

УДК 582.26/27:591.157:551.465.8(262.5)

© Т. Я. Чурилова^{1*}, В. В. Суслин², Т. В. Ефимова¹, Н. А. Моисеева¹, Е. Ю. Скороход¹

¹Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, 299011, пр. Нахимова, д. 2, г. Севастополь, Россия

²Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, Россия

*e-mail: tanya.churilova@ibss-ras.ru

ВЛИЯНИЕ ВЗВЕШЕННОГО И РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛУЧЕННОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ПИГМЕНТАМИ ФИТОПЛАНКТОНА В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ

Статья поступила в редакцию 23.01.2020, после доработки 16.03.2020

Влияние оптически активных компонентов на спектральные характеристики проникающего излучения и на способность фитопланктона поглощать фотосинтетически активную радиацию исследовали на примере прибрежных вод Черного моря в районе Крымского полуострова, в которых измерения спектральных показателей поглощения света пигментами фитопланктона, неживым взвешенным веществом и окрашенным растворенным органическим веществом проводились во все сезоны 2016 г. Установлено, что увеличение содержания оптически активных компонентов влияет на спектральные характеристики проникающего излучения — смещение длины волны максимума спектра нисходящей облученности на ~25–40 нм в длинноволновую часть, что приводит к понижению удельной эффективности поглощения света пигментами фитопланктона до ~3 раз. Показано, что изменение спектрального состава квантовой облученности, связанное с содержанием любого оптически активного компонента среды, описывается единой зависимостью от величины отношения показателей поглощения света неживой компонентой и пигментами фитопланктона $a_{\text{CDM}}(440)/a_{\text{ph}}(440)$, которая меняется от оптических глубин.

Ключевые слова: поглощение света, пигменты фитопланктона, взвешенное вещество, окрашенное растворенное органическое вещество, спектральная квантовая облученность, Черное море.

© T. Ya. Churilova^{1*}, V. V. Suslin², T. V. Efimova¹, N. A. Moiseeva¹, E. Yu. Skorokhod¹

¹A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS, 299011, Nakhimova Prospekt, 2, Sevastopol, Russia

²Marine Hydrophysical Institute RAS, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

*e-mail: tanya.churilova@ibss-ras.ru

EFFECT OF DISSOLVED AND SUSPENDED MATTER ON LIGHT IN THE SEA AND PHYTOPLANKTON LIGHT ABSORBANCE CAPACITY IN COASTAL WATERS OF THE BLACK SEA

Received 23.01.2020, in final form 16.03.2020

The effect of in water optically active components on spectral downwelling irradiance and on phytoplankton capacity to absorb light has been investigated in coastal waters of the Black Sea near Crimean Peninsula, where spectral light absorption coefficients of phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter were measured in different seasons 2016. It has been revealed, that an increasing of content of optically active components effect on the spectral features of downwelling irradiance — shift of wavelength of the maximum of spectral downwelling irradiance to the longer wavelength on ~25–40 nm, which resulted in ~3 times decreasing of the spectrally weighted chlorophyll-*a* specific absorption coefficient. It has been shown that change in spectral downwelling irradiance, caused by content of any optically active components, is described by its relationship on ratio between light absorption coefficients of colored detrital matter and phytoplankton pigment ($a_{\text{CDM}}(440)/a_{\text{ph}}(440)$), which is optical depth-dependent.

Key words: light absorption, phytoplankton pigments, non-algal particles, colored dissolved organic matter, spectral downwelling irradiance, Black Sea.

Ссылка для цитирования: Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Скороход Е.Ю. Влияние взвешенного и растворенного органического вещества на спектральные характеристики облученности и эффективность поглощения света пигментами фитопланктона в прибрежных водах Черного моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 2. С. 43–50. doi: 10.7868/S2073667320020057

For citation: Churilova T.Ya., Suslin V.V., Efimova T.V., Moiseeva N.A., Skorokhod E.Yu. Effect of dissolved and suspended matter on light in the sea and phytoplankton light absorbance capacity in coastal waters of the Black Sea. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 2, 43–50. doi: 10.7868/S2073667320020057

1. Введение

Свет является необходимым условием фотосинтеза, что определяет его ключевую роль в процессе первичного синтеза органического вещества, а, следовательно, и продуктивности водоемов в целом [1]. Это определяет актуальность детального исследования распространения солнечного излучения в водной среде с точки зрения обеспечения процесса фотосинтеза, который фактически включает два этапа: поглощение квантов света пигментами и использование их в процессе синтеза органического вещества [2, 3]. В природных водоемах ослабление освещенности с глубиной и изменение спектрального состава проникающего излучения связано с рассеянием, а в большей степени с поглощением света оптически активными компонентами воды и самой водой [4]. К оптически активным компонентам воды [4] относят планктонные водоросли, неживое взвешенное вещество (NAP — Nonalgal particles) органической и неорганической природы, и окрашенное растворенное органическое вещество (CDOM — Colored dissolved organic matter) [5, 6]. В водоемах содержание оптически активных компонентов варьирует в значительной степени, что особенно выражено в прибрежных водах, подверженных влиянию берегового и речного стока [7].

Исследования спектральных оптических характеристик взвешенного вещества в Черном море впервые были проведены еще в 1970-х гг. прошлого столетия [8, 9]. В дальнейшем активно развивались методология и приборы, необходимые для проведения корректных измерений спектральных оптических свойств взвешенных и растворенных компонентов водной среды [10]. Современные достижения в этом направлении были использованы в наших исследованиях в Черном море [11, 12]. Анализ данных, полученных в прибрежных водах в районе Крымского полуострова, выявил высокую пространственно-временную изменчивость величин показателей поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$), CDOM ($a_{CDOM}(\lambda)$) и NAP ($a_{NAP}(\lambda)$) [12]. В связи с различием в формах спектров $a_{ph}(\lambda)$, $a_{CDOM}(\lambda)$ и $a_{NAP}(\lambda)$ [6, 13–15] изменение относительного содержания компонентов оказывает влияние на спектральный состав проникающей в водную толщу квантовой облученности ($E_d(\lambda)$) в видимом диапазоне, которая используется водорослями в процессе фотосинтеза.

В связи с этим цель настоящей работы состояла в исследовании влияния относительного содержания оптически активных компонентов среды на спектральную квантовую облученность, проникающую в водную толщу, и на удельную (нормированную на концентрацию хлорофилла-*a* (C_a)) и на фотосинтетически активную радиацию (PAR)) эффективность поглощения света пигментами фитопланктона в прибрежных водах Черного моря.

2. Материал и методы

В настоящей работе были использованы данные, полученные в апреле, июне и октябре 2016 г. в экспедициях на НИС «Профессор Водяницкий» (ПВ84, ПВ86, ПВ90). Измерения $a_{CDOM}(\lambda)$, $a_{NAP}(\lambda)$ $a_{ph}(\lambda)$ проводили в соответствии с протоколом [10] на спектрофотометре Lambda 35 (Perkin Elmer), оснащённом интегрирующей сферой. Спектр оптической плотности исходной пробы (всего взвешенного вещества), собранной на фильтре GF/F (Whatman) методом фильтрации под вакуумом (<0.2 атм), измеряли в диапазоне длин волн 350–750 нм с шагом в 1 нм. На основании измерений рассчитывали показатели поглощения света всем взвешенным веществом ($a_p(\lambda)$). Затем проводили обесцвечивание пробы в соответствии с [16] и рассчитывали показатели ($a_{NAP}(\lambda)$) и $a_{ph}(\lambda)$). Спектральный диффузный показатель вертикального ослабления солнечного излучения $K_d(\lambda)$ рассчитывали для длин волн (λ) от 400–700 нм [17]:

$$K_d(\lambda) = 1.2 \times (a(\lambda) + b_b(\lambda)), \quad (1)$$

где $b_b(\lambda)$ — спектральный показатель рассеяния света в заднюю полусферу, включающий рассеяние водой ($b_{bw}(\lambda)$) [18] и частицами ($b_{bp}(\lambda)$); $a(\lambda)$ — показатель поглощения света, который суммируется [4] из $a_p(\lambda)$, $a_{CDOM}(\lambda)$ и поглощения водой $a_w(\lambda)$ [19]:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda), \quad (2)$$

где $a_p(\lambda) = a_{ph}(\lambda) + a_{NAP}(\lambda)$. $a_{ph}(\lambda)$ восстанавливали с разрешением в 1 нм по величинам C_a , используя степенную зависимость между ними [13]:

$$a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \times C_a^B(B(\lambda)), \quad (3)$$

где $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$ — спектральные коэффициенты, установленные ранее [12, 20].

Спектры $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ и $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$, описываются экспоненциальной зависимостью:

$$a_i(\lambda) = a_i(440) \exp(-S_i \times (\lambda - 440)), \quad (4)$$

где i — это NAP или CDOM и S — коэффициент экспоненты. Использовали коэффициенты параметризации, полученные в среднем для теплого периода года [12]: $S_{\text{NAP}} = 0.010 \text{ nm}^{-1}$, $S_{\text{CDOM}} = 0.022 \text{ nm}^{-1}$ и $a_{\text{NAP}}(440) = 0.020 \text{ m}^{-1}$, $a_{\text{CDOM}}(440) = 0.063 \text{ m}^{-1}$. Величину $b_{\text{bp}}(\lambda)$ рассчитывали в соответствии с [21]:

$$b_{\text{bp}}(\lambda) = b_{\text{bp}}(\lambda_0) \times \lambda_0 / \lambda, \quad (5)$$

где $\lambda_0 = 555 \text{ nm}$. Величину $b_{\text{bp}}(555)$ принимали равной 0.002 m^{-1} для диатомовых/динофлагеллят в исходных условиях с концентрацией хлорофилла- a равной 0.4 mg m^{-3} [21]. При моделировании увеличения взвешенного вещества (фитопланктона или NAP) величину $b_{\text{bp}}(555)$ увеличивали, используя коэффициент кратности k . Спектральную квантовую облученность $E_d(\lambda, z)$ рассчитывали по [4]:

$$E_d(\lambda, z) = E_d(\lambda, 0^-) \times \exp(-K_d(\lambda) \times z), \quad (6)$$

где $E_d(\lambda, 0^-)$ — спектр $E_d(\lambda, z)$ под поверхностью моря. Значения $E_d(\lambda, 0^-)$ восстанавливали на основе суточной величины фотосинтетически активной радиации (ФАР/PAR) [22] и спектральных характеристик энергетической облученности, взятых из [23] и пересчитанных с учетом энергии квантов.

Длину волны максимума спектра нисходящей облученности (λ_{max}) определяли как середину волнового диапазона, соответствующего половине величины максимальной облученности на соответствующей глубине.

Интегральную облученность в пределах видимого диапазона ФАР/PAR рассчитывали [4]:

$$\text{PAR}(z) = \int_{400}^{700} E_d(\lambda, z) d\lambda. \quad (7)$$

Удельную (нормированную на $C_a(z)$ и на $\text{PAR}(z)$) эффективность поглощения света пигментами фитопланктона ($\bar{a}_{\text{ph}}^*$, $\text{m}^2 \text{ mg}^{-1}$) определяли по формуле:

$$\bar{a}_{\text{ph}}^*(z) = \frac{\int_{400}^{700} a_{\text{ph}}(\lambda, z) \times E_d(\lambda, z) d\lambda}{\int_{400}^{700} E_d(\lambda, z) d\lambda \times C_a}. \quad (8)$$

Для «белого» света величину этого параметра ($\bar{a}_{\text{ph/w}}^*$) рассчитывали:

$$\bar{a}_{\text{ph/w}}^*(z) = \frac{\int_{400}^{700} a_{\text{ph}}(\lambda, z) d\lambda}{300 \times C_a}. \quad (9)$$

Оптическую глубину определяли как произведение глубины на величину показателя диффузного ослабления PAR [4], который считывали на основе вертикального профиля $\text{PAR}(z)$, полученного в соответствии с уравнением 7.

3. Результаты и обсуждение

Результаты измерений спектральных показателей поглощения света всеми оптически активными компонентами среды в прибрежных водах Крыма в 2016 г. были использованы для оценки вклада пигментов фитопланктона, NAP и CDOM в общее поглощение света взвешенным и растворенным веществом за исключением поглощения света самой водой. Бюджет поглощения оценивали на длине волны, соответствующей максимуму поглощения пигментов фитопланктона в синей части спектра ($\sim 440 \text{ nm}$), где фитопланктон дает наибольший вклад в общее поглощение света (рис. 1).

Оценка бюджета поглощения показала широкий диапазон варибельности вклада оптически активных компонентов в общее поглощение света во все периоды исследований (рис. 1). Диапазоны изменения величин C_a и показателей поглощения света NAP и CDOM относительно поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{\text{NAP}}(440)/a_{\text{ph}}(440)$ и $a_{\text{CDOM}}(440)/a_{\text{ph}}(440)$) приведены в табл. 1.

Для анализа влияния содержания оптически активных компонентов на спектральные характеристики проникающего в водную толщу излучения и способность фитопланктона поглощать свет были рассчитаны

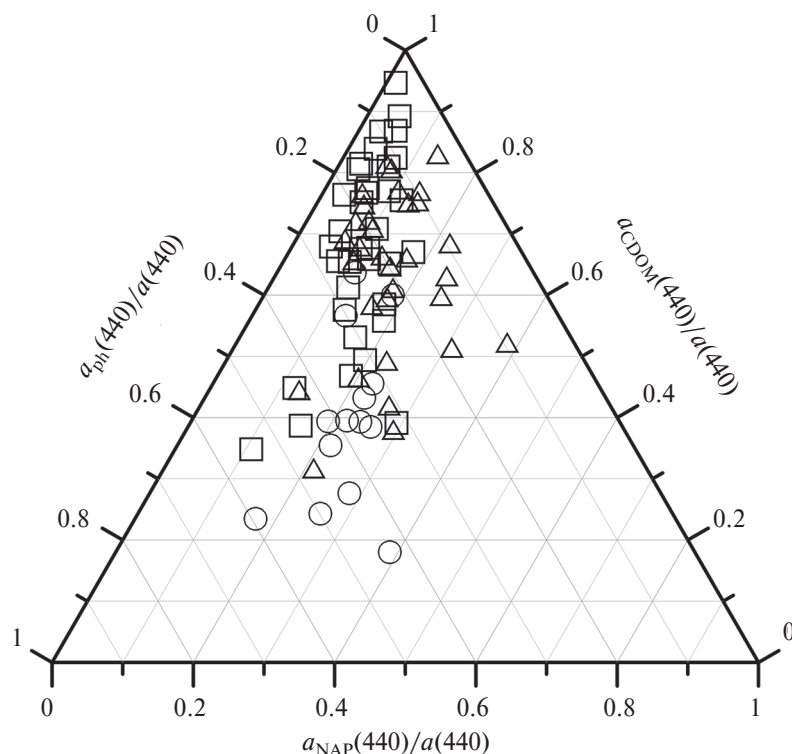


Рис. 1. Вклад пигментов фитопланктона ($a_{ph}(440)$), неживого взвешенного вещества ($a_{NAP}(440)$) и окрашенного растворенного органического вещества ($a_{CDOM}(440)$) в поглощение света всеми оптически активными компонентами среды за исключением воды ($a(440)$) на длине волны ~440 нм в апреле (квадраты), июне (кружки) и октябре (треугольники) 2016 г. в прибрежных водах около Крымского полуострова.

Fig. 1. Share of phytoplankton pigment ($a_{ph}(440)$), non-algal particles ($a_{NAP}(440)$) and colored dissolved organic matter ($a_{CDOM}(440)$) in total light absorption by all optically active components (without waters) ($a(440)$) at ~440 nm in April (squares), June (circles) and October (triangles) 2016 in coastal waters near Crimean peninsula.

Таблица 1

Результаты биооптических измерений в прибрежных водах в районе Крыма: диапазоны изменения величин концентрации хлорофилла- a (C_a) и отношений показателей поглощения света неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(440)$) и окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{CDOM}(440)$) к величине показателя поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 440 нм ($a_{NAP}(440)/a_{ph}(440)$ и $a_{CDOM}(440)/a_{ph}(440)$)

Results of bio-optical investigation in coastal waters near Crimea: diapason of variability of chlorophyll- a concentration (C_a) and ratio between light absorption coefficients of non-algal particles ($a_{NAP}(440)$), colored dissolved organic matter ($a_{CDOM}(440)$) and of phytoplankton pigments at 440 nm ($a_{NAP}(440)/a_{ph}(440)$ and $a_{CDOM}(440)/a_{ph}(440)$)

Время работ	C_a , мг м ⁻³	$a_{NAP}(440)/a_{ph}(440)$	$a_{CDOM}(440)/a_{ph}(440)$
Апрель 2016 г.	0.25–0.61	0.15–0.92	0.15–0.92
Июнь 2016 г.	0.28–0.55	0.40–0.90	0.40–2.5
Октябрь 2016 г.	0.76–3.5	0.30–1.9	0.70–6.8

варианты с одинаковой кратностью (k) увеличения каждого из оптических компонентов: биомассы фитопланктона (использовали C_a в качестве показателя биомассы), NAP и CDOM относительно исходных условий. Величине $C_a = 0.40$ мг м⁻³ соответствует $a_{ph}(440) = 0.035$ м⁻¹ [20].

С целью выявления изменений спектральных свойств $E_d(\lambda)$ проводили сравнение $E_d(\lambda)$ на одинаковых оптических глубинах (рис. 2, см. вклейку). Увеличение любого из оптически активных компонентов среды приводило к изменению спектральных свойств квантовой облученности, а именно, к смещению проникающего излучения в более длинноволновую часть спектра, что усиливалось с увеличением оптической глубины.

Наиболее явно этот эффект прослеживается на оптической глубине 4.6 (1 % PAR) при увеличении оптических компонентов на порядок (рис. 2). Следует отметить, что изменение $E_d(\lambda)$ было минимальным в случае варьирования содержания NAP, а наибольшим — CDOM. При этом фитопланктон занимал промежуточное положение между NAP и CDOM по влиянию на спектральные свойства $E_d(\lambda)$ (рис. 2).

Для оптической глубины 2.3 (10 % PAR) получили, что длина волны $\lambda_{\max}$ изменялось от 521 нм в исходных условиях до 537, 546 и 555 нм в результате увеличения в среде на порядок NAP, C_a , и CDOM (рис. 3). На оптической глубине 4.6 (1 % PAR) величина $\lambda_{\max}$ увеличивалась от 524 нм до 547, 552 и 560 нм, соответственно (рис. 3). Таким образом, в случае десятикратного увеличения содержания в среде оптически активных компонентов наблюдалось смещение максимума в спектре $E_d(\lambda)$ на ~25–40 нм в длинноволновую часть спектра. Для каждой оптической глубины получили «веер» кривых, описывающих изменение величины $\lambda_{\max}$ с увеличением NAP, C_a , и CDOM (рис. 3). В принципе, все исследованные варианты объединяет то, что в результате увеличения в воде NAP, C_a , и CDOM происходило изменение соотношения между показателями поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$) и неживой оптически активной компонентой ($a_{cdm}(\lambda) = a_{CDOM}(\lambda) + a_{NAP}(\lambda)$). Анализ связи между $\lambda_{\max}$ и $a_{cdm}(440)/a_{ph}(440)$ показал, что вместо «веера» кривых получается, что на конкретной оптической глубине зависимость величины $\lambda_{\max}$ от соотношения $a_{cdm}(440)/a_{ph}(440)$, связанного с изменением NAP или C_a или CDOM, описывается единой кривой (рис. 3). Следовательно, изменение спектральных свойств $E_d(\lambda)$, в частности, параметра $\lambda_{\max}$ в шкале оптических глубин зависит от соотношения $a_{cdm}(440)/a_{ph}(440)$, но не зависит от того, каким конкретно оптическим компонентом было вызвано изменение этого соотношения.

Форма полученной зависимости между $\lambda_{\max}$ и $a_{cdm}(440)/a_{ph}(440)$ (рис. 3) характеризуется минимумом ($\lambda_{\max} = 521$ нм) при величине соотношения $a_{cdm}(440)/a_{ph}(440)$ равной 2.37, соответствующей исходным условиям. Увеличение всех компонентов ведет к повышению $\lambda_{\max}$. При этом соотношение $a_{cdm}(440)/a_{ph}(440)$ снижается с ростом фитопланктона, в то время как другие компоненты приводят к увеличению этого соотношения, что и определяет появление минимума на графике зависимости $\lambda_{\max}$ от $a_{cdm}(440)/a_{ph}(440)$ (рис. 3).

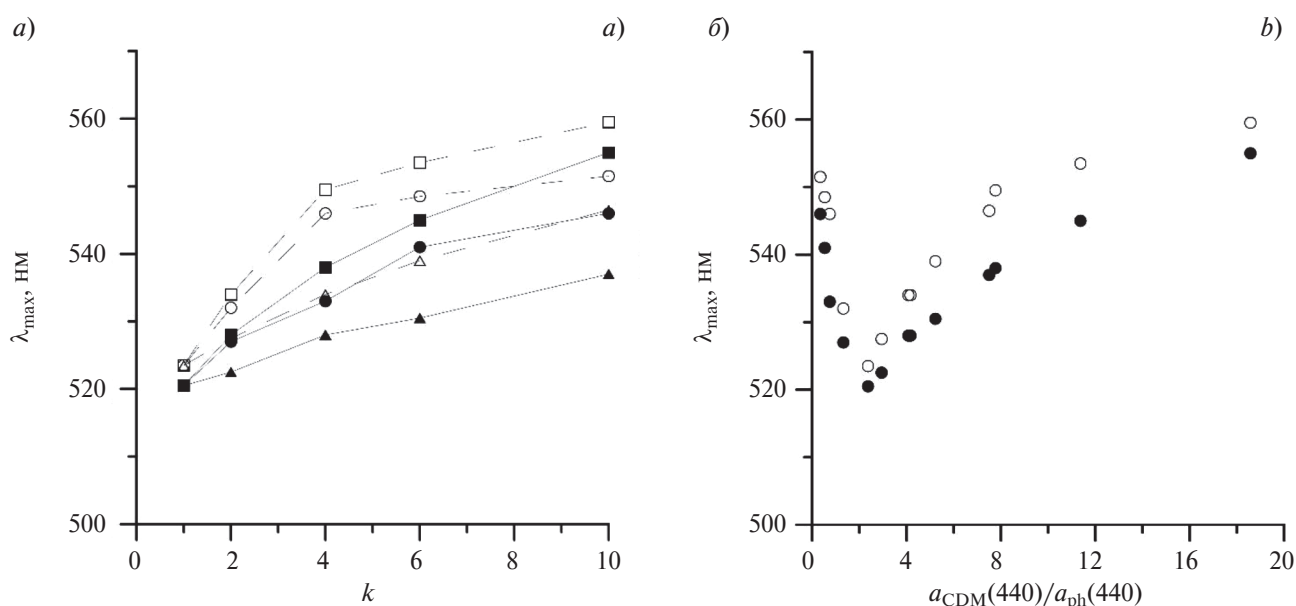


Рис. 3. Изменение длины волны максимума спектра нисходящей облученности $\lambda_{\max}$ в зависимости: *a* — от увеличения (k) концентрации хлорофилла-*a* (кружки), неживого взвешенного вещества (треугольники) и окрашенного растворенного органического вещества (квадраты); *b* — от отношения между показателями поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом в сумме с неживым взвешенным веществом ($a_{CDM}(440)$) и показателем поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 440 нм ($a_{ph}(440)$) в теплый период года в прибрежных водах около Крымского полуострова: на оптической глубине 2.3 и 4.6 — заштрихованные и не заштрихованные символы соответственно.

Fig. 3. Dependence of the maximum wavelength of spectral downwelling irradiance $\lambda_{\max}$: *a* — on increasing (k) of chlorophyll-*a* concentration (circles), non-algal particles (triangles) and colored dissolved organic matter (squares); *b* — on ratio between light absorption coefficients of colored detrital matter ($a_{CDM}(440)$) and phytoplankton pigments at 440 nm ($a_{ph}(440)$) in warm period of year in coastal waters near Crimean: at optical depth 2.3 — filled symbols and 4.6 — open symbols.

В исходных летних условиях величина $\bar{a}_{ph}^*$ изменялась в пределах освещенного слоя от 0.032 до 0.038 м²мг⁻¹, в среднем составляя 0.036 м²мг⁻¹ (рис. 4, см. вклейку).

Увеличение в море NAP, CDOM и C_a в два раза привело к снижению средней по слою величины $\bar{a}_{ph}^*$ от 0.036 до 0.034, 0.030 и 0.029 м²мг⁻¹, соответственно. Повышение NAP, CDOM и C_a на порядок привело практически к одинаковым изменениям глубины зоны фотосинтеза (1 % PAR) от 40 м в исходных условиях до 19–21 м. Однако в водах с одинаковой прозрачностью отмечена значительная вариабельность $\bar{a}_{ph}^*$. Величина $\bar{a}_{ph}^*$ зависела от того, что именно являлось причиной уменьшения прозрачности вод. В результате десятикратного повышения CDOM и C_a величина $\bar{a}_{ph}^*$ снижалась в ~3 раза, а в случае изменения NAP — в ~1.5 раза (рис. 4). Величина ($\bar{a}_{ph}^*$) зависит фактически от двух факторов: 1 — от величин показателей $a_{ph}^*(\lambda)$; 2 — соответствия формы спектра $a_{ph}^*(\lambda)$ форме спектра $E_d(l)$, а точнее, зависит от соответствия спектрального положения максимумов этих спектров — от так называемой «комплементарности» формы спектров.

Коэффициент K_a , полученный в результате нормирования величин ($\bar{a}_{ph}^*$) на $\bar{a}_{ph/w}^*$, отражает влияние только «комплементарности» формы спектров $a_{ph}^*(\lambda)$ и $E_d(\lambda)$ на величины $\bar{a}_{ph}^*$, так как исключается влияние показателей $a_{ph}^*(\lambda)$ (рис. 4). Сопоставление изменения $\bar{a}_{ph}^*$ и K_a в шкале оптических глубин (рис. 4) показало, что в случае вариабельности CDOM или NAP, изменение $\bar{a}_{ph}^*$ связано только с влиянием «комплементарности» спектров $a_{ph}^*(\lambda)$ и $E_d(\lambda)$. В то время как в случае увеличения биомассы фитопланктона, наблюдаемого в процессе развития «цветения» фитопланктона, к этому фактору добавляется негативное влияние снижения величин $a_{ph}^*(\lambda)$, связанное с «эффектом упаковки» пигментов в клетках, которое способствует повышению концентрации пигментов в море [7, 20, 24]. В поверхностном слое моря изменение $\bar{a}_{ph}^*$ связано только с «эффектом упаковки» пигментов в клетках микроводорослей на их способность поглощать свет (рис. 4). Сравнение профилей $\bar{a}_{ph}^*$ и K_a (рис. 4) позволяет сделать вывод о том, что характер вертикального изменения $\bar{a}_{ph}^*$ в основном обусловлен изменением «комплементарности» спектров $a_{ph}^*(\lambda)$ и $E_d(l)$, что связано со смещением (λ_{max}) в длинноволновую часть спектра (рис. 2). Отмеченный максимум в профилях $\bar{a}_{ph}^*$ и K_a (рис. 4) означает, что на оптической глубине ~1.4 форма $E_d(\lambda)$ наилучшим образом совпадает с максимумом спектра показателей поглощения фитопланктона, что обеспечивает наибольшую эффективность поглощения квантов солнечной энергии.

В целом, отмечена высокая чувствительность $\bar{a}_{ph}^*$ к спектральным свойствам $E_d(\lambda)$ (рис. 4). Смещение (λ_{max}) в длинноволновую часть сопровождается уменьшением способности фитопланктона поглощать свет при прочих равных условиях — интегрального ФАР/PAR и показателей $a_{ph}^*(\lambda)$.

4. Выводы

На основе результатов спектральных измерений показателей поглощения света фитопланктоном, взвешенным веществом и растворенным органическим веществом, выполненных на спектрофотометре с интегрирующей сферой и в соответствии с современной методологией (NASA протокол, 2018), получены количественные оценки влияния содержания взвешенного и растворенного вещества на спектральные свойства проникающей квантовой облученности и на удельную эффективность поглощения света фитопланктоном в прибрежных водах моря.

Показано, что изменение спектральных свойств квантовой облученности на конкретной оптической глубине, вызванное вариабельностью любого оптически активного компонента среды, описывается единой зависимостью от величины отношения показателей поглощения света неживой компонентой и пигментами фитопланктона ($a_{CDM}(440)/a_{ph}(440)$). В связи с тем, что показатели a_{CDM} и a_{ph} можно оценить на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса с помощью регионального алгоритма [25], поэтому представляется возможным оценить изменение спектральных свойств квантовой облученности и удельной эффективности поглощения света фитопланктоном по спутниковой информации, что планируется выполнить в следующих исследованиях.

5. Благодарности

Авторы благодарят м.н.с. Сахоня Е.Г. и вед. инж. Землянскую Е.А. за помощь в отборе и обработке проб. Авторы выражают признательность рецензентам за полезные замечания и рекомендации, которые были использованы при редактировании статьи.

6. Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам АААА-А19–119061190081–9, а также частично при поддержке грантов РФФИ № 18–45–920070, № 18–05–80025.

Литература

1. Парсонс Т.Р. и др. Биологическая океанография. М.: Лёгкая и пищевая пром-сть, 1982. 432 с.
2. Falkowski P., Raven J. Aquatic photosynthesis. Princeton: Princeton University Press, 2007. 512 p.
3. Чурилова Т.Я. и др. Спектральный подход к оценке скорости фотосинтеза фитопланктона в Черном море по спутниковой информации: методологические аспекты развития региональной модели // Жур. Сиб. фед. унив. 2016. Т. 9, № 4. С. 367–384. doi: 10.17516/1997–1389–2016–9–4–367–384
4. Kirk J. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. UK: Cambridge University Press, 2011.
5. Coble P. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color // Chem. Rev. 2007. N107. P. 402–418.
6. Nelson N., Siegel D. The global distribution and dynamics of chromophoric dissolved organic matter // Ann. Rev. Mar. Sci. 2013, 5, 447–476.
7. Babin M. et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N C7. P. 3211. doi: 10.1029/2001JC000882
8. Коновалов Б.В. Некоторые особенности спектрального поглощения взвеси морской воды // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 58–65.
9. Коновалов Б.В. Светопоглощительная способность пигментов фитопланктона // Усвоение солнечной энергии в процессе фотосинтеза Черноморского и Балтийского фитопланктона / отв. ред. Кобленц-Мишке О.И. М.: Тип. Мин-ва уголь. пром-ти СССР, 1985. С. 59–72.
10. IOCCG Protocol Series. Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient, Neeley, A. R. and Mannino, A. (eds.), IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation. 2018. Vol. 1.0, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-119>
11. Dmitriev E. et al. Parameterization of light absorption by components of seawater in optically complex coastal waters of the Crimea Peninsula (Black Sea) // Appl. Opt. 2009. V. 48. P. 1249–1261. doi: 10.1364/AO.48.001249
12. Churilova T. et al. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in coastal waters of Crimea (the Black Sea) // Proc. 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2017. P. 104664B. doi: 10.1117/12.2288339
13. Bricaud A. et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, N C7. P. 13321–13332.
14. Six C. et al. Diversity and evolution of phycobilisomes in marine *Synechococcus* spp.: a comparative genomics study // Genome Biology. 2007. N 8. P. R259. doi: 10.1186/gb-2007–8–12-r259
15. Churilova T. et al. Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea // Europ. J. of Rem. Sens. 2019. V. 52, N 1. P. 123–136. doi: 10.1080/22797254.2018.1533389
16. Tassan S., Ferrari G. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters // Limnol. and Oceanol. 1995. V. 40, N 8. P. 1358–1368.
17. Gordon H. et al. A semi analytics radiance model of ocean color // J. Geophys. Res. 1988. V. 93, N D9. P. 10909–10924.
18. Smith R., Baker K. Optical Properties of the Clearest Natural Waters // Appl. Opt. 1981. V. 20, N 2. P. 177–184.
19. Pope R., Fry E. Absorption Spectrum (380–700 nm) of Pure Water. II. Integrating Cavity Measurements // Appl. Opt. 1997. V. 36, N33. P. 8710–8723.
20. Churilova T. et al. Light Absorption by Phytoplankton in the Upper Mixed Layer of the Black Sea: Seasonality and Parameterization // Frontiers in Marine Science. 2017. V. 4. P. 90. doi: 10.3389/fmars.2017.00090
21. Маньковский В.И. Основы оптики океана. Севастополь: Морской гидрофизический институт, 1996. 119 с.
22. Suslin V.V., Korolev S.N., Kucheryaviy A.A., Churilova T.Ya., Krivenko O.V. Photosynthetically available radiation on surface of the Black Sea based on ocean color data // Proceedings of SPIE: 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, November 19, 2015, (2015). doi: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2203660>
23. Bartlett J.S., Ciotti A.M., Davis R.F., Culle J.J. The spectral effects of clouds on solar irradiance // J. Geophys. Res. 1998. 103, C13. 31,017–31,031.
24. Morel A., Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton // Deep-Sea Research. 1981. V. 28, N 11. P. 1375–1393.
25. Suslin V., Churilova T. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-*a* and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners // Int. J. of Rem. Sens. 2016. T. 37, № 18. С. 4380–4400.

References

1. Parsons T. et al. Biological oceanographic processes. Moscow, *Lyogkaya i Pishchevaya Promyshlennost*, 1982. 432 p. (in Russian).
2. Falkowski P., Raven J. Aquatic photosynthesis. Princeton, *Princeton University Press*, 2007. 512 p.
3. Churilova T. et al. Spectral approach to assessment of phytoplankton photosynthesis rate in the Black Sea based on satellite information: methodological aspects of the regional model development. *Journal of Siberian Federal University*. 2016, 9, 4, 367–384. doi:10.17516/1997–1389–2016–9–4–367–384 (in Russian).
4. Kirk J. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. UK, Cambridge University Press, 2011.
5. Coble P. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color. *Chem. Rev.* 2007, 107, 402–418.
6. Nelson N., Siegel D. The global distribution and dynamics of chromophoric dissolved organic matter. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 2013, 5, 447–476.
7. Babin M. et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *J. Geophys. Res.* 2003, 108, C7, 3211. doi:10.1029/2001JC000882
8. Konovalov B.V. Some peculiarities of spectral particulate light absorption. *Opticheskie Metody Izucheniya Okeanov i Vnutrennih Vodoemov. Novosibirsk, Nauka*, 1979, 58–65 (in Russian).
9. Konovalov B.V. Light absorbance capacity of phytoplankton pigments. *Utilization of light energy in photosynthesis of phytoplankton in the Black and Baltic Seas* / ed. Koblenz-Mishke O. I. Moscow, *Press of Ministry of coal industry of USSR*, 1985, 59–72 (in Russian).
10. IOCCG Protocol Series (2018). Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient, Neeley, A. R. and Mannino, A. (eds.), *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*, Volume 1.0, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-119>
11. Dmitriev E. et al. Parameterization of light absorption by components of seawater in optically complex coastal waters of the Crimea Peninsula (Black Sea). *Appl. Opt.* 2009, 48, 1249–1261. doi: 10.1364/AO.48.001249
12. Churilova T. et al. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in coastal waters of Crimea (the Black Sea). *Proc. 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2017, 104664B. doi: 10.1117/12.2288339
13. Bricaud A. et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *J. Geophys. Res.* 1995, 100, C7, 13321–13332.
14. Six C. et al. Diversity and evolution of phycobilisomes in marine *Synechococcus* spp.: a comparative genomics study. *Genome Biology*. 2007, 8, R259. doi: 10.1186/gb-2007–8–12-r259
15. Churilova T. et al. Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea. *Europ. J. of Rem. Sens.* 2019, 52, 1, 123–136. doi: 10.1080/22797254.2018.1533389
16. Tassan S., Ferrari G. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters. *Limnol. and Oceanol.* 1995, 40, 8, 1358–1368.
17. Gordon H. et al. A semi analytics radiance model of ocean color. *J. Geophys. Res.* 1988, 93, D9, 10909–10924.
18. Smith R., Baker K. Optical Properties of the Clearest Natural Waters. *Appl. Opt.* 1981, 20, 2, 177–184.
19. Pope R., Fry E. Absorption Spectrum (380–700 nm) of Pure Water. II. Integrating Cavity Measurements. *Appl. Opt.* 1997, 36, 33, 8710–8723.
20. Churilova T. et al. Light Absorption by Phytoplankton in the Upper Mixed Layer of the Black Sea: Seasonality and Parameterization. *Frontiers in Marine Science*. 2017, 4, 90. doi: 10.3389/fmars.2017.00090
21. Mankovsky V.I. The basics of ocean optics. Sevastopol, *MGI NAS of Ukraine*, 1996. 119 p. (in Russian).
22. Suslin V.V., Korolev S.N., Kucheryaviy A.A., Churilova T.Ya., Krivenko O.V. Photosynthetically available radiation on surface of the Black Sea based on ocean color data. *Proceedings of SPIE: 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, November 19, 2015, (2015). doi: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2203660>
23. Bartlett J.S., Ciotti A.M., Davis R.F., Culle J.J. The spectral effects of clouds on solar irradiance. *J. Geophys. Res.* 1998, 103, C13, 31,017–31,031.
24. Morel A., Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Research*. 1981, 28, 11, 1375–1393.
25. Suslin V., Churilova T. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-*a* and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners. *Int. J. of Rem. Sens.* 2016, 37, 18, 4380–4400.

К статье Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Ефимова Т.В., Моисеева, Н.А. Скороход Е.Ю. Влияние взвешенного и растворенного органического вещества на спектральные характеристики...

Churilova T., Suslin V., Efimova T., Moiseeva N., Skorokhod E. Yu. Effect of dissolved and suspended matter on light in the sea and phytoplankton...

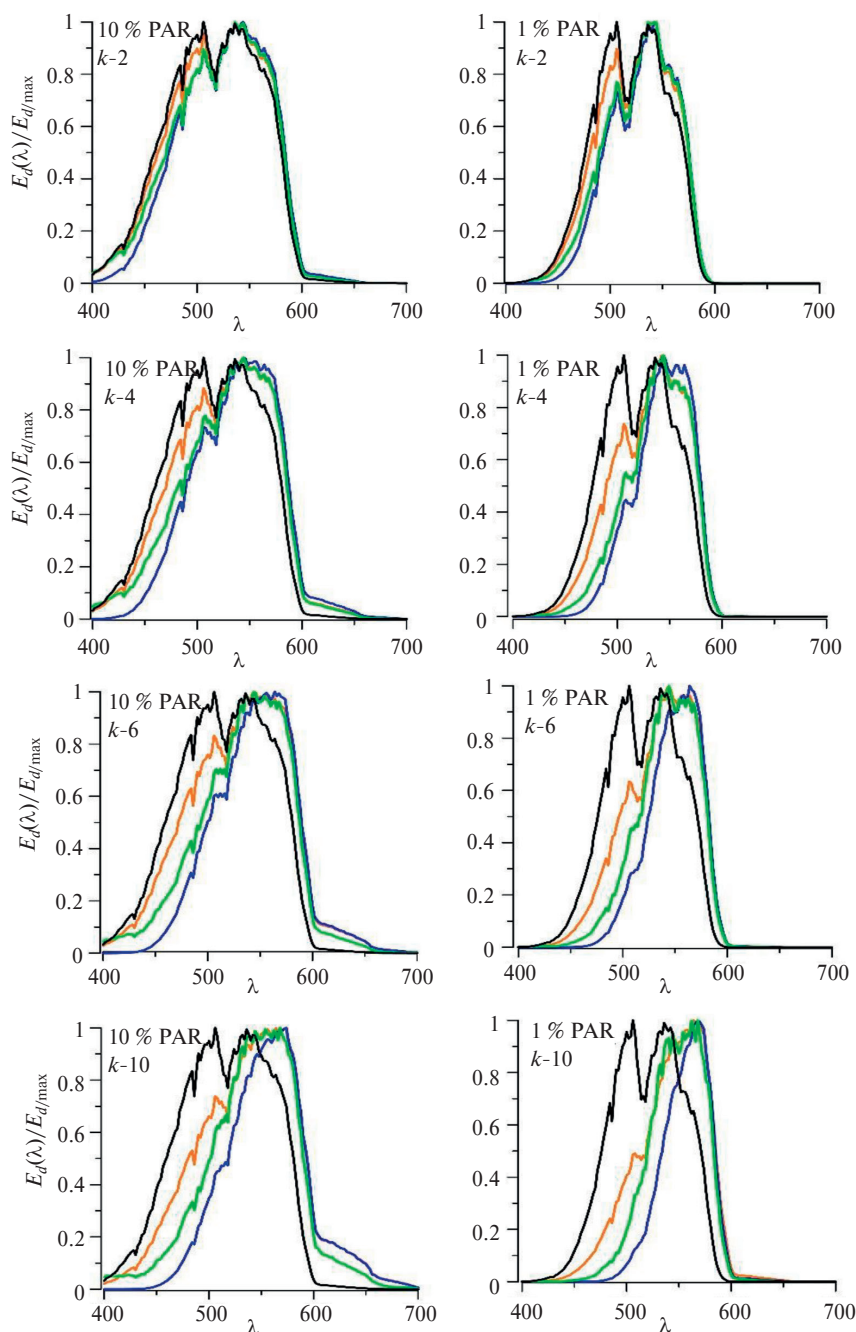


Рис. 2. Спектральная квантовая облученность ($E_d(\lambda)$, Эйнштейн $\text{м}^{-2} \text{нм}^{-1} \text{сут}^{-1}$), нормированная на максимальную величину ($E_d(\lambda)/E_{d/\text{max}}$) на глубинах с уровнем фотосинтетически активной радиации (PAR) ~ 10 и $\sim 1\%$ от уровня PAR, падающей на поверхность моря, рассчитанное для вариантов увеличения (k) концентрации хлорофилла- a (зеленые линии), неживого взвешенного вещества (оранжевые линии) и окрашенного растворенного органического вещества (синие линии) в теплый период года в прибрежных водах около Крымского полуострова (черная линия — исходные условия).

Fig. 2. Spectral downwelling irradiance ($E_d(\lambda)$, $E \text{ m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ d}^{-1}$), normalized on maximum value ($E_d(\lambda)/E_{d/\text{max}}$) at depth with photosynthetic available radiation (PAR) ~ 10 and $\sim 1\%$ from PAR incident on sea surface, calculated for increasing (k) of chlorophyll- a concentration (green line), non-algal particles (orange line) and colored dissolved organic matter (blue line) in warm period of year in coastal waters near Crimean peninsula (black line — initial conditions).

К статье Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Ефимова Т.В., Моисеева, Н.А. Скороход Е.Ю. Влияние взвешенного и растворенного органического вещества на спектральные характеристики...
 Churilova T., Suslin V., Efimova T., Moiseeva N., Skorokhod E. Yu. Effect of dissolved and suspended matter on light in the sea and phytoplankton...

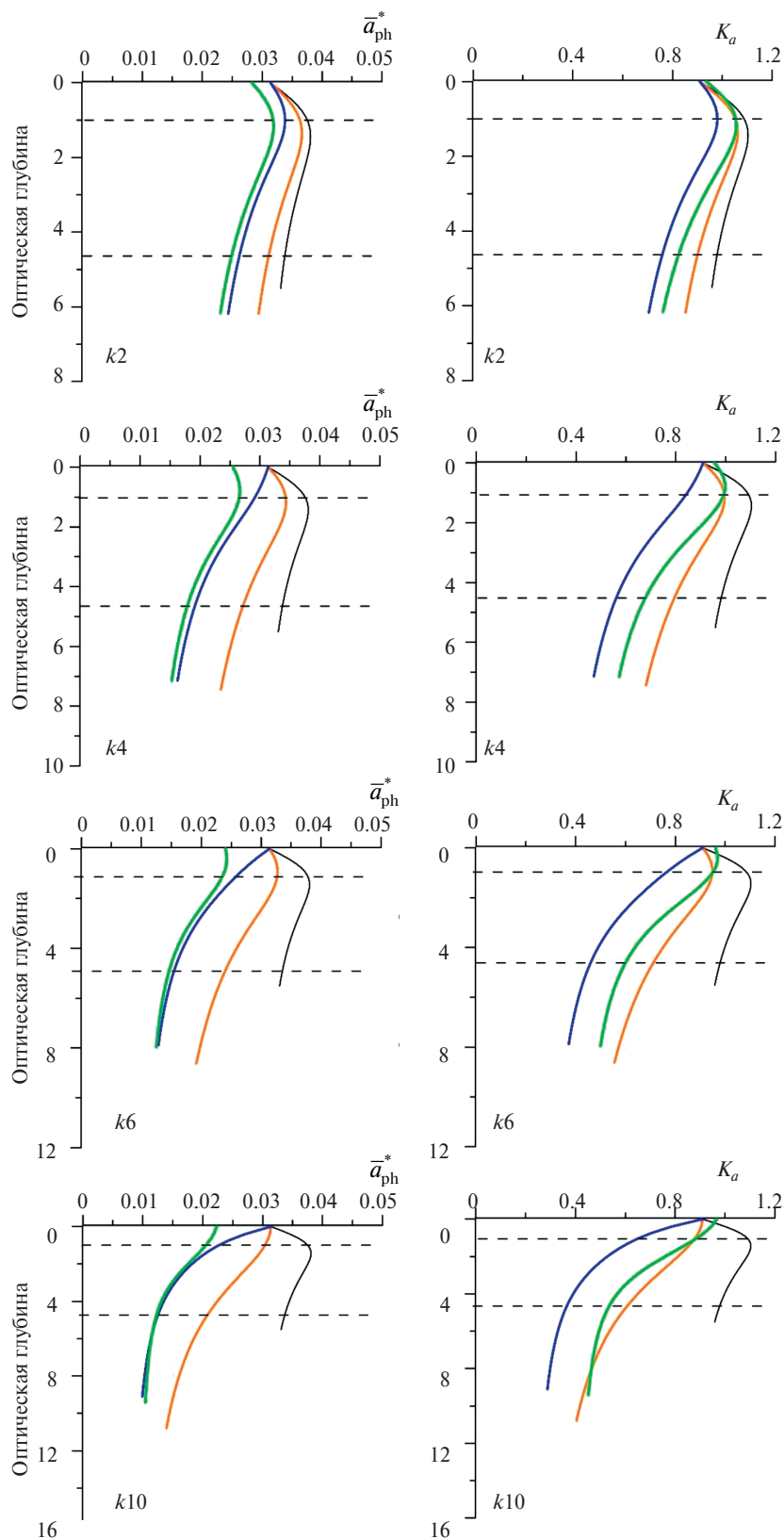


Рис. 4. Зависимость удельной (нормированной на концентрацию хлорофилла-*a* и фотосинтетически активную радиацию) эффективности поглощения света пигментами фитопланктона ($\bar{a}_{ph}^*$) (левая панель графика) и величин $\bar{a}_{ph}^*$, нормированных на значение этого параметра для «белого света» — $\bar{a}_{ph/w}^*$ ($K_a = \bar{a}_{ph}^* / \bar{a}_{ph/w}^*$) (правая панель графика) от оптической глубины для вариантов увеличения (*k*) концентрации хлорофилла-*a* (зеленые линии), неживого взвешенного вещества (оранжевые линии) и окрашенного растворенного органического вещества (синие линии) в теплый период года в прибрежных водах около Крымского полуострова (черная линия — исходные условия). Пунктирными линиями показаны оптические глубины 1 и 4.6.

Fig. 4. Dependence of the spectrally weighted chlorophyll-*a* specific absorption coefficient ($\bar{a}_{ph}^*$) (left panel) and $\bar{a}_{ph}^*$, normalized on its value for “white light” — $\bar{a}_{ph/w}^*$ ($K_a = \bar{a}_{ph}^* / \bar{a}_{ph/w}^*$) (right panel) on optical depth for increasing (*k*) of chlorophyll-*a* concentration (green line), non-algal particles (orange line) and colored dissolved organic matter (blue line) in warm period of year in coastal waters near Crimean peninsula (black line — initial conditions). The dashed lines show 1 and 4.6 optical depths.