

Т.В.Ефимова, Н.А.Моисеева, Т.Я.Чурилова, О.В.Кривенко

*Институт морских биологических исследований
им.А.О.Ковалевского РАН, г.Севастополь*

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ СРЕДЫ В ЗОНЕ ФОТОСИНТЕЗА ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ (СЕНТЯБРЬ 2015 ГОДА)

Представлены результаты измерений и параметризации поглощения света фитопланктоном, неживым взвешенным и окрашенным растворенным веществом в глубоководном районе Черного моря в сентябре 2015 г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *поглощение света, фитопланктон, взвешенное и растворённое органическое вещество, Черное море*

Спутниковая информация широко используется для оценки показателей продуктивности вод. С целью уточнения пересчёта оптических сигналов со спутников в показатели продуктивности конкретных водоёмов требуется разработка алгоритмов, учитывающих особенности оптических характеристик этих вод. Для повышения точности региональных алгоритмов необходимо определить сезонные особенности поглощения света всеми оптически активными компонентами среды и их соотношения [1]. В рамках решения данной задачи выполнен анализ данных биооптических измерений, выполненных в восточном глубоководном районе Черного моря в сентябре 2015 г.

Методы. Измерение биооптических показателей проводились методами: концентрация хлорофилла *a* (*Хл a*) спектрофотометрическим [2] методом; поглощение света взвешенным веществом и фитопланктоном по методу [3, 4]; поглощение света окрашенным растворенным органическим веществом по методу [5]. Оптические измерения проводили на двулучевом спектрометре *Lambda 35 (Perkin Elmer)* с интегрирующей сферой в диапазоне длин волн (λ) от 350 до 750 нм (взвешенное вещество) и от 250 до 750 нм (окрашенное растворенное органическое вещество – CDOM). В экспедиции пробы хранились с соблюдением необходимых условий [6].

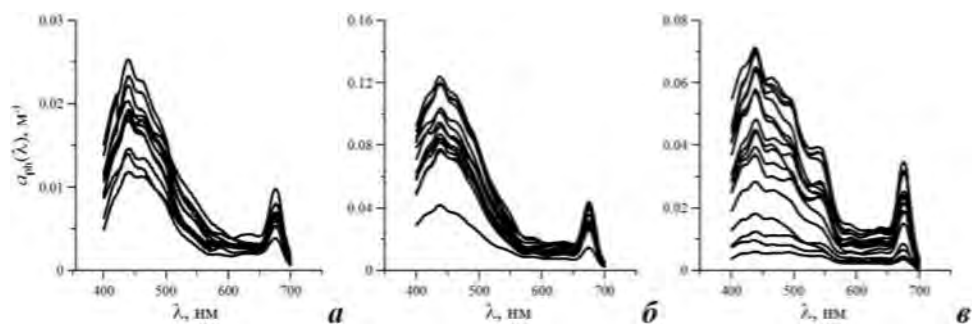
Спектральное распределение коэффициентов поглощения света неживым взвешенным веществом ($a_{\text{NAP}}(\lambda)$) и окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{\text{CDOM}}(\lambda)$) описывали экспоненциальной зависимостью:

$$a(\lambda) = a(440) \exp(-S(\lambda - 440)),$$

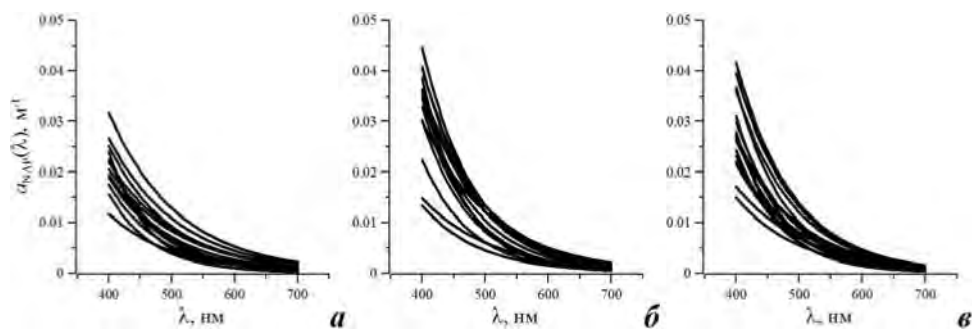
где S – показатель экспоненты (нм^{-1}), который определяли для диапазона 350 – 500 нм.

Результаты и обсуждение. Спектры коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{\text{ph}}(\lambda)$), $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ и $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$, измеренные в сентябре 2015 г. в восточной глубоководной части Черного моря, представлены на рис.1 – 3 соответственно.

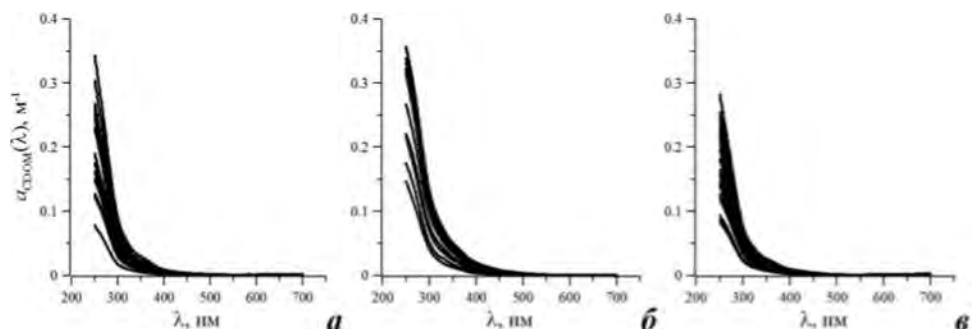
В период исследований отмечено неоднородное распределение *Хл a* в исследованном слое от 0 до 50 м. В поверхностном слое отмечена наимень-



Р и с . 1 . Спектры коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона: в поверхностном слое (а), в термоклине (7 – 13 м) (б), под термоклином (в).



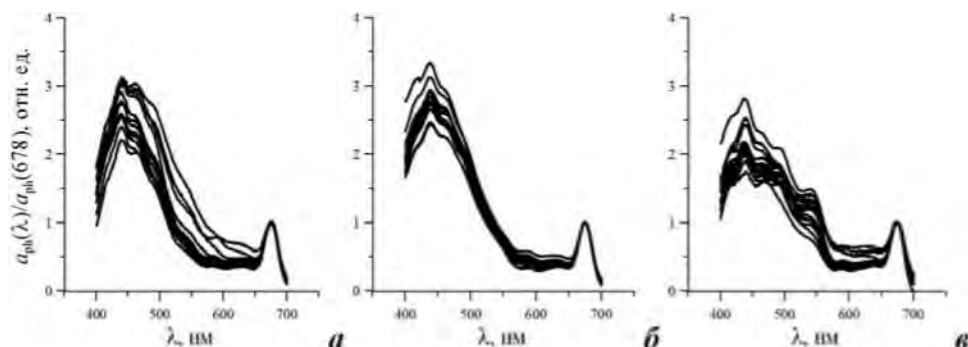
Р и с . 2 . Спектры коэффициентов поглощения света неживым взвешенным веществом: в поверхностном слое (а), в термоклине (7 – 13 м) (б), под термоклином (в).



Р и с . 3 . Спектры коэффициентов поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом: в поверхностном слое (а), в термоклине (7 – 13 м) (б), под термоклином (в).

шая концентрация Хл *a* (*Ca*), которая изменялась от 0,20 до 0,38 мг·м⁻³, составляя в среднем 0,26 (± 0,04) мг·м⁻³. В термоклине, который находился на глубинах 7 – 13 м в зависимости от станции, *Ca* была максимальной: 0,59 – 2,9 мг·м⁻³, составляя в среднем 1,5 (± 0,7) мг·м⁻³. Под термоклином (25 – 40 м) *Ca* варьировала от 0,76 до 1,7 мг·м⁻³, составляя в среднем 1,2 (± 0,33) мг·м⁻³.

Видимость диска Секки (*Zs*) изменялась между станциями от 12 до 17 м. Используя связь между величинами *Zs* и диффузионным коэффициентом ос-



Р и с . 4 . Спектры коэффициентов поглощения света пигментами фитопланктона, нормированных на поглощение на длине волны 678 нм ($a_{ph}(\lambda)/a_{ph}(678)$) в разных слоях зоны фотосинтеза в глубоководном районе Черного моря в сентябре 2015 г.: над термоклинном (а), в термоклине (б), под термоклинном (в).

лабления света [7], сделана оценка зоны фотосинтеза, которая распространялась до глубин $\sim 30 - 40$ м. Следовательно, фитопланктон на всех исследованных горизонтах существовал в зоне фотосинтеза. Форма спектров коэффициентов поглощения света фитопланктоном, нормированных на поглощение на длине волны 678 нм ($a_{ph}(\lambda)/a_{ph}(678)$) существенно различалась между слоями (рис.4).

При этом соотношение коэффициентов поглощения света в синем и красном максимумах спектра ($R = a_{ph}(440)/a_{ph}(678)$) в поверхностном слое и в термоклине составляло $2,8 (\pm 0,44)$ и $2,9 (\pm 0,19)$ соответственно. С увеличением глубины обитания фитопланктона до 25 м и ниже (< 40 м) отмечено уменьшение R до $2,2 (\pm 0,27)$ с появлением на спектрах поглощения света пигментами дополнительного локального пика на длине волны $\sim 500 - 550$ нм, соответствующего поглощению фикоэритринов (ФЭ). Известно, что удельные (нормированные на Ca) коэффициенты поглощения света фитопланктоном зависят от состава и концентрации пигментов в клетках планктонных водорослей, а также видовой и размерной структуры сообщества. Следует отметить, что в сентябре условия существования фитопланктона в зоне фотосинтеза характеризовались относительно высоким уровнем падающей на поверхность моря солнечной радиации [8], сезонной стратификацией вод с максимальным градиентом температуры на глубине ~ 10 м и высокой прозрачностью воды. Эти факторы определяют условия в среде существования фитопланктона, и, как следствие, адаптацию фитопланктонного сообщества к различающимся условиям существования в верхнем квазиизолированном (ВКС), в слое термоклина и в нижней части зоны фотосинтеза. При этом существенную роль в существовании фитопланктона под термоклином играет изменение спектрального состава света с глубиной, который на этих глубинах представлен только сине-зеленой частью спектра (500 – 570 нм). Пигментом, поглощающим свет данного спектрального диапазона, является ФЭ – пигмент-маркер цианобактерий. Совпадение полосы поглощения ФЭ со спектральными свойствами проникающего на глубину света в море определяет способность цианобактерий более эффективно поглощать сине-зелёный свет низкой интенсивности по

Т а б л и ц а . Показатели поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом (CDOM) в глубоководном районе Черного моря в сентябре 2015 г.: $a_{\text{CDOM}}(440)$ – коэффициент поглощения света CDOM на длине волны 440 нм; S_{CDOM} – показатель экспоненты для диапазона 350 – 500 нм; S_r – отношение показателей экспоненты для диапазонов длин волн 275 – 295 и 350 – 400 нм.

глубина, м	$a_{\text{CDOM}}(440), \text{ м}^{-1}(\pm \sigma)$	$S_{\text{CDOM}}, \text{ нм}^{-1}(\pm \sigma)$	$S_r(\pm \sigma)$
0 м (поверхность)	0,048 ($\pm 0,030$)	0,025 ($\pm 0,004$)	1,5 ($\pm 0,2$)
7 – 13 м (термоклин)	0,13 ($\pm 0,06$)	0,021 ($\pm 0,003$)	1,3 ($\pm 0,1$)
25 – 40 м	0,059 ($\pm 0,031$)	0,023 ($\pm 0,005$)	1,5 ($\pm 0,2$)

сравнению с эукариотами, что, вероятно, приводит к увеличению численности цианобактерий в глубинном сообществе фитопланктона. Наличие сезонной стратификации вод приводит к «запиранию» фитопланктонного сообщества в слое со специфическими спектральными характеристиками. Доминированием в глубинном сообществе цианобактерий и объясняется появление на спектрах $a_{\text{ph}}(\lambda)$ под термоклином дополнительного локального пика на длинах волн $\sim 500 - 550$ нм.

В поверхностном слое глубоководной части моря поглощение света неживым взвешенным веществом на длине волны 440 нм (синий максимум спектра $a_{\text{ph}}(\lambda)$) в среднем равнялось $0,014 (\pm 0,004) \text{ м}^{-1}$, что составляло 42 % от общего поглощения всем взвешенным веществом ($a_{\text{p}}(440) \sim 0,033 (\pm 0,007)$). В термоклине отмечено уменьшение доли $a_{\text{NAP}}(440)$ ($0,020 (\pm 0,006)$) в $a_{\text{p}}(440)$ ($0,11 (\pm 0,027)$) до 18 %. Под термоклином доля $a_{\text{NAP}}(440)$ ($0,018 (\pm 0,005)$) в $a_{\text{p}}(440)$ ($0,064 (\pm 0,028)$) снова увеличилась и составила 28 %. Показатель экспоненты S_{NAP} в среднем равнялся $0,012 (\pm 0,002) \text{ нм}^{-1}$, что соответствует литературным данным [9].

Коэффициенты $a_{\text{CDOM}}(440)$ по горизонтам представлены в таблице. Величина $a_{\text{CDOM}}(440)$ составляла в среднем 53 ± 16 % от общего поглощения света взвешенным и растворенным веществом. Для диапазона 350 – 500 нм средняя величина показателя экспоненты S_{CDOM} равнялась $0,023 (\pm 0,005) \text{ нм}^{-1}$ (табл.), что соответствует литературным данным [10]. В качестве характеристики состава CDOM по соотношению высоко- (ВМ) и низкомолекулярных (НМ) фракций растворенных органических соединений (РОВ), поглощающих свет, принято использовать отношение показателей экспоненты (S_r) для диапазонов длин волн 275 – 295 и 350 – 400 нм [11]. Величина S_r составляла в среднем для разных горизонтов $1,5 \pm 0,2$ (табл.), что свидетельствует об относительной однородности района исследований по соотношению ВМ и НМ.

Выводы. В период сезонной стратификации вод показано различие между слоями зоны фотосинтеза по светопоглощающим характеристикам всех оптически активных компонентов среды, что может быть использовано для уточнения региональных алгоритмов оценки показателей продуктивности по спутниковым данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла а в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS // Морской экологический журнал.– 2008.– № 2.– С.24-42.
2. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochem. Physiol. Pflanz.– 1975.– v.167.– P.191-194.
3. Mitchell B.G. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT) / Ocean Optics X // Ed. R. Spinrad.– SPIE Bellingham, Washington, 1990.– P. 137-148.
4. Tassan S., Ferrari G.M. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters // Limnol. and Oceanol.– 1995.– 40 (8).– P.1358-1368.
5. Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Рьлькова О.А. Параметризация поглощения света основными оптически активными компонентами в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2008.– вып.16.– С.190-201.
6. Sosik H.M. Storage of marine particulate samples for light-absorption measurements // Limnol. Oceanogr.– 1999– 44(4).– С.1139-1141.
7. 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.
8. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Кривенко О.В. и др. Фотосинтетически активная радиация, падающая на поверхность Черного моря, по спутниковым данным // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сборник докладов XXI Международного симпозиума. [Электронный ресурс – 1 CD-ROM].– Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2015.– С.В278-В280.
9. Wozniak B., Dera J. Light absorption in sea water.– Springer Science & Business Media, 2007.– 460 p.
10. Green S.A., Blough N.V. Optical absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter in natural waters // Limnol. Oceanogr.– 1994.– v.39.– P.1903-1916.
11. Helms J.R., Stubbins A., Ritchie J.D. et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // Limnol. Oceanogr.– 2008.– v.53, № 3.– P.955-969.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.
После доработки 17.10.2016 г.

T.V.Efimova, N.A.Moiseeva, T.Ya.Churilova, O.V.Krivenko

LIGHT ABSORPTION BY OPTICAL ACTIVE COMPONENTS OF ENVIRONMENT IN THE PHOTOSYNTHESIS ZONE IN THE BLACK SEA DEEP-WATER (SEPTEMBER, 2015)

Results of measurement and parametrization of light absorption by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Black Sea deep-water in September, 2015 are presented.

KEYWORDS: light absorption, phytoplankton, suspended and dissolved organic matter, the Black Sea