplankton biomass in the Black Sea // Oceanology. 2005. Vol. 45, suppl. 1. P. S112–S126.
3. Churilova T. Ya., Suslin V. V., Sosik H. M. A spectral model of underwater irradiance in the Black Sea // Physical Oceanography. 2009. Vol. 19, iss. 6. P. 366–378. doi:10.1007/s11110-010-9060-8
4. Ведерников В. И. Первичная продукция и хлорофилл в Черном море в летне-осенний период // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря. М. : Наука, 1989. С. 65–83. URL: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-1989blacksea.pdf> (дата обращения: 20.08.2020).
5. Sosik H. M. Storage of marine particulate samples for light-absorption measurements // Limnology and Oceanography. 1999. Vol. 44, iss. 4. P. 1139–1141. doi:10.4319/lo.1999.44.4.1139
6. Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and phytoplankton // Biochemie und Physiologie der Pflanzen. 1975. Vol. 167, iss. 2. P. 191–194. [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3)
7. Neeley A. R. Inherent optical property measurements and protocols: absorption coefficient. Dartmouth, NS, Canada : International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG), 2018. 78 p. (IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation ; Volume 1.0). <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-119>
8. Yentsch C. S. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean // Limnology and Oceanography. 1962. Vol. 7, iss. 2. P. 207–217. doi: 10.4319/lo.1962.7.2.0207
9. Mitchell B. G., Kiefer D. A. Chlorophyll *a* specific absorption and fluorescence excitation spectra for light-limited phytoplankton // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. 1988. Vol. 35, iss. 5. P. 639–663. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90024-6](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90024-6)
10. Tassan S., Ferrari G. M. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters // Limnology and Oceanography. 1995. Vol. 40, iss. 8. P. 1358–1368. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1358>

11. *Mitchell B. G.* Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the quantitative filter technique // SPIE Proceedings. Bellingham, Washington : SPIE, 1990. Vol. 1302 : Ocean Optics X. P. 137–148. <https://doi.org/10.1117/12.21440>
12. *Hoepffner N., Sathyendranath S.* Bio-optical characteristics of coastal waters: Absorption spectra of phytoplankton and pigment distribution in the western North Atlantic // Limnology and Oceanography. 1992. Vol. 37, iss. 8. P. 1660–1679. doi:10.4319/lo.1992.37.8.1660
13. *McManus G. B., Dawson R.* Phytoplankton pigments in the deep chlorophyll maximum of the Caribbean Sea and the western tropical Atlantic Ocean // Marine Ecology Progress Series. 1994. Vol. 113. P. 199–206. doi:10.3354/meps113199
14. *Morel A., Lazzara L., Gostan J.* Growth rate and quantum yield time response for a diatom to changing irradiances (energy and color) // Limnology and Oceanography. 1987. Vol. 32, iss. 5. P. 1066–1084. doi:10.4319/lo.1987.32.5.1066
15. *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. P. 1375–1393. doi:10.1016/0198-0149(81)90039-X
16. Spectral features of particulate light absorption in the Black Sea in winter / T. Efimova [et al.] // SPIE Proceedings. Bellingham, Washington : SPIE, 2019. Vol. 11208 : 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 112084V. doi:10.1117/12.2540799
17. Parameterization of light absorption by phytoplankton, nonalgal particles and coloured dissolved organic matter in the Black Sea / T. Churilova [et al.] // Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2007): Proceedings of 4th International Conference. Nizhny Novgorod, 2007. P. 70–74.
18. *Wozniak B., Dera J.* Light Absorption in Sea Water. New York : Springer, 2007. 460 p. doi:10.1007/978-0-387-49560-6
19. *Green S. A., Blough N. V.* Optical absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter in natural waters // Limnology and Oceanography. 1994. Vol. 39, iss. 8. P. 1903–1916. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.8.1903>
20. Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter / Eds. D. Hansell, C. Carlson. Amsterdam : Academic Press, 2014. 712 p.
21. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter / J. R. Helms [et al.] // Limnology and Oceanography. 2008. Vol. 53, iss. 3. P. 955–969. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955>

Об авторах:

Ефимова Татьяна Владимировна, младший научный сотрудник, научно-исследовательский центр Геоматики, ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **SPIN-код: 1668-0742, ORCID ID: 0000-0003-3908-4160**, tefimova@ibss-ras.ru

Чурилова Татьяна Яковлевна, кандидат биологических наук, руководитель научно-исследовательского центра Геоматики, ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **SPIN-код: 2238-9533, ORCID ID: 0000-0002-0045-7284**, tanya.churilova@ibss-ras.ru

Скорород Елена Юрьевна, младший научный сотрудник, научно-исследовательский центр Геоматики, ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **SPIN-код: 3314-5775, ORCID ID: 0000-0002-3057-3964**, elenaskorokhod@ibss-ras.ru

Моисеева Наталия Александровна, младший научный сотрудник, научно-исследовательский центр Геоматики, ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **SPIN-код: 8946-3315, ORCID ID: 0000-0003-1356-7981**, nataliya-moiseeva@yandex.ru

Землянская Екатерина Александровна, ведущий инженер, научно-исследовательский центр Геоматики, ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **SPIN-код: 5277-9962, ORCID ID: 0000-0003-1360-6581**, ekaterinakoval@hotmail.com