

УДК 551.463.5:535.34 (262.54)

© Т. Я. Чурилова*, Т. В. Ефимова, Н. А. Моисеева, Е. Ю. Скороход, 2022

Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
299011, пр. Нахимова, д. 2, г. Севастополь, Россия

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

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ВЗВЕШЕННЫМ ВЕЩЕСТВОМ И РАСТВОРЕННЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ ВЕЩЕСТВОМ В АЗОВСКОМ МОРЕ

Статья поступила в редакцию 15.02.2022, после доработки 11.07.2022, принята в печать 01.08.2022

Аннотация

Исследование было проведено на основе результатов измерения концентрации хлорофилла-*a* (*TChl-a*), спектральных показателей поглощения света пигментами фитопланктона, неживым взвешенным веществом (NAP) и окрашенным растворенным органическим веществом (CDOM) в южной части Азовского моря в разные сезоны в период 2016–2020 гг. Получены новые для Азовского моря данные о вариабельности спектральных показателей поглощения света всеми оптически активными компонентами среды. Показана высокая (более чем на порядок) вариабельность всех исследованных показателей. В сезонной динамике *TChl-a* отмечены максимумы в зимнее и летнее время. Установлена связь между поглощением света фитопланктоном и *TChl-a*, которая описывается степенной зависимостью. Выявлены значительные сезонные различия (в два и более раза) между коэффициентами в уравнении параметризации поглощения света фитопланктоном. Выполнена параметризация поглощения света NAP и CDOM, установлены диапазоны вариабельности значений показателей поглощения света и экспоненциального наклона спектров, выявлена их сезонная динамика. Показано, что изменение показателей поглощения света NAP и CDOM в течение года имело обратный характер в сравнении с годовым циклом *TChl-a*. Увеличение показателей поглощения NAP и CDOM наблюдалось после цветения фитопланктона, когда величины *TChl-a* уменьшались. Относительный вклад фитопланктона, NAP и CDOM в общее поглощение света взвешенным и растворенным веществом на длине волны 440 значительно варьировал в течение года. Доля фитопланктона была максимальной зимой и летом, а весной и осенью максимальный вклад в поглощение приходился на CDOM и NAP.

Ключевые слова: концентрация хлорофилла-*a*, спектральный показатель поглощения света, пигменты фитопланктона, взвешенное вещество, окрашенное растворенное органическое вещество, Азовское море

© Т. Я. Чурилова*, Т. В. Ефимова, Н. А. Моисеева, Е. Ю. Скороход, 2022

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 299011, Nakhimov Pr, 2, Sevastopol, Russia

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

SPECTRAL LIGHT ABSORPTION COEFFICIENT OF PARTICLES AND COLORED DISSOLVED ORGANIC MATTER IN THE SEA OF AZOV

Received 15.02.2022; Revised 11.07.2022; Accepted 01.08.2022

Abstract

The research was carried out based on the results of measuring the concentration of chlorophyll-*a* (*TChl-a*), spectral coefficient of light absorption by phytoplankton, non-algal particles (NAP) and colored dissolved organic matter (CDOM) in the southern part of the Sea of Azov in different seasons from 2016 to 2020. New data for the Sea of Azov on the variability of the spectral coefficient of light absorption by all optically active components have been obtained. A high (more than an order of magnitude) variability of all studied parameters was shown. The seasonal dynamics of *TChl-a* shows maxima in winter and summer. A relationship between the phytoplankton absorption and *TChl-a* has been revealed, which is described by a power function. Significant seasonal differences (two or more times) between the coefficients in the equation for parametrization of light absorption by phytoplankton were revealed. The NAP and CDOM light absorption were parametrized, the ranges of variability of the absorption

Ссылка для цитирования: Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Скороход Е.Ю. Спектральные показатели поглощения света взвешенным веществом и растворенным органическим веществом в Азовском море // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 73–83. doi:10.48612/fpg/ex1p-9vtp-phu8

For citation: Churilova T. Ya., Efimova T. V., Moiseeva N. A., Skorokhod E. Yu. Spectral Light Absorption Coefficient of Particles and Colored Dissolved Organic Matter in the Sea of Azov. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 3, 73–83.

doi:10.48612/fpg/ex1p-9vtp-phu8

coefficient and the exponential slope were revealed, and their seasonal dynamics was shown. Annual variability of absorption coefficient of NAP and CDOM was opposite to the annual cycle of *TChl-a*. The NAP and CDOM absorption coefficients increased after phytoplankton blooms, when *TChl-a* decreased. The relative contribution of phytoplankton, NAP, and CDOM to the total absorption by particles and dissolved matter at 440 nm varied significantly over the year. The share of phytoplankton was maximum in winter and summer, while in spring and autumn the maximum contribution to absorption was made by CDOM and NAP.

Keywords: chlorophyll-*a* concentration, spectral light absorption coefficient, phytoplankton pigments, non-algal particles, colored dissolved organic matter, Sea of Azov

1. Введение

Оценка показателей качества и продуктивности вод с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса требует точной трансформации спутниковых данных в биологические характеристики водных экосистем, что возможно на основе региональных алгоритмов, созданных с учетом региональной специфики спектральных биооптических показателей вод. Наиболее критично это для водоемов с высоким содержанием растворенного органического вещества и неживого взвешенного вещества и отсутствием корреляции поглощения света этими компонентами с концентрацией основного фотосинтетически активного пигмента — хлорофилла-*a* (*TChl-a*). Азовское море подвержено влиянию стока крупных рек, что определяет высокое содержание в водах Азовского моря фитопланктона, взвешенного и растворенного вещества [1]. Высокопродуктивные и мутные воды Азовского моря [2] по их оптическим свойствам относят к водам II типа [3]. Стандартные алгоритмы не обеспечивают точной оценки концентрации хлорофилла-*a* в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса [4].

Для организации оперативного мониторинга состояния экосистемы Азовского моря требуется развитие региональных алгоритмов для трансформации данных дистанционного зондирования в показатели качества и продуктивности вод, а именно — в *TChl-a*, поглощение света окрашенным растворенным органическим веществом (CDOM) в сумме с неживым взвешенным веществом (NAP) ($CDM = CDOM + NAP$), а также в первичную продукцию. Точная оценка продукции возможна на основе спектрального подхода [5], который учитывает влияние содержания и оптических характеристик взвешенного и растворенного вещества на спектральные свойства проникающего солнечного излучения [6] и на способность фитопланктона использовать свет в процессе фотосинтеза [7–9], что особенно критично в высокотрофных и оптически комплексных водах, к которым относится Азовское море. Однако на сегодняшний день исследования спектральных показателей поглощения света всеми оптически значимыми компонентами среды в Азовском море только начинаются [10].

Цель настоящей работы состояла в исследовании вариабельности спектральных показателей поглощения света всеми оптически активными компонентами среды (пигментами фитопланктона, NAP и CDOM), их относительного вклада в общее поглощение света на отдельных длинах волн.

2. Методы

Исследования проводились на нескольких станциях в южной части Азовского моря в разные сезоны года в ходе научных экспедиций на НИС «Профессор Водяницкий» в период с 2016 по 2020 гг. (рис. 1). Измерения биооптических показателей, включающих концентрацию хлорофилла-*a* в сумме с феопигментами (*TChl-a*), спектральные показатели поглощения света всеми оптически активными компонентами среды — пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$), неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(\lambda)$) и окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{CDOM}(\lambda)$), выполнялись в соответствии с современным протоколом НАСА [11].

Для определения поглощения света взвешенным веществом пробу взвеси собирали на стекловолоконистые фильтры GF/F путем фильтрации воды (0,5 л) при слабом вакууме (< 0,2 атм). Измерение оптической плотности (OD) проб взвеси проводили в диапазоне от 350 до 750 нм с шагом в 1 нм. Для измерения OD проб неживого взвешенного вещества предварительно пигменты экстрагировали горячим метанолом. Показатели $a_p(\lambda)$ и $a_{NAP}(\lambda)$ рассчитывали

$$a_{p/NAP}(\lambda) = 2,3 OD_{p/NAP}(\lambda) S / V_{sample}, \quad (1)$$

где $OD_{p/NAP}(\lambda)$ — оптическая плотность всей взвеси и NAP после коррекции изменения оптических свойств взвеси в результате ее осаждения на фильтр (b-correction), где V_{sample} — объем пробы воды, м³; S — рабочая площадь фильтра, м².

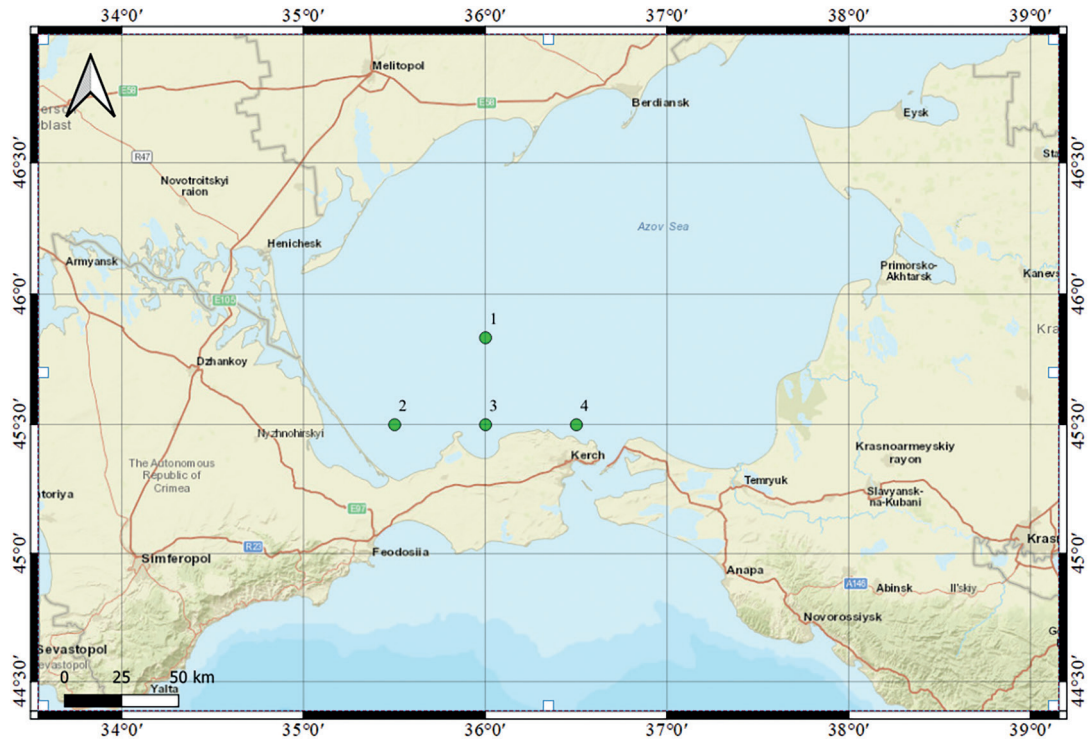


Рис. 1. Карта станций в экспедициях на НИС «Профессор Водяницкий» в январе 2016 г. (PV 83); в апреле 2016 г. (PV 84); в июне 2016 г. (PV 86); в октябре 2016 г. (PV 90); в апреле 2017 г. (PV 93); в июле 2017 г. (PV 96); в мае 2019 г. (PV 106); в июне 2020 г. (PV 116)

Fig. 1. Map of stations during expeditions on the R/V “Professor Vodyanitsky” in January 2016 (PV 83); April 2016 (PV 84); in June 2016 (PV 86); in October 2016 (PV 90); April 2017 (PV 93); in July 2017 (PV 96); in May 2019 (PV 106); in June 2020 (PV 116)

Показатели поглощения света пигментами фитопланктона рассчитывали как разность $a_p(\lambda)$ и $a_{NAP}(\lambda)$. Пробы для определения $a_{CDOM}(\lambda)$ готовили путем фильтрации воды при слабом вакууме ($< 0,2$ атм), используя фильтры Nucleopore с диаметром пор $0,2$ мкм. Измерения проводили в 10 см кварцевых кюветках в сравнении с деионизированной водой в диапазоне от 250 до 750 нм с шагом в 1 нм. Оптические измерения проводили на двухлучевом спектрофотометре Lambda 35 (Perkin Elmer), оснащённом интегрирующей сферой, точность измерения $\pm 0,003$ (при 1 оптической плотности на длине волны 440 нм). Спектральное распределение показателя $a_{NAP}(\lambda)$ и $a_{CDOM}(\lambda)$ описывали экспоненциальной зависимостью. Параметризацию $a_{NAP}(\lambda)$ и $a_{CDOM}(\lambda)$ и определение показателя экспоненты (S_{NAP} и S_{CDOM}) проводили в спектральном диапазоне $400-700$ нм и $350-500$ нм соответственно.

Прозрачность вод оценивали по глубине видимости диска Секки (Z_s). По значениям Z_s рассчитывали величину показателя диффузионного ослабления излучения K_d , используя зависимость [12]:

$$K_d = 1,08 Z_s^{-0,79}. \quad (2)$$

Рассчитанная величина K_d соответствует среднему значению для видимого диапазона излучения в среднем для освещенного слоя.

Зону фотосинтеза (Z_{eu}) рассчитывали на основе экспоненциальной зависимости ослабления света (I) с глубиной (z) [6]:

$$I_z = I_0 \times e^{-K_d \times z}, \quad (3)$$

где I_z — облученность на глубине z, мк Моль квантов $m^{-2} c^{-1}$; I_0 — интенсивность света, падающая на поверхность, мк Моль квантов $m^{-2} c^{-1}$. За нижнюю границу Z_{eu} принимали глубину, куда проникает 1% от падающей на поверхность моря радиации. В этом случае Z_{eu} будет равна:

$$Z_{eu} = 4,6/K_d. \quad (4)$$

3. Результаты и обсуждение

Величина $TChl-a$ в поверхностном слое моря изменялась в течение года в диапазоне от 2,3 до 15 мг м^{-3} на станции № 1, от 3,4 до 22 мг м^{-3} на станции № 2, от 1,7 до 11 мг м^{-3} на станции № 3 и от 5,3 до 13 мг м^{-3} на станции № 4. В годовой динамике этого параметра выделяются максимумы — в начале года (январь) и летом (июль) (рис. 2).

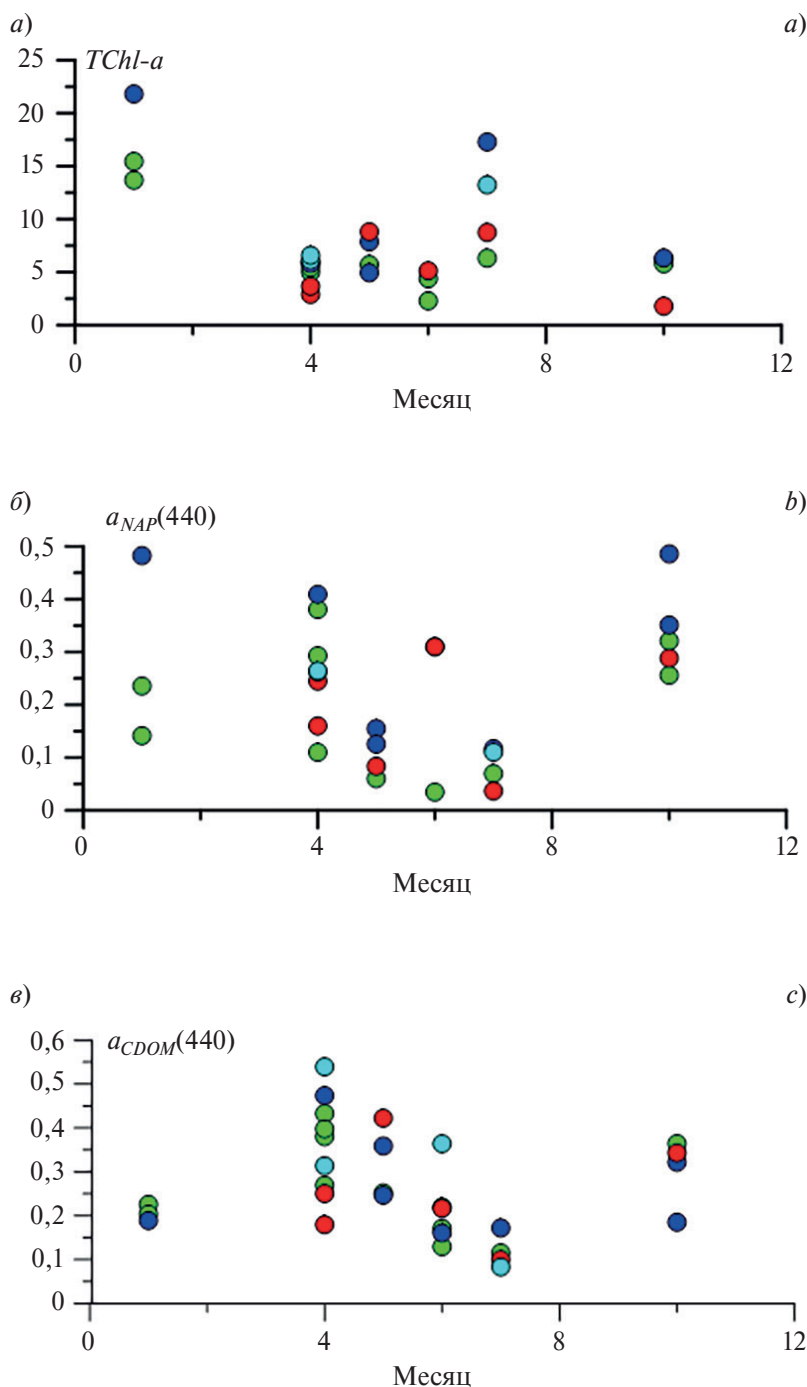


Рис. 2. Годовая динамика концентрации хлорофилла- a в сумме с феопигментами ($TChl-a$, мг м^{-3}) (а), показателя поглощения света неживым взвешенным веществом на длине волны 440 нм ($a_{NAP}(440)$, м^{-1}) (б) и окрашенным растворенным органическим веществом на 440 нм ($a_{CDOM}(440)$, м^{-1}) (в) в поверхностном слое Азовского моря на станциях № 1 (зеленый символ), № 2 (синий символ), № 3 (красный символ) и на № 4 (бирюзовый символ)

Fig. 2. Annual dynamics of sum of chlorophyll- a concentration and phaeopigments ($TChl-a$, mg м^{-3}) (а), light absorption coefficient of non-algal particles at a wavelength of 440 nm ($a_{CDOM}(440)$, m^{-1}) (б) and colored dissolved organic matter at 440 nm ($a_{NAP}(440)$, m^{-1}) (с) in the surface layer of the Sea of Azov at stations No. 1 (green symbol), 2 (blue symbol), 3 (red symbol) and 4 (turquoise symbol)

За весь период исследования на станциях 1–4 (рис. 1) прозрачность вод и зона фотосинтеза изменялась в пределах от 1,0 до 4,5 и от 4,3 до дна (14 м), соответственно. За период исследований отмечена высокая вариабельность спектральных показателей поглощения света ($a_{ph}(\lambda)$), NAP ($a_{NAP}(\lambda)$) и CDOM ($a_{CDOM}(\lambda)$). На рис. 3 показаны примеры спектров удельных показателей поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}^*(\lambda)$), $a_{NAP}(\lambda)$ и $a_{CDOM}(\lambda)$ в разные сезоны. Форма спектров $a_{ph}(\lambda)$ характеризовалась наличием двух основных максимумов на длинах волн ~ 438 и ~ 678 нм.

Следует отметить, что соотношение между максимумами спектра ($R = a_{ph}(438)/a_{ph}(678)$) изменялось незначительно с трендом увеличения значений R от зимы (1,7) к лету (2,3), в среднем R составляло $(2,1 \pm 0,51)$. Следует отметить, что в районе исследований форма спектров $a_{ph}(\lambda)$ была однотипной и не было зафиксировано локального максимума на длине волны ~ 550 или 630 нм. Это свидетельствуют об отсутствии (или незначительном количестве) фикобилин-содержащих видов микроводорослей и цианобактерий в фитопланктоне в районе исследований, а именно — в южной части Азовского моря. Однако в Таганрогском заливе и в северной части моря, прилегающей к заливу, отмечается обилие цианобактерий [13]. Видовой состав фитопланктона Азовского моря, как отмечалось ранее [13], характеризуется высокой пространственной неоднородностью. По-видимому, влияние речного стока на структуру фитопланктона не распространялось до района исследований. Значения показателей $a_{ph}(\lambda)$ различались между сезонами более чем на порядок. Вариабельность показателей $a_{ph}(\lambda)$ в основном определялась изменением содержания пигментов фитопланктона и в меньшей степени зависела от сезонной динамики $a_{ph}^*(\lambda)$ (рис. 3, а). Установлена зависимость $a_{ph}(\lambda)$ от $TChl-a$, которая описывается степенной функцией (рис. 4). В таблице приведены значения коэффициентов, полученных для этой зависимости на длинах волн, соответствующих максимумам в поглощении света пигментами фитопланктона — на 438 и 678 нм.

Выявлены сезонные различия между коэффициентами в уравнении, описывающем зависимость $a_{ph}(\lambda)$ от $TChl-a$ (таблица). Коэффициент $A(\lambda)$ соответствует значению удельного (нормированного на $TChl-a$) показателя поглощения света фитопланктоном ($a_{ph}^*(\lambda)$) при единичной концентрации хлорофилла a . Получено, что $a_{ph}^*(\lambda)$ увеличиваются от зимы к лету. При этом для весеннего и осеннего периодов характерны промежуточные значения $a_{ph}^*(\lambda)$. Отмеченная сезонная динамика $a_{ph}^*(\lambda)$ на длине волны 678 нм связана с изменением степени упаковки пигментов в клетках планктонных водорослей [14], что происходит вследствие адаптивного изменения внутриклеточной концентрации пигментов [15]. Такие изменения являются результатом адаптации, а точнее, акклимации водорослей на уровне клетки к основным условиям в среде обитания — температуре, биогенной обеспеченности и свету. Следует отметить, что свет, который увеличивается

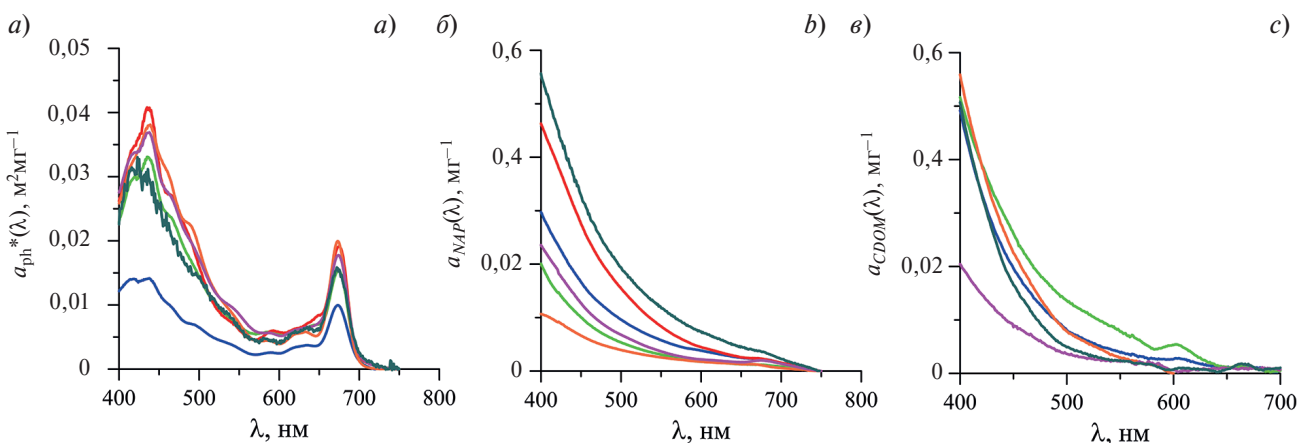


Рис. 3. Спектральные показатели поглощения света пигментами фитопланктона, нормированные на концентрацию хлорофилла a ($a_{ph}^*(\lambda)$), неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(\lambda)$) и окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{CDOM}(\lambda)$) в поверхностном слое Азовского моря на отдельных станциях в январе (синие линии), апреле (светло-зелёные линии), мае (темно-зеленые линии), июне (красные линии), июле (лиловые линии) и октябре (коричневые линии)

Fig. 3. Spectral coefficients of chlorophyll specific light absorption by phytoplankton, ($a_{ph}^*(\lambda)$), of non-algal particles ($a_{NAP}(\lambda)$) and colored dissolved organic matter ($a_{CDOM}(\lambda)$) in the surface layer of the Sea of Azov on particular stations in January (blue lines), April (light green lines), May (dark green lines), June (red lines), July (purple lines) and October (brown lines)

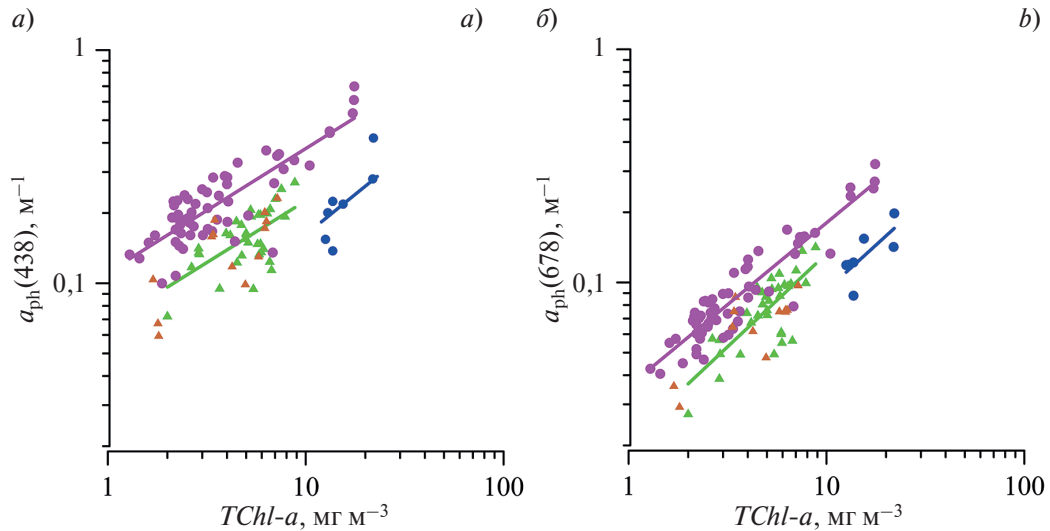


Рис. 4. Зависимость показателя поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 678 нм ($a_{ph}(678)$) (а) и на 438 нм ($a_{ph}(438)$) (б) от концентрации хлорофилла-а в сумме с феопигментами ($TChl-a$)

Fig. 4. Dependence of the light absorption coefficient by phytoplankton at a wavelength of 678 nm ($a_{ph}(678)$) (a) and at 438 nm ($a_{ph}(438)$) (b) on the concentration of sum of chlorophyll-a and phaeopigments ($TChl-a$)

более чем в пять раз при переходе от зимы к лету [16] является фактором, который в большей степени обуславливает адаптивную вариабельность концентрации хлорофилла-а в клетках [15]. Кроме этого, размеры клеток микроводорослей оказывают влияние на степень упаковки пигментов [14]. Отмеченные зимой низкие значения $a_{ph}^*(\lambda)$, вероятно, обусловлены преобладанием в сообществе крупных диатомовых видов [13]. Сезонная динамика $a_{ph}^*(\lambda)$ на длине волны 438 нм связана не только с эффектом упаковки пигментов, но и с содержанием вспомогательных пигментов в клетках микроводорослей [17], что является причиной увеличения R от зимы к лету, а также наиболее значительного внутригодового изменения коэффициента A(438) в сравнении с A(678) (таблица).

В результате проведенной параметризации спектрального распределения $a_{NAP}(\lambda)$ и $a_{CDOM}(\lambda)$, используя экспоненциальную функцию, определены параметры: показатели экспоненты S_{NAP}/S_{CDOM} и величины показателей поглощения света NAP и CDOM на выбранной длине волны (440 нм) — $a_{NAP}(440)$ и $a_{CDOM}(440)$.

Таблица
Table

Коэффициенты A(λ) ($m^2 \text{ mg}^{-1}$) и B(λ) (безразмерный) в степенной зависимости показателя поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$) от концентрации хлорофилла-а в сумме феопигментами ($TChl-a$, $mg \text{ m}^{-3}$):

$$a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) (TChl-a)^B(\lambda)$$

Coefficients A(λ) ($m^2 \text{ mg}^{-1}$) and B(λ) (dimensionless) in the power-law dependence of the phytoplankton light absorption coefficient ($a_{ph}(\lambda)$) on the concentration of sum of chlorophyll-a and phaeopigments ($TChl-a$, $mg \text{ m}^{-3}$):

$$a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) (TChl-a)^B(\lambda)$$

	A(λ)	B(λ)	n	r ²
На длине волны 678 нм				
Зима	0,016	0,77	7	0,54
Весна/осень	0,021	0,80	34	0,56
Лето	0,036	0,70	39	0,87
На длине волны 438 нм				
Зима	0,033	0,69	7	0,54
Весна/осень	0,067	0,53	34	0,38
Лето	0,099	0,58	39	0,74

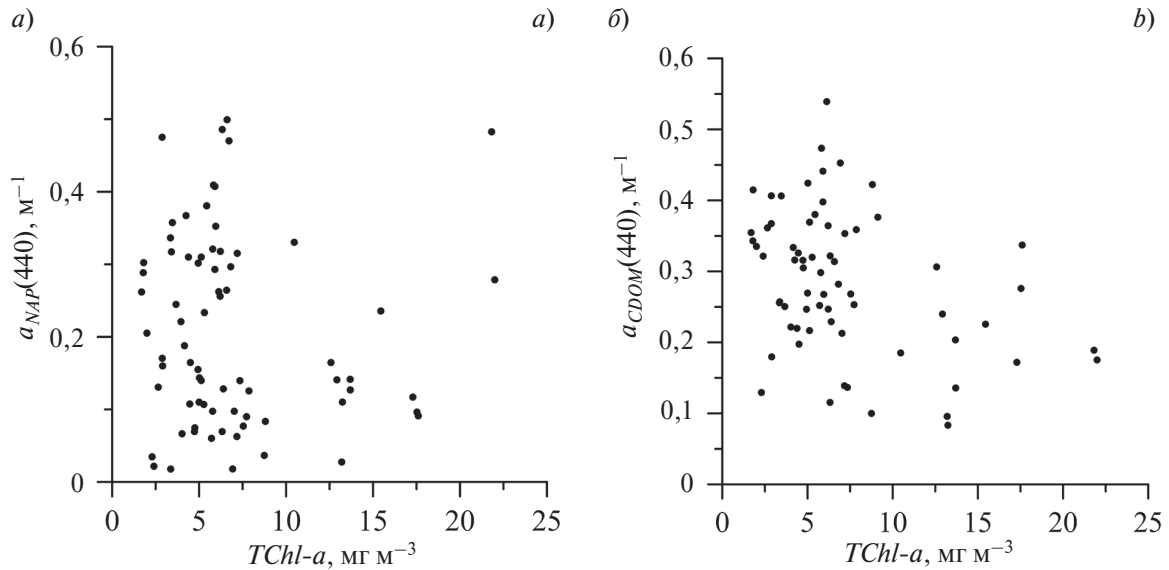


Рис. 5. Зависимость показателя поглощения света неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(\lambda)$) (а) и показателя поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{CDOM}(\lambda)$) (б) от концентрации хлорофилла-а в сумме с феопигментами ($TChl-a$)

Fig. 5. Dependence of the light absorption coefficient by of non-algal particles ($a_{NAP}(\lambda)$) (a) and by colored dissolved organic matter ($a_{CDOM}(\lambda)$) (b) on the concentration of sum of chlorophyll-a and phaeopigments ($TChl-a$)

Величины S_{NAP} и S_{CDOM} варьировали в диапазоне от 0,0080 до 0,014 nm^{-1} и от 0,014 до 0,024 nm^{-1} , в среднем составляли 0,010 ($\pm 0,0015$) nm^{-1} и 0,018 (0,0024) nm^{-1} соответственно. Полученные для Азовского моря значения S_{NAP} соответствуют результатам измерений в других районах Мирового океана [18–21]. Диапазон изменчивости S_{CDOM} в Азовском море совпадает с установленным ранее в других регионах Мирового океана (0,014–0,025 nm^{-1}) [22–24]. Отмечена высокая вариабельность значений показателей $a_{NAP}(440)$ (0,036–0,58 m^{-1}) и $a_{CDOM}(440)$ (0,083–0,54 m^{-1}). Значения $TChl-a$ изменялись в той же степени (более чем на порядок), что и поглощение NAP и CDOM. Корреляции в изменчивости показателей поглощения ($a_{NAP}(440)$ и $a_{CDOM}(440)$) с содержанием пигментов в море ($TChl-a$) не прослеживалось (рис. 5).

Сопоставление внутригодовой динамики этих параметров (рис. 2) показало обратный характер связи поглощения света NAP и CDOM с $TChl-a$. Увеличение показателей $a_{NAP}(440)$ и $a_{CDOM}(440)$ наблюдалось после цветения фитопланктона, когда величины $TChl-a$ уменьшались, и наоборот. Относительный вклад фитопланктона в общее поглощение света взвешенным и растворенным веществом на длине волны 440 изменялся от 7% весной и осенью до 51% зимой (в январе) и достигал 70% летом (в июле) (рис. 6).

Вклад CDOM и NAP варьировал в пределах от 13 до 76% и от 10 до 52% соответственно. Суммарное поглощение света CDOM и NAP на 440 нм ($a_{CDOM}(440)$) изменялось от 0,14 до 0,91 m^{-1} . Общее поглощение света, включая фитопланктон и неживую компоненту (CDOM и NAP), на длине волны 440 нм ($a_{tot}(440)$) составляло 0,17–1,0 m^{-1} . Величины Z_s и Z_{eu} изменялись в пределах от ~1 до 6 м и от 4,3 м до дна моря (по расчётам до 18 м), соответственно. Получена обратная зависимость между $a_{tot}(440)$ и Z_{eu} (рис. 7).

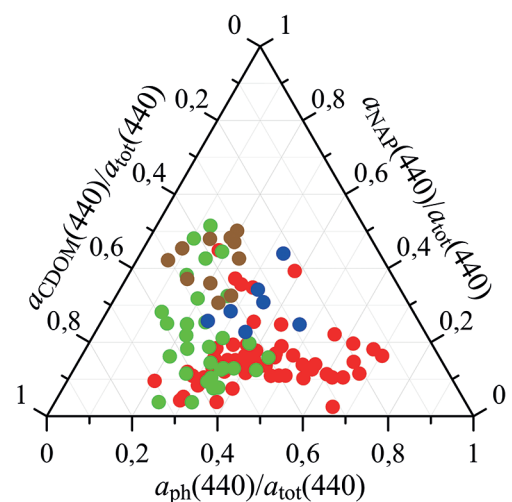


Рис. 6. Относительный вклад пигментов фитопланктона ($a_{ph}(440)/a_{tot}(440)$), неживого взвешенного вещества ($a_{NAP}(440)/a_{tot}(440)$) и окрашенного растворенного вещества ($a_{CDOM}(440)/a_{tot}(440)$) в общее поглощение света (без воды) на длине волны 440 нм в Азовском море зимой (синие символы), весной (зеленые), летом (красные) и осенью (коричневые символы)

Fig. 6. Relative contributions of phytoplankton ($a_{ph}(440)/a_{tot}(440)$), non-algal particles ($a_{NAP}(440)/a_{tot}(440)$) and colored dissolved organic matter ($a_{CDOM}(440)/a_{tot}(440)$) to total non-water absorption at a wavelength of 440 nm in the Sea of Azov in winter (blue symbols), spring (green), summer (red) and autumn (brown symbols)

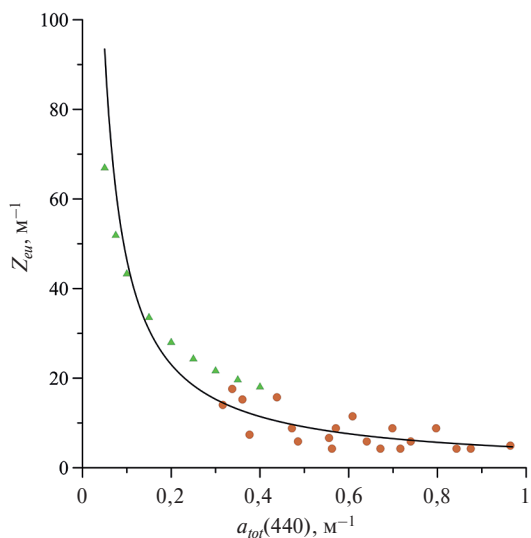


Рис. 7. Связь между поглощением света взвешенным и растворенным веществом на длине волны 440 нм ($a_{tot}(440) = a_{ph}(440) + a_{NAP}(440) + a_{CDOM}(440)$) в поверхностном слое моря и зоне фотосинтеза (Z_{eu}): Азовское море (кружки), Черное море ([25], треугольники)

Fig. 7. Relationship between light absorption by suspended and dissolved matter at a wavelength of 440 nm ($a_{tot}(440) = a_{ph}(440) + a_{NAP}(440) + a_{CDOM}(440)$) in the surface layer of the sea and the photosynthesis zone (Z_{eu}): Sea of Azov (circles), Black Sea ([25], triangles)

ний показателей поглощения света и экспоненциального наклона спектров, их сезонная динамика необходимы для валидации стандартных спутниковых продуктов и развития региональных алгоритмов оценки биооптических показателей в поверхностных водах моря, а также для развития спектральных моделей оценки проникающего в водную толщу излучения и первичной продукции.

Установленная количественная связь зоны фотосинтеза с общим поглощением взвешенным и растворенным веществом в поверхностном слое позволит проводить оценку зоны фотосинтеза по спутниковым данным.

Благодарности

Авторы благодарны ведущему инженеру Землянской Е.А. за помощь в отборе и обработке проб.

Финансирование

Исследование вариабельности спектральных биооптических показателей вод выполнено в рамках гранта РФФ № 22–27–00790.

Funding

The study of the variability of the spectral biooptical indicators of waters was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 22–27–00790.

Литература

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Азовское море / Под ред. Н.П. Гоптарева, А.И. Симонова, Б.М. Затучной, Д.Е. Гершановича. СПб.: Гидрометеиздат, 1991, 235 с.
2. Матишов Г.Г. и др. Оценки концентрации хлорофилла а и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных // Доклады Академии Наук. 2010. Т. 432, № 4. С. 563–566.
3. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color // Limnology and Oceanography. 1977. Vol. 22. P. 709–722.

Объединение азовских данных с результатами, полученными в Черном море, показало возможность получения единого уравнения для описания зависимости Z_{eu} от $a_{tot}(440)$ в поверхностном слое вод Азово-Черноморского бассейна: $Z_{eu} = 4,53 (a_{tot}(440))^{-1,01}$, $r^2 = 0,85$.

4. Выводы

Получены новые для исследуемого региона данные о спектральных показателях поглощения света всеми оптически активными компонентами среды — пигментами фитопланктона, неживым взвешенным веществом и окрашенным растворенным органическим веществом.

Установлена связь между поглощением света фитопланктоном и концентрацией хлорофилла-а, которая описывается степенной зависимостью. Выявлены значительные (в два раза и более) сезонные различия между коэффициентами в уравнении параметризации. Использование полученных связей позволит учитывать сезонные различия в удельных показателях поглощения света фитопланктоном, а следовательно, точнее восстанавливать поглощение на основе данных о концентрации хлорофилла-а или решать обратную задачу, необходимую при восстановлении биооптических показателей вод на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Выполненная параметризация поглощения света неживым взвешенным веществом и окрашенным растворенным органическим веществом, установленные диапазоны значе-

4. Сапрыгин В.В. Изучение распределения хлорофилла а в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и результатам судовых измерений: Автореф. дисс. ММБИ КНЦ РАН. 2011, 125 с.
5. Чурилова Т.Я. и др. Спектральный подход к оценке скорости фотосинтеза фитопланктона в Черном море по спутниковой информации: методологические аспекты развития региональной модели // Журнал Сибирского федерального университета. 2016. Т. 9, № 4. С. 367–384. doi:10.17516/1997-1389-2016-9-4-367-384
6. Kirk J. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3rd edition. UK: Cambridge University Press, 2011. 662 p.
7. Markager S., Vincent W. Light absorption by phytoplankton: development of a matching parameter for algal photosynthesis under different spectral regimes // Journal of Plankton Research. 2001. Vol. 23, N 12. P. 1373–1384. doi:10.1093/plankt/23.12.1373
8. Tilstone G.H. et al. Inherent optical properties of the Irish Sea and their effect on satellite primary production algorithms // Journal of Plankton Research. 2005. Vol. 27, N 11. P. 1127–1148. doi:10.1093/plankt/fbi075
9. Churilova T. et al. Phytoplankton Bloom and Photosynthetically Active Radiation in Coastal Waters // Journal of Applied Spectroscopy. 2020. Vol. 86, N6. P. 1084–1091. doi:10.1007/s10812-020-00944-0
10. Churilova T. et al. Light absorption by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Sea of Azov in January and April 2016 // Proc. 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2018. P. 108336M. doi:10.13140/RG.2.2.24933.91366
11. Neeley A. et al. IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation. Canada: IOCCG, 2018. V 1.0.
12. Ведерников В.И. Первичная продукция в Черном море в летне-осенний период. Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря. М.: Наука, 1989. С. 65–83.
13. Ковалева Г.В. Фитопланктон Азовского моря и прилегающих водоемов. Азовское море в конце XX–начале XXI веков: геоморфология, осадконакопление, пелагические сообщества. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. С. 134–223.
14. Morel A., Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton // Deep-Sea Research. 1981. Vol. 28, N11. P. 1375–1393.
15. Финенко З.З., Хофнер Н., Вильямс Р., Пионтковский С.А. Действие света, температуры и биогенных элементов на отношение углерод фитопланктона: хлорофилл а // Морской экологический журнал. 2003. Т. 2, № 2. P. 40–64.
16. Suslin V.V., S.N. Korolev, A.A. Kucheryaviy, T. Ya. Churilova, O.V. Krivenko. 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, November 19, 2015, (2015), doi:10.1117/12.2203660
17. MacIntyre H.L. et al. Photoacclimation of photosynthesis irradiance response curves and photosynthetic pigments in microalgae and cyanobacteria 1 // Journal of Phycology. 2002. Vol. 38. P. 17–38. doi:10.1046/j.1529–8817.2002.00094.x
18. Roesler C.S. et al. Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters // Limnology and Oceanography. 1989. Vol. 34, N 8. P. 1510–1523.
19. Nelson J.R., Guarda S. Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the southeastern United States // Journal of Geophysical Research. 1995. Vol. 100, N C5. P. 8715–8732. doi:10.1029/95JC00222
20. Bowers D.G. et al. Absorption spectra of inorganic particles in the Irish Sea and their relevance to remote sensing of chlorophyll // International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, N 12. P. 2449–2460. doi:10.1080/01431169608948782
21. Babin M. et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe // Journal of Geophysical Research. 2003. Vol. 108, N C7. P. 3211. doi:10.1029/2001JC000882
22. Bricaud A. et al. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains // Limnology and Oceanography. 1981. Vol. 26, N 1. P. 43–53.
23. Carder K.L. et al. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll // Limnology and Oceanography. 1989. Vol. 34, N 1. P. 68–81.
24. Hansell D.A., Carlson C.A. Biogeochemistry of marine dissolved organic matter. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2014.
25. Чурилова Т.Я. и др. Спектральные биооптические показатели вод и продуктивность фитопланктона в прибрежных водах Черного моря // Труды XI Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод» с международным участием (Санкт-Петербург, 29.09.2021–01.10.2021). СПб.: Химиздат, 2021. С. 88–93.

References

1. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. The Sea of Azov / Edited by N.P. Goptarev, A.I. Simonov, B.M. Zatochnaya, D.E. Gershanovich. St. Petersburg, Hydrometeoizdat, 1991, 235 p. (In Russian).
2. Matishov G.G. et al. Satellite estimation of chlorophyll a concentration and phytoplankton primary production in the Sea of Azov. Doklady Biological Sciences. 2010, 432, 1, 216–219. doi:10.1134/S0012496610030142
3. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color. Limnology and Oceanography. 1977, 22, 709–722.

4. Saprygin V.V. Studying the distribution of chlorophyll a in the Sea of Azov according to remote sensing data from space and the results of ship measurements: *Abstract. diss. MMBI KNC RAS*. 2011, 125 p. (In Russian).
5. 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. Biology*. 2016, 9, 4, 367–384 (In Russian). doi:10.17516/1997-1389-2016-9-4-367-384
6. Kirk J. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. UK, Cambridge University Press, 2011.
7. Markager S., Vincent W. Light absorption by phytoplankton: development of a matching parameter for algal photosynthesis under different spectral regimes. *Journal of Plankton Research*. 2011, 23, 12, 1373–1384. doi:10.1093/plankt/23.12.1373
8. Tilstone G.H. et al. Inherent optical properties of the Irish Sea and their effect on satellite primary production algorithms. *Journal of Plankton Research*. 2005, 27, 11, 1127–1148. doi:10.1093/plankt/fbi075
9. Churilova T. et al. Phytoplankton Bloom and Photosynthetically Active Radiation in Coastal Waters. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2020, 86, 6, 1084–1091. doi:10.1007/s10812-020-00944-0
10. Churilova T. et al. Light absorption by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Sea of Azov in January and April 2016 // Proc. 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2018. P. 108336M. doi: 10.1117/12.2505415
11. Neeley A. et al. IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation. Canada: IOCCG, 2018. V 1.0.
12. Vedernikov V.I. Primary production in the Black Sea in the summer-autumn period. Structure and production characteristics of plankton communities of the Black Sea. *M., Nauka*, 1989, 65–83 (In Russian).
13. Kovaleva G.V. Phytoplankton of the Sea of Azov and adjacent water bodies. The Sea of Azov at the end of XX-beginning of XXI centuries: geomorphology, sedimentation, pelagic communities. Apatity, KNTs RAN, 2008, 134–223 (In Russian).
14. 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.
15. Finenko Z.Z., Hoepffner N., Williams R., Piontkovski S.A. Phytoplankton carbon to chlorophyll a ratio: response to light, temperature and nutrient limitation. *Morskoy Ekologicheskiy Zhurnal*. 2003, 2, 2, 40–64 (In Russian).
16. Suslin V.V., S.N. Korolev, A.A. Kucheryaviy, T. Ya. Churilova, O.V. Krivenko. 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, November 19, 2015, (2015), doi:10.1117/12.2203660
17. MacIntyre H.L. et al. Photoacclimation of photosynthesis irradiance response curves and photosynthetic pigments in microalgae and cyanobacteria. *Journal of Phycology*. 2002, 38, 17–38. doi:10.1046/j.1529-8817.2002.00094.x
18. Roesler C.S. et al. Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnology and Oceanography*. 1989, 34, 8, 1510–1523.
19. Nelson J.R., Guarda S. Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the southeastern United States. *Journal of Geophysical Research*. 1995, 100, C5, 8715–8732. doi:10.1029/95JC00222
20. Bowers D.G. et al. Absorption spectra of inorganic particles in the Irish Sea and their relevance to remote sensing of chlorophyll. *International Journal of Remote Sensing*. 1996, 17, 12, 2449–2460. doi:10.1080/01431169608948782
21. Babin M. et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research*. 2003, 108, C7, 3211. doi:10.1029/2001JC000882
22. Bricaud A. et al. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnology and Oceanography*. 1981, 26, 1, 43–53.
23. Carder K.L. et al. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnology and Oceanography*. 1989, 34, 1, 68–81.
24. Hansell D.A., Carlson C.A. Biogeochemistry of marine dissolved organic matter. *Academic Press is an imprint of Elsevier*, 2014.
25. Churilova T. Ya. et al. Spectral optical indicators of waters and phytoplankton productivity in the coastal waters of the Black Sea. *Proceedings of the XI International conference «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2021) (St. Petersburg, 29.09.2021–01.10.2021)*. St. Petersburg, Khimizdat, 2021, 88–93 (In Russian).

Об авторах

ЧУРИЛОВА
Татьяна Яковлевна

Кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель научно-исследовательского центра Геоматики ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, пр. Нахимова, д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 03qf4s180
ORCID ID: 0000-0002-0045-7284,
WoS ResearcherID: O-8437-2016,
Scopus AuthorID: 6603622802,
elibrary AuthorID: 888565,
e-mail: tanya.churilova@ibss-ras.ru

Спектральные показатели поглощения света взвешенным веществом и растворенным органическим веществом в Азовском море
Spectral light absorption coefficient of particles and colored dissolved organic matter in the Sea of Azov

ЕФИМОВА Татьяна Владимировна	Кандидат биологических наук, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, пр. Нахи- мова, д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 03qf4s180	ORCID ID: 0000-0003-3908-4160, WoS ResearcherID: X-1355-2019, Scopus AuthorID: 57194423783, elibrary AuthorID: 766926, e-mail: tefimova@ibss-ras.ru
МОИСЕЕВА Наталья Александровна	Научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт био- логии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, пр. Нахимова, д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 03qf4s180	ORCID ID: 0000-0003-1356-7981, WoS ResearcherID: AAN-2819-2019, Scopus AuthorID: 57194431032, elibrary AuthorID: 959717, e-mail: moiseeva@ibss-ras.ru
СКОРОХОД Елена Юрьевна	Младший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Ин- ститут биологии южных морей имени А.О. Кова- левского РАН» (299011, пр. Нахимова, д. 2, г. Сева- стополь, Россия), ROR 03qf4s180	ORCID ID: 0000-0002-3057-3964, WoS ResearcherID: A-6831-2019, Scopus AuthorID: 57215009764, elibrary AuthorID: 1034485, e-mail: elenaskorokhod@ibss-ras.ru