

УДК 551.463.5

© Е. Н. Корчемкина*, Е. В. Маньковская, 2022

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

*E-mail: korchemkina@mhi-ras.ru

СВЯЗЬ БИООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ ВЕСНОЙ 2019 ГОДА

Статья поступила в редакцию 15.02.2022, после доработки 12.07.2022, принята в печать 28.07.2022

Аннотация

Представлен анализ натуральных измерений спектрального коэффициента яркости Черного моря и рассчитанных по нему биооптических и цветовых характеристик, а также концентраций хлорофилла-*a* и глубины видимости белого диска. Для различных по своим особенностям районов Черного моря представлены осредненные значения рассчитанных характеристик: эффективной и доминирующей длины волны в спектре излучения моря, чистоты цвета воды. При помощи разработанного ранее биооптического алгоритма рассчитаны концентрация хлорофилла-*a*, поглощение растворенным органическим веществом, обратное рассеяние взвесью, показатель вертикального ослабления света.

Установлены обратные зависимости между глубиной видимости белого диска и коэффициентом яркости в максимуме, а также между глубиной видимости белого диска и доминирующей длиной волны. Получены линейные связи между концентрацией хлорофилла-*a* в поверхностном слое моря и эффективной и доминирующей длиной волны с высокими коэффициентами корреляции. Также установлена значимая связь между концентрацией хлорофилла-*a* и максимумом спектра коэффициента яркости. Среди корреляционных связей биооптических параметров с цветовыми характеристиками высокая корреляция наблюдается между показателем вертикального ослабления света и чистотой цвета.

Рассчитанные по данным спектрального коэффициента яркости с применением полуаналитического алгоритма концентрации хлорофилла-*a* достаточно хорошо согласуются с данными натуральных измерений. Сравнение расчетных и измеренных концентраций хлорофилла-*a* со спутниковыми продуктами оптических сканеров моря показывает завышение концентраций хлорофилла-*a* спутниковыми алгоритмами обработки данных.

Полученные корреляционные связи могут применяться в дальнейшем для оценки биооптических параметров в северной части Черного моря.

Ключевые слова: концентрация хлорофилла-*a*, поглощение растворенным органическим веществом, обратное рассеяние взвесью, показатель вертикального ослабления света, эффективная длина волны, доминирующая длина волны, чистота цвета

© Е. Н. Korchemkina*, Е. В. Mankovskaya, 2022

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

*E-mail: korchemkina@mhi-ras.ru

RELATIONSHIPS BETWEEN BIO-OPTICAL PARAMETERS OF THE BLACK SEA WATERS AND SPECTRAL REFLECTANCE COEFFICIENT IN SPRING 2019

Received 15.02.2022; Revised 12.07.2022; Accepted 28.07.2022

Abstract

The paper presents an analysis of field measurements of the spectral reflectance of the Black Sea and the bio-optical and colorimetric characteristics calculated from it, as well as chlorophyll concentrations and the Secchi disk depth. For the regions of the Black Sea with different characteristics, the averaged values of the calculated characteristics are presented: the effective and dominant wavelength in the reflectance spectrum, the purity of the water color. Using the previously developed bio-optical algorithm, the concentration of chlorophyll, absorption by dissolved organic matter, backscattering by suspended matter, and the vertical light attenuation coefficient were calculated.

Ссылка для цитирования: Корчемкина Е.Н., Маньковская Е.В. Связь биооптических параметров вод Черного моря с характеристиками коэффициента яркости весной 2019 года // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 3. С. 53–64. doi:10.48612/fpg/47v1-8k56-g93n

For citation: Korchemkina E.N., Mankovskaya E.V. Relationships Between Bio-Optical Parameters of the Black Sea Waters and Spectral Reflectance Coefficient in Spring 2019. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 3, 53–64. doi:10.48612/fpg/47v1-8k56-g93n

Inverse relationships are established between the Secchi disk depth and the maximum reflectance, as well as between the Secchi disk depth and the dominant wavelength. Linear relationships with high correlation coefficients are obtained between the surface chlorophyll concentration and the effective and dominant wavelength. A significant relationship was also established between the surface chlorophyll concentration and the maximum reflectance. Among the relationships between bio-optical and colorimetric parameters, a high correlation is observed between the vertical light attenuation coefficient and color purity.

Chlorophyll concentrations calculated from the data of the spectral reflectance coefficient using a semi-analytical algorithm are in good agreement with the data of field measurements. Comparison of calculated and measured chlorophyll concentrations with satellite products of optical ocean color scanners shows an overestimation of chlorophyll concentrations by satellite data processing algorithms.

The obtained correlations can be used in the future to assess bio-optical parameters in the northern part of the Black Sea.

Keywords: chlorophyll concentration, absorption by dissolved organic matter, particles backscattering, vertical attenuation coefficient, effective wavelength, dominating wavelength, color purity

1. Введение

Спектральный коэффициент яркости водной толщи (СКЯ) представляет собой отношение яркости восходящего из моря излучения к яркости диффузно отражающего белого экрана при том же освещении. Яркость выходящего из водной толщи излучения в основном формируется в фотическом слое и зависит от концентрации взвешенных частиц (минеральная взвесь, клетки фитопланктона, детрит) и растворенного органического вещества (РОВ). Соотношение вклада этих веществ в суммарное поглощение и рассеяние определяет не только величины СКЯ, но и форму его спектра и расположение спектральных максимумов.

По значениям СКЯ можно судить о процессах, происходящих в поверхностном слое, например, таких как распространение в море речных стоков, наличие примесей различного происхождения, образование мезомасштабных вихрей, фронтальных зон и др. Коэффициент яркости является ключевой характеристикой, на основе которой строится решение обратной задачи спутникового мониторинга водоемов.

Видимый цвет моря определяется формой спектра коэффициента яркости. Для характеристики цветности существуют различные параметры, например, номер пробирки на шкале Фореля-Уле [1], цветовые координаты и угол цветности [2–4], эффективная и доминирующая длина волны и чистота цвета [5].

Теоретически показано, что СКЯ водной толщи связан с первичными гидрооптическими характеристиками (поглощением и обратным рассеянием) воды и определяется соотношением [6]

$$\rho_w \sim b_b / (a + b_b), \quad (1)$$

где b_b — показатель рассеяния назад, a — показатель поглощения. Величина b_b значительно меньше (почти на порядок) величины a , за исключением некоторых ситуаций, например, кокколитофоридных цветений, поэтому с допустимым приближением ρ_w определяется соотношением

$$\rho_w \sim b_b / a. \quad (2)$$

Форма спектра коэффициента яркости и соответствующие цветовые характеристики вод могут значительно отличаться в различных водоемах. По оптическим свойствам воды Черного моря по классификации Мореля [7] относится к типу II, для которого влияние поглощения неживой органикой и рассеяния взвесью значительно превышает влияние поглощения пигментами фитопланктона. Для Черного моря характерна форма спектра коэффициента яркости с одним максимумом в области 485–510 нм.

Цель настоящей работы — установить и исследовать связи биооптических параметров вод Черного моря с цветовыми характеристиками коэффициента яркости. Для этого представлены и проанализированы натурные данные спектрального коэффициента яркости, а также рассчитаны цветовые характеристики вод Черного моря на основе СКЯ. Первичные оптические характеристики получены с использованием полуаналитического алгоритма обработки спектров коэффициента яркости [8].

2. Район исследования и данные

Данные измерений СКЯ получены в ходе экспедиции НИС «Профессор Водяницкий» весной 2019 г. по Черному морю. Масштабная натурная съемка оптических характеристик выполнена в период 18.04–13.05.2019 в северной и северо-восточной частях Черного моря (42,5–45,8°с.ш.; 31,5–39,8°в.д.).

В ходе экспедиции спектры коэффициента яркости водной толщи были получены на 89-ти станциях, положение которых показано черными точками на рис. 2.

Для исследования связей биооптических параметров с характеристиками коэффициента яркости использовались данные о глубине видимости белого диска (относительной прозрачности) и концентрации хлорофилла-*a*, полученные в этой же экспедиции. Глубина видимости белого диска определялась по стандартной методике [9]. Концентрация хлорофилла-*a* определялась сотрудниками Института биологии южных морей в лабораторных условиях в пробах воды, взятых на 22-х станциях в поверхностном слое (0–5 м). Также для сопоставления использовался стандартный спутниковый продукт *CHL* (концентрация хлорофилла-*a*) по данным MODIS Aqua/Terra, рассчитанный по формулам OC4 [10].

3. Методы

Измерения спектрального коэффициента яркости. Измерения спектрального коэффициента яркости проводились с борта судна спектрофотометром, разработанным в отделе оптики и биофизики моря МГИ РАН [8]. Прибор измеряет спектральную яркость восходящего из моря излучения в диапазоне длин волн 390–750 нм с дискретностью 5 нм. Измеренный спектр яркости моря нормируют на спектральную облученность поверхности моря и получают таким образом спектральные коэффициенты яркости моря. Измеряют также спектральные коэффициенты яркости излучения, отраженного поверхностью моря, которые вычитают из спектров общего коэффициента яркости моря, и таким образом определяют спектральные коэффициенты яркости водной толщи $\rho_w = \rho_{sea} - \rho_{surf}$.

Расчет биооптических характеристик. В исследуемом районе в период проведения измерений не зафиксировано цветения кокколитофорид, что позволяет использовать соотношение (2) для расчетов. Гиперспектральные измерения СКЯ позволяют восстанавливать такие биооптические параметры, как показатель рассеяния назад частицами взвеси, концентрацию хлорофилла-*a*, показатель поглощения растворенным органическим веществом (РОВ) и показатель вертикального ослабления света. Для расчетов использовался полуаналитический алгоритм из работы [8]. Спектр коэффициента яркости описывается формулой

$$R_{rs}(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550)(550/\lambda)^v}{a_w(\lambda) + C_{ph} a_{ph}^*(\lambda) + a_{org}(400)e^{-S(\lambda-400)}}, \quad (3)$$

где $k = 0,15$; $b_{bw}(\lambda)$ — показатель рассеяния назад чистой водой [10]; $a_w(\lambda)$ — показатель поглощения чистой водой [11]; $a_{ph}^*(\lambda)$ — спектр удельного поглощения пигментами фитопланктона (нормированный на концентрацию хлорофилла-*a*) [12]; $v = 1,5$ — спектральный наклон рассеяния назад, зависящий от размера частиц [13]; $S = 0,018$ — спектральный наклон показателя поглощения света РОВ [14]; $b_{bp}(550)$ — показатель рассеяния назад частицами взвеси на длине волны 550 нм; C_{ph} — концентрация пигментов фитопланктона и $a_{org}(400)$ — показатель поглощения РОВ на длине волны 400 нм.

Неизвестные параметры модели ($b_{bp}(550)$, C_{ph} , $a_{org}(400)$), рассчитываются методом оптимизации, каждый в своем спектральном участке: $a_{org}(400)$ — в диапазоне 390÷420 нм, C_{ph} — 420÷460 нм и $b_{bp}(550)$ — 460÷650 нм. Погрешность определения зависит от точности определения входных параметров и составляет 25 % для пигментов фитопланктона и 5 % для взвеси и РОВ. Основным пигментом фитопланктона, влияющим на оптические свойства воды, является хлорофилл-*a*. Поэтому в данной работе концентрация хлорофилла-*a* C_{chl}^* принимается равной концентрации пигментов фитопланктона C_{ph} , получаемой в результате расчетов.

Показатель вертикального ослабления света определялся по восстановленным биооптическим параметрам, исходя из формулы

$$K_d(\lambda) = \alpha(\lambda) + b_b(\lambda) = a_w(\lambda) + C_{ph} a_{ph}^*(\lambda) + a_{org}(400)e^{-S(\lambda-400)} + b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550)(550/\lambda)^v. \quad (4)$$

Расчет цветовых характеристик. Для исследуемой области Черного моря по спектрам коэффициента яркости рассчитывались следующие цветовые характеристики: эффективная и доминирующая длины волн в спектре излучения моря, чистота цвета воды.

Эффективная длина волны представляет собой средневзвешенную по спектру коэффициента яркости длину волны:

$$\lambda_{eff} = \frac{\int \lambda \rho(\lambda) d\lambda}{\int \rho(\lambda) d\lambda}. \quad (5)$$

Она представляет собой длину волны, на которой передается максимальная энергия в спектре.

Другой оценкой цвета воды, близкой к визуальной, является доминирующая длина волны λ_{dom} в спектре излучения моря. Она основана на колориметрической системе X, Y, Z [15] (рис. 1, *слева*). Координаты цветности x, y, z в данной системе рассчитываются по формулам

$$X = \int_{400}^{700} R_{\text{TS}}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda; \quad x = X / (X + Y + Z); \quad (6)$$

$$Y = \int_{400}^{700} R_{\text{TS}}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda; \quad y = Y / (X + Y + Z); \quad (7)$$

$$Z = \int_{400}^{700} R_{\text{TS}}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda; \quad z = Z / (X + Y + Z); \quad (8)$$

где $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ — функции спектральной чувствительности человеческого глаза. Величина λ_{dom} равна длине волны монохроматического излучения (его называют доминирующим), которое надо смешать в определенной пропорции с белым излучением, чтобы получить видимый цвет моря (рис. 1, *справа*).

Чистота цвета воды P представляет собой пропорцию (в процентах), в которой необходимо смешать монохроматическое излучение, именуемое в колориметрической системе X, Y, Z как доминирующая длина волны, с белым излучением, чтобы получить видимый цвет моря. Чистота цвета воды связана с ее прозрачностью — высокопрозрачные воды характеризуются высокими величинами чистоты цвета, в мутных водах чистота цвета низкая.

4. Результаты и обсуждение

Распределение максимумов коэффициента яркости вод, измеренных в ходе экспедиции, показано на рис. 2. Самые низкие значения максимумов СКЯ наблюдались на северо-западном шельфе и в центральной глубоководной части полигона. Повышенные величины наблюдались в восточной части полигона и вдоль южного побережья Крыма. При этом все спектры СКЯ имеют схожую характерную для Черного моря форму с максимумом вблизи 490 нм. В районе г. Сочи наблюдался плюм, обусловленный стоком р. Мзымта. Здесь форма спектра коэффициента яркости изменялась, максимум смещался в сторону длинных волн до 497 нм.

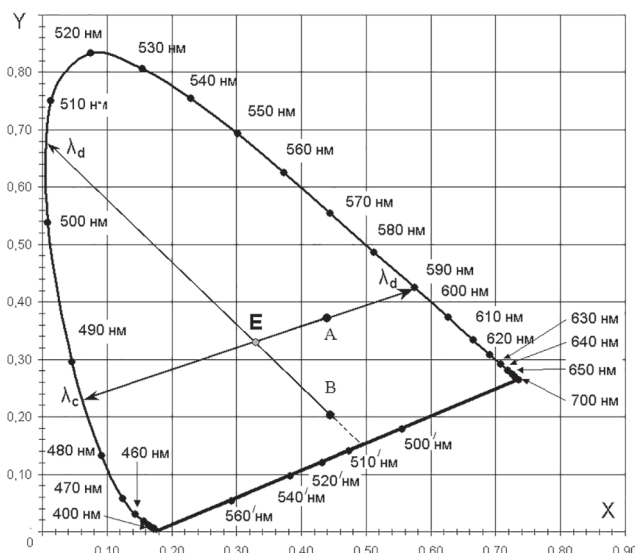
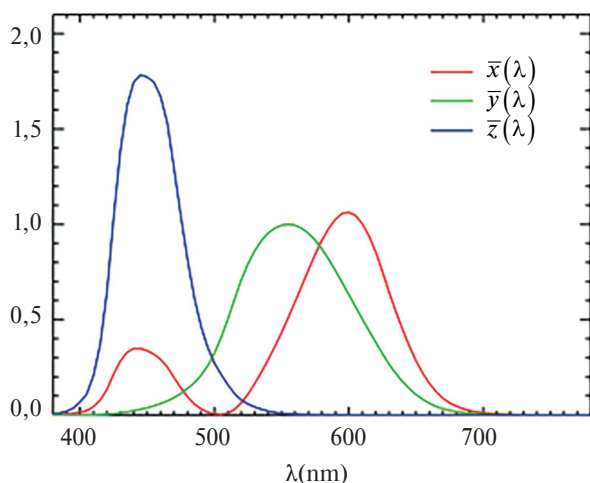


Рис. 1. Функции спектральной чувствительности для стандартного наблюдателя согласно CIE1931 [16] (слева). Диаграмма цветности в координатах x, y (справа): точка E — белый цвет; точки A и B — некоторые произвольные цвета; λ_d — положение доминирующей длины волны

Fig. 1. Spectral sensitivity functions for a standard observer according to CIE1931 [16] (on the left). Chromaticity diagram in x, y coordinates (on the right): point E — white; points A and B are some arbitrary colors; λ_d is the position of the dominant wavelength

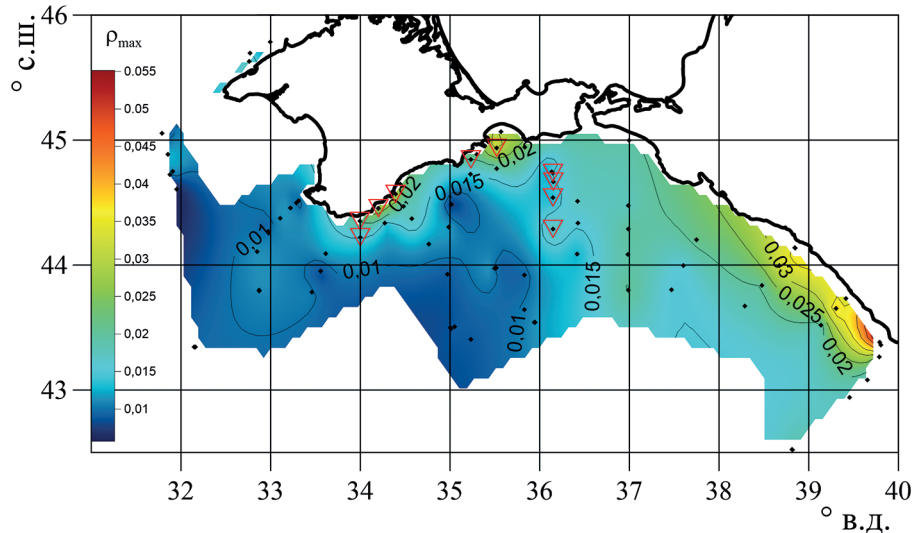


Рис. 2. Распределение спектральных максимумов СКЯ. Черными точками показаны станции измерения спектров коэффициента яркости. Красные треугольники — станции отбора проб для определения концентрации хлорофилла-*a* в лабораторных условиях

Fig. 2. Distribution of spectral maxima of the Rrs. The black dots show the stations for measuring the reflectance coefficient spectra. Red triangles are sampling stations for determining the concentration of chlorophyll-*a* in the laboratory

Повышенные величины максимума СКЯ в указанных районах объясняются наличием в прибрежных водах высоких концентраций мелкой (минеральной) взвеси, приносимой в море с речными водами. У минеральной взвеси, по сравнению с органической, показатели рассеяния назад значительно выше, что, согласно формуле коэффициента яркости, и сказывается на величине максимума СКЯ.

Наблюдения за глубиной видимости белого диска Z_d в ходе экспедиции выполнены для 69 станций. Наблюдающийся разброс значений составил от 4 м в плюме возле Кавказского побережья до 23 м в глубоководной части Черного моря.

Для 10-ти станций (рис. 2) экспедиции имеются данные совместных измерений коэффициента яркости и концентрации хлорофилла-*a* C_{chl} , мг/м³ [17]. Значения C_{chl} изменялись от 0,22 до 0,77 мг/м³ и в среднем составили $C_{chl} = 0,45 \pm 0,22$ мг/м³ (здесь и далее после \pm указываются среднеквадратические отклонения по всему ансамблю измерений).

В соответствии с изменчивостью значений максимума коэффициента яркости исследуемая область разбита на районы: 1) Восточная часть — область восточнее 37°в.д.; 2) Прибрежная зона Крыма — от берега до изобаты 200 м между 33 и 37°в.д.; 3) Северо-западный шельф (СЗШ) — область западнее 33°в.д. с глубинами до 200 м; 4) Глубоководная центральная часть — остальная часть полигона глубже 200 м. Осредненные по районам спектры показаны на рис. 3. Основные измеренные и расчетные цветовые характеристики вод моря в данных районах показаны в табл. 1.

По данным всех измерений спектров коэффициента яркости диапазон изменчивости значений доминирующей длины волны составил 482–496 нм. Согласно общепринятой классификации цвета в диапазоне длин волн 480–500 нм свет характеризуется как голубой.

Расчётные величины чистоты цвета изменялись от 24 до 56%. Низкие значения, т.е. более мутные воды, наблюдались в плюме возле г. Сочи, в районе г. Ялта и г. Феодосия, а также в области 33°в.д., 44°с.ш. На данных станциях по визуальным оценкам воды имели зеленоватый оттенок в отличие от вод остальной части полигона. Высокие значения чистоты цвета получены в районе полигона между 35–37,7°в.д. и 43–44,5°с.ш.

Для сравнения с характеристиками светового поля в других районах Мирового океана отметим высоко прозрачные воды Саргассова ($\lambda_{dom} = 470$ нм, $P = 86\%$) и Средиземного морей ($\lambda_{dom} = 473$ нм, $P = 83\%$) и, наоборот, мутные воды Балтийского моря (южная часть Ботнического залива) ($\lambda_{dom} = 540$ нм, $P = 24\%$) [18].

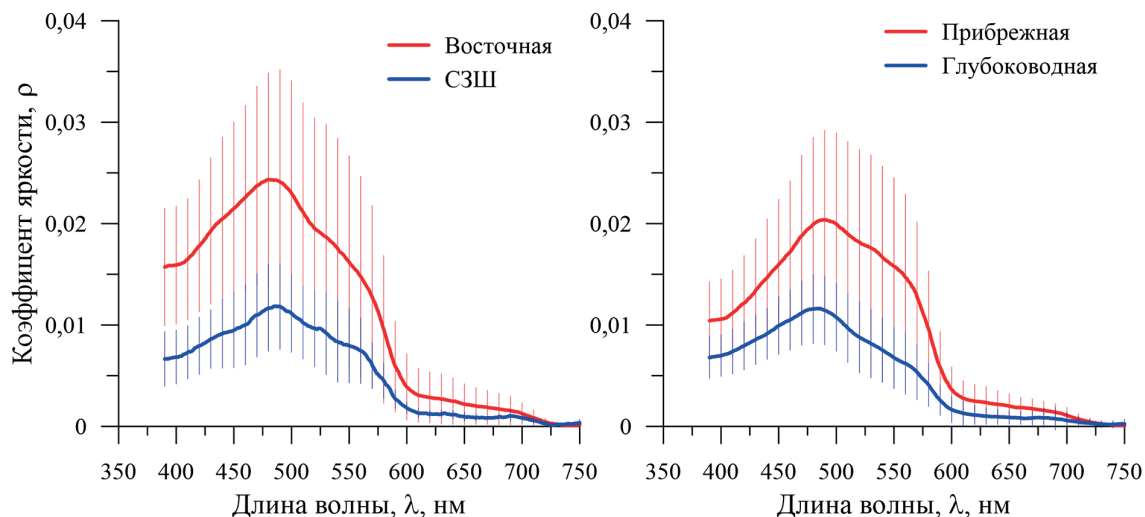


Рис. 3. Средние по районам спектры СКЯ и их среднеквадратическое отклонение (показано штриховкой)

Fig. 3. Rrs spectra averaged over the regions and their standard deviation (shown by shading)

Таблица 1

Table 1

Глубина видимости белого диска (Z_d , м), спектральный максимум коэффициента яркости (ρ_{\max}) и соответствующая ему длина волны (λ_{\max} , нм), эффективная и доминирующая длины волн (λ_{eff} и λ_{dom} , нм), чистота цвета (P , %)

Secchi disc depth (Z_d , m), spectral maximum of the reflectance coefficient (ρ_{\max}) and its corresponding wavelength (λ_{\max} , nm), effective and dominant wavelengths (λ_{eff} and λ_{dom} , nm), color purity (P , %)

Район	Z_d , м	ρ_{\max}	λ_{\max} , нм	λ_{eff} , нм	λ_{dom} , нм	P , %
Северо-западный шельф (СЗШ)	12 ± 3	$0,012 \pm 0,004$	485 ± 9	499 ± 4	489 ± 2	38 ± 3
Прибрежная зона Крыма	8 ± 3	$0,021 \pm 0,009$	491 ± 6	501 ± 6	491 ± 4	35 ± 7
Глубоководная центральная часть	14 ± 4	$0,012 \pm 0,004$	483 ± 7	493 ± 9	486 ± 2	44 ± 7
Восточная часть	10 ± 3	$0,025 \pm 0,012$	481 ± 7	493 ± 6	486 ± 3	42 ± 7

Между значениями глубины видимости белого диска Z_d и значениями коэффициента яркости в максимуме ρ_{\max} , а также между глубиной видимости белого диска Z_d и доминирующей длиной волны λ_{dom} наблюдаются обратные зависимости (рис. 4). Соответствующие уравнения связи:

$$\ln \rho_{\max} = -1,02 \ln Z_d - 1,71; R = 0,82, \quad (9)$$

$$\ln \lambda_{\text{dom}} = -0,013 \ln Z_d + 6,22; R = 0,66. \quad (10)$$

В работе [19] приводится формула связи $\lambda_{\text{dom}} = f(Z_d)$, полученная по измерениям в водах Черного моря ($Z_d = 5-16$ м):

$$\ln \lambda_{\text{dom}} = -0,03 \ln Z_d + 6,27; R = 0,99. \quad (11)$$

Расхождения в коэффициентах связей $\lambda_{\text{dom}} = f(Z_d)$ по данным работы [19] и полученных в нашем исследовании можно объяснить разными диапазонами изменчивости Z_d .

На рис. 5 (слева) приводится связь концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое моря с эффективной и доминирующей длиной волны спектра коэффициента яркости. Уравнения связи имеют вид:

$$C_{chl} = 0,025 \lambda_{\text{eff}} - 12,036; R = 0,83; \quad (12)$$

$$C_{chl} = 0,051 \lambda_{\text{eff}} - 24,531; R = 0,97. \quad (13)$$

Они получены для 10-ти станций, на которых имеются данные совместных определений концентрации хлорофилла-а и спектрального коэффициента яркости. Положение этих станций (рис. 2), соответствует,

Связь биооптических параметров вод Черного моря с характеристиками коэффициента яркости весной 2019 года
 Relationships between bio-optical parameters of the Black Sea waters and spectral reflectance coefficient in spring 2019

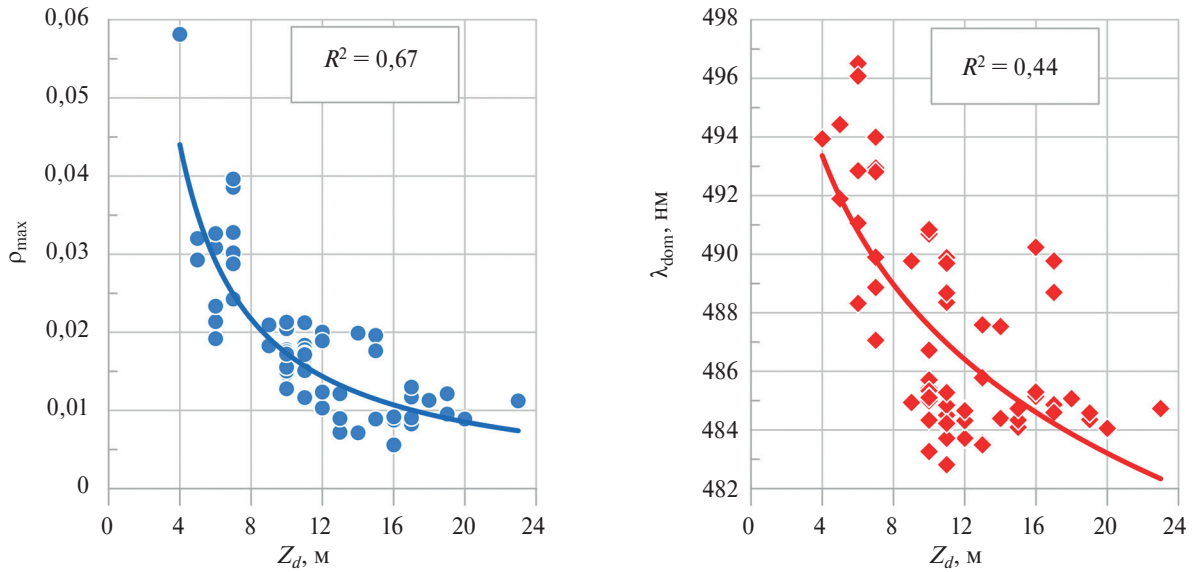


Рис. 4. Связь глубины видимости белого диска со спектральным максимумом коэффициента яркости (слева) и доминирующей длиной волны (справа)

Fig. 4. Relation between the Secchi disc depth and the spectral maximum of the reflectance coefficient (left) and dominant wavelength (right)

в основном, повышенным величинам спектрального максимума коэффициента яркости относительно аналогичных значений на остальной части исследуемого полигона. Поэтому данные зависимости справедливы для величин спектральных максимумов коэффициента яркости от 0,13 до 0,33 и для диапазона эффективной длины волны спектра яркости $486 \leq \lambda_{\text{eff}} \leq 510$ нм.

Для сравнения с литературными данными уравнение связи эффективной длины волны с концентрацией хлорофилла-а в поверхностном слое моря в логарифмической форме имеет вид:

$$\lg C_{chl} = 2,46 \cdot 10^{-2} \lambda_{\text{eff}} - 12,68; R = 0,83. \quad (14)$$

В работе [20] аналогичная зависимость для эффективной длины волны ($460 \leq \lambda_{\text{eff}} \leq 520$ нм), полученная по измерениям в Черном, Средиземном морях и Атлантическом океане, имеет вид:

$$\lg C_{chl} = 5,09 \cdot 10^{-2} \lambda_{\text{eff}} - 25,36; R = 0,91. \quad (15)$$

Уравнение связи получено по данным 74 измерений. Коэффициенты уравнений отличаются практически в 2 раза, что скорее всего определяется различиями в биооптических характеристиках исследованных акваторий, а также малым числом измерений в нашем исследовании.

Связь с более высоким коэффициентом корреляции наблюдается между концентрацией хлорофилла-а в поверхностном слое и максимумом спектра коэффициента яркости (рис. 5, справа):

$$C_{chl} = 26,89 \rho_{\text{max}} - 0,11; R = 0,93. \quad (16)$$

Данная зависимость справедлива для $\rho_{\text{max}} = 0,13 \dots 0,33$ и $C_{chl} = 0,22 \dots 0,77$ мг/м³.

По измеренным спектральным коэффициентам яркости моря с использованием полуаналитического алгоритма восстановлены следующие параметры: показатель рассеяния назад частицами взвеси, концентрация хлорофилла-а, показатель поглощения растворенным органическим веществом (РОВ) и показатель вертикального ослабления света. Корреляционные связи восстановленных биооптических параметров с цветовыми характеристиками СКЯ приводятся на рис. 6, 7.

Рис. 6 показывает, что биооптические характеристики гораздо сильнее коррелируют с доминирующей длиной волны. Это обусловлено тем, что доминирующая длина волны является именно цветовой, а не энергетической характеристикой, показывающей «видимый» цвет вод, который, в свою очередь, сильно зависит от поглощающих компонентов морской воды. В Черном море поглощение РОВ оказывает более

значимое влияние на СКЯ и цвет вод, по сравнению с поглощением пигментами фитопланктона. Соответственно, более тесная связь наблюдается с поглощением РОВ, чем с концентрацией хлорофилла-а (рис. 6). Высокая корреляция ($R = 0,84$) наблюдается между показателем вертикального ослабления света и чистой водой (рис. 7, справа).

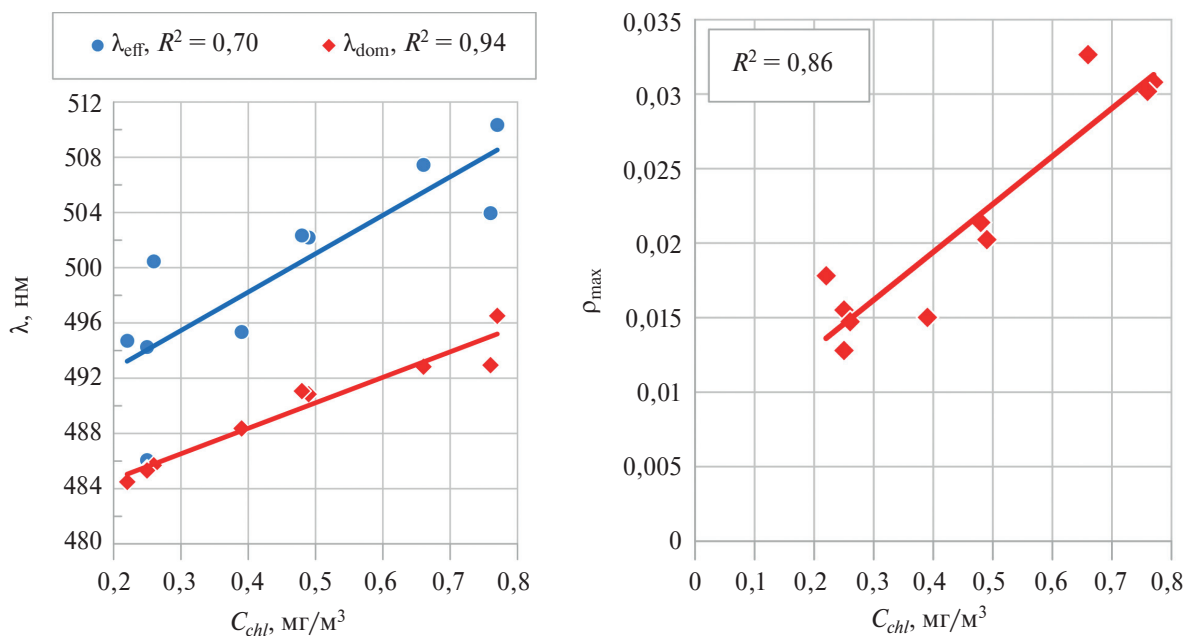


Рис. 5. Связь измеренных концентраций хлорофилла-а с эффективной и доминирующей длиной волны (слева) и максимумом коэффициента яркости (справа)

Fig. 5. Relationship between measured chlorophyll concentrations-а with effective and dominant wavelength (left) and maximum reflectance coefficient (right)

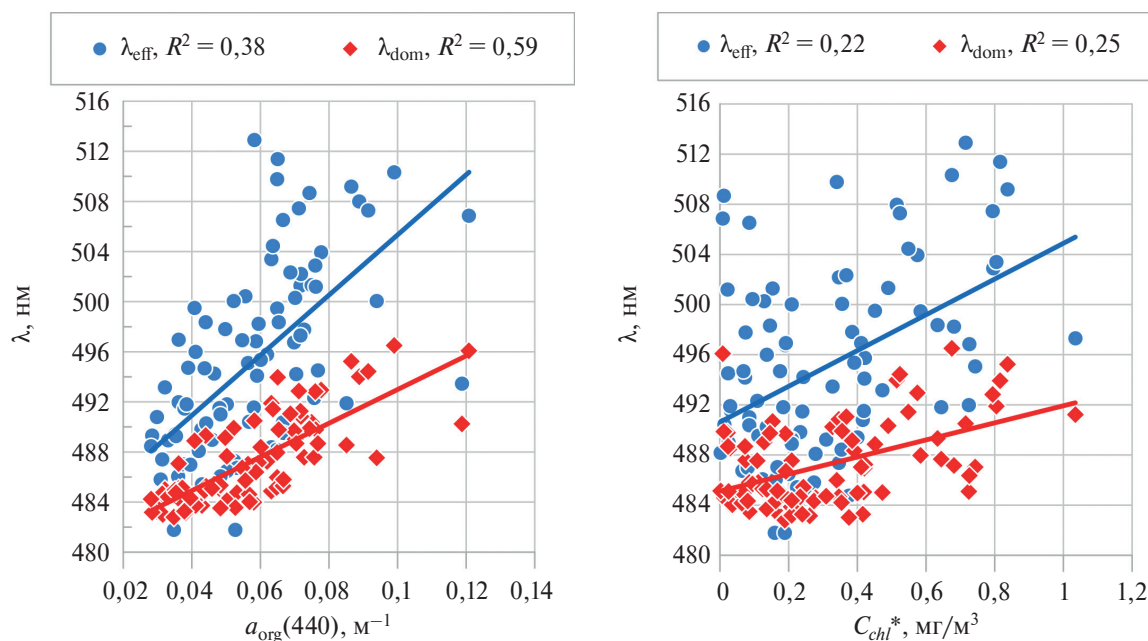


Рис. 6. Связь расчетных значений показателя поглощения РОВ и концентрации хлорофилла-а с эффективной и доминирующей длинами волн СКЯ

Fig. 6. Relationship between the calculated values of the CDOM absorption and the chlorophyll-а concentration with the effective and dominant wavelengths of the Rrs

Связь биооптических параметров вод Черного моря с характеристиками коэффициента яркости весной 2019 года
 Relationships between bio-optical parameters of the Black Sea waters and spectral reflectance coefficient in spring 2019

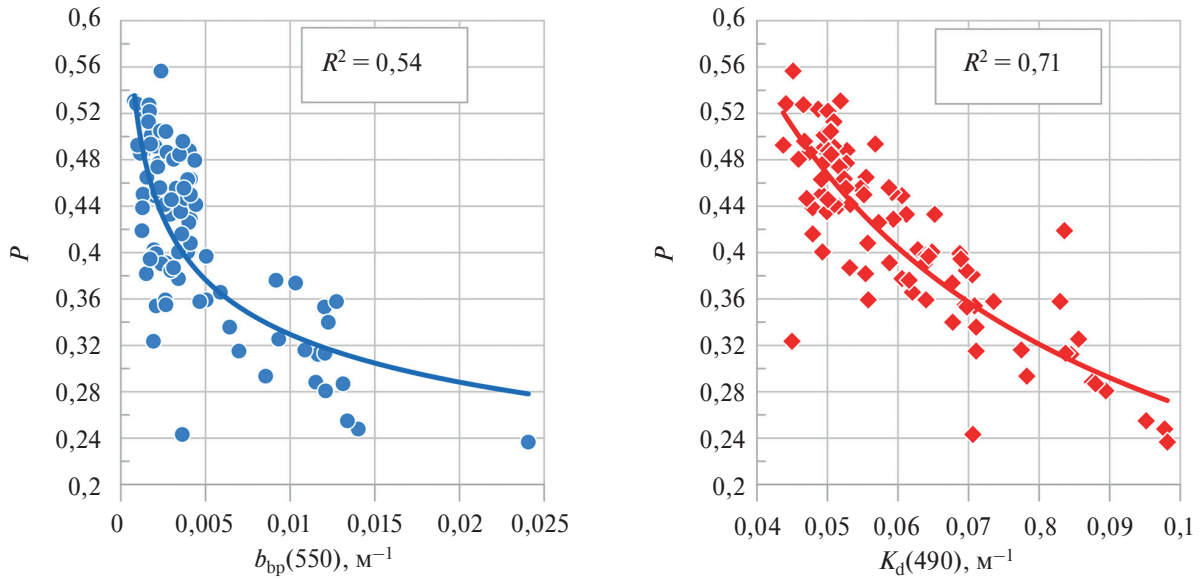


Рис. 7. Связь расчетных значений показателя рассеяния назад взвеси и показателя вертикального ослабления с чистотой цвета СКЯ

Fig. 7. Relationship between the calculated values of the suspension backscattering and the vertical attenuation coefficient with the color purity of the R_{rs}

Пространственное распределение рассчитанных с применением алгоритма величин концентрации хлорофилла- a C_{chl}^* на исследуемом полигоне показано на рис. 8. Биологические определения (в пробах воды) концентрации хлорофилла- a в поверхностном слое моря за время экспедиции выполнены для 22-х станций. Сопоставление этих данных, представленных в отчете [17, рис. 12.4], с пространственной изменчивостью расчетных величин C_{chl}^* (рис. 8), показало их хорошую согласованность.

Полученные значения (C_{chl}^* , mg/m^3) для тех 10-ти станций, на которых имеются данные совместных определений концентрации хлорофилла- a и СКЯ, достаточно хорошо согласуются с биологическими определениями концентрации хлорофилла- a (рис. 9). Средняя относительная ошибка восстановления C_{chl}^* с помощью полуаналитического алгоритма обработки СКЯ составила 25 %.

Можно отметить, что сравнение как расчетных, так и измеренных концентраций хлорофилла- a со спутниковыми продуктами оптических сканеров моря показывает завышение концентраций хлорофилла- a спутниковыми алгоритмами обработки данных (рис. 9), что показано и другими авторами, например [21].

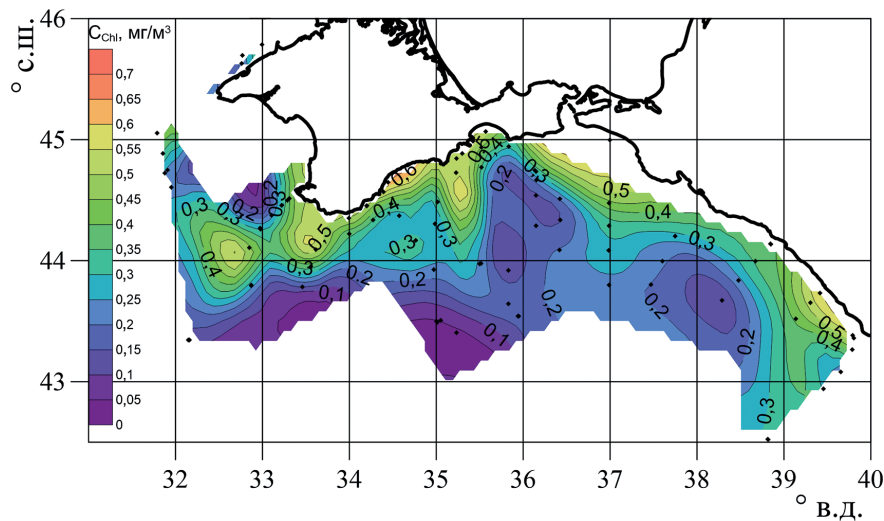


Рис. 8. Пространственное распределение расчетной концентрации хлорофилла- a C_{chl}^*

Fig. 8. Spatial distribution of the calculated concentration of chlorophyll- a C_{chl}^*

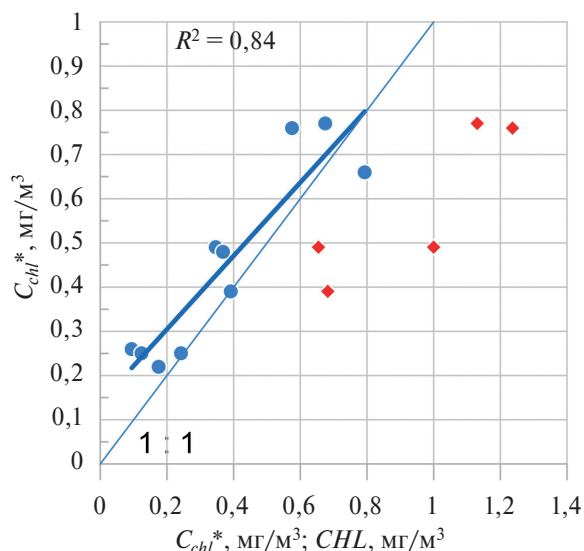


Рис. 9. Сравнение концентрации хлорофилла-а: расчётной (C_{chl}^*) и измеренной (C_{chl}). Тонкой линией показана связь 1:1. Красные ромбы — концентрация хлорофилла-а (CHL) по данным MODIS Aqua/Terra

Fig. 9. Comparison of chlorophyll concentration-a: calculated (C_{chl}^*) and measured (C_{chl}). The thin line shows a relationship 1:1. Red diamonds — chlorophyll concentration-a (CHL) according to MODIS Aqua/Terra

видимости белого диска и доминирующей длиной волны λ_{dom} ($R = 0,66$). Коэффициенты связи $\lambda_{dom} = f(Z_d)$ незначительно отличаются от полученных ранее по измерениям в Черном море.

По данным совместных определений концентрации хлорофилла-а и спектрального коэффициента яркости получены связи концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое C_{chl} с эффективной λ_{eff} ($R = 0,83$) и доминирующей λ_{dom} ($R = 0,97$) длиной волны спектра коэффициента яркости. Проведено сравнение с аналогичной зависимостью $C_{chl} = f(\lambda_{eff})$, установленной ранее по измерениям в Черном, Средиземном морях и Атлантическом океане. Коэффициенты уравнений отличаются практически в 2 раза. Возможно, это обусловлено малым числом совместных измерений в нашем исследовании, а также различиями в биооптических характеристиках исследованных акваторий. Также установлена значимая связь между концентрацией хлорофилла-а в поверхностном слое моря и максимумом спектра коэффициента яркости ($R = 0,93$).

По измеренным СКЯ с использованием полуаналитического алгоритма восстановлены биооптические параметры и получены их корреляционные связи с цветовыми характеристиками СКЯ. Высокая корреляция ($R = 0,84$) наблюдается между показателем вертикального ослабления света и чистотой цвета. Связи биооптических характеристик с доминирующей длиной волны характеризуются более высокой корреляцией, чем с эффективной длиной волны. При этом более тесная связь наблюдается с поглощением РОВ, чем с концентрацией хлорофилла-а.

Расчитанные по данным СКЯ с применением полуаналитического алгоритма концентрации хлорофилла-а C_{chl}^* достаточно хорошо согласуются с биологическими определениями C_{chl} . Сравнение как расчетных C_{chl}^* , так и измеренных концентраций хлорофилла-а C_{chl} со спутниковыми продуктами оптических сканеров моря показывает завышение концентраций хлорофилла-а спутниковыми алгоритмами обработки данных.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0555-2021-0003 «Оперативная океанология» и № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования».

Funding

The work was carried out within the framework of the state task on the topics No. 0555-2021-0003 “Operational Oceanology” and No. 0555-2021-0005 “Coastal Research”.

5. Заключение

В работе представлены натурные данные о значениях спектрального коэффициента яркости в водах Черного моря весной 2019 г. Спектры СКЯ имеют характерную для Черного моря форму с максимумом вблизи 490 нм. Средние значения максимумов СКЯ изменялись от 0,012 до 0,025. В районе г. Сочи наблюдался речной плюм, в котором форма СКЯ отличалась положением максимума на 497 нм.

По спектрам коэффициента яркости рассчитаны характеристики светового поля: эффективная и доминирующая длины волн в спектре излучения моря, чистота цвета воды. Средние значения эффективной длины волны СКЯ составили 493–501 нм. Диапазон изменчивости значений доминирующей длины волны составил 482–496 нм, что соответствует голубому цвету по общепринятой классификации. Расчётные величины чистоты цвета изменялись от 24 до 56%. Низкие значения (более мутные воды) наблюдались в плюме возле г. Сочи, в районе г. Ялта и г. Феодосия, а также в области 33° в.д., 44° с.ш. Высокие значения чистоты цвета получены в районе полигона между 35–37,7° в.д. и 43–44,5° с.ш.

Установлены обратные зависимости между глубиной видимости белого диска Z_d и коэффициентом яркости в максимуме ρ_{max} ($R = 0,82$), а также между глубиной

Литература

1. *Garaba S.P., Friedrichs A., Voß D., Zielinski O.* Classifying Natural Waters with the Forel-Ule Colour Index System: Results, Applications, Correlations and Crowdsourcing // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. Vol. 12. P. 16096–16109. doi:10.3390/ijerph121215044
2. *Woźniak S.B., Darecki M., Sagan S.* Empirical formulas for estimating backscattering and absorption coefficients in complex waters from remote-sensing reflectance spectra and examples of their application // *Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 4043. doi:10.3390/s19184043
3. *Van der Woerd H.J., Wernand M.R.* Hue-angle product for low to medium spatial resolution optical satellite sensors // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, N 2. P. 180. doi:10.3390/rs10020180
4. *Woerd H.J.v.d., Wernand M.R.* True colour classification of natural waters with medium-spectral resolution satellites: SeaWiFS, MODIS, MERIS and OLCI // *Sensors*. 2015. Vol. 15, N 10. P. 25663–25680. doi:10.3390/s151025663
5. *Маньковский В.И.* Цветовые характеристики вод и их корреляции с относительной прозрачностью // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 5. С. 679–682. doi:10.7868/S003015741705001X
6. *Maritorena S., Siegel D.A., Peterson A.R.* Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications // *Applied Optics*. 2002. Vol. 41, N 15. P. 2705–2714. doi:10.1364/ao.41.002705
7. *Morel A., Prieur L.* Analysis of variations in ocean color // *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22. P. 709–722. doi:10.4319/lo.1977.22.4.0709
8. *Ли М.Е., Шибанов Е.Б., Корчёмкина Е.Н., Мартынов О.В.* Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 17–33. doi:10.22449/0233-7584-2015-6-17-33
9. Определение относительной прозрачности и цвета морской воды // *Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях*. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 299–303.
10. *O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Garver S.A., Kahru M., McClain C.R.* Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // *Journal of Geophysical Research*. 1998. Vol. 103. P. 24937–24953. doi:10.1029/98JC02160
11. *Smith R.C., Baker K.S.* Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // *Applied Optics*. 1981. Vol. 20. P. 177–184. doi:10.1364/AO.20.000177
12. *Churilova T., Suslin V., Krivenko O., Efimova T., Moiseeva N., Mukhanov V., Smirnova L.* Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the Black Sea: Seasonality and parametrization // *Frontiers in Marine Science*. 2017. Vol. 4. Art. 90. doi:10.3389/fmars.2017.00090
13. *Оптика океана* / Под ред. Мони́на А.С. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 371 с.; Т. 2. Прикладная оптика океана. М.: Наука, 1983. 236 с.
14. *Churilova T., Moiseeva N., Efimova T., Suslin V., Krivenko O., Zemlianskaia E.* Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in the Crimean coastal waters (the Black Sea) // *Proceedings of SPIE23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Irkutsk, Russia, 30 November 2017 (104664B)*. doi:10.1117/12.2288339
15. *Шифрин К.С.* Глубина видимости белого диска и цвет моря // *Введение в оптику океана*. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 23–30.
16. *Smith T., Guild J.* The C.I.E. colorimetric standards and their use // *Transactions of the Optical Society*. 1931. Vol. 33, N 3. P. 73–134. doi:10.1088/1475-4878/33/3/301
17. Отчет о работах в 106-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (18 апреля — 13 мая 2019 г.). Севастополь: Минобрнауки РФ, ФИЦ ИнБЮМ, ФГБУН ФИЦ МГИ. 2020. С. 110–123.
18. *Ерлов Н.Г.* Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. С. 148–156.
19. *Маньковский В.И., Толкаченко Г.А., Шибанов Е.Б., Мартынов О.В., Корчёмкина Е.Н., Яковлева Д.В., Калинин И.А.* Оптические характеристики прибрежных вод и атмосферы в районе Южного берега Крыма в конце летнего сезона 2008 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 3. С. 52–74.
20. *Урденко В.А., Халтурин В.И., Афонин Е.И.* Эмпирические взаимосвязи между гидрооптическими и биологическими характеристиками и параметрами светового поля // *Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы* / Под ред. В.А. Урденко, Г. Циммермана. Берлин: Ин-т космич. иссл. АН ГДР, 1985. С. 209–250.
21. *Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Ли М.Е., Мончева С., Финенко З.З.* Концентрация хлорофилла-а в Черном море: сравнение спутниковых алгоритмов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 64–72. doi:10.7868/S2073667318030085

References

1. *Garaba S.P., Friedrichs A., Voß D., Zielinski O.* Classifying natural waters with the Forel-Ule colour index system: Results, applications, correlations and crowdsourcing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015, 12(12), 16096–16109. doi:10.3390/ijerph121215044

2. Woźniak S.B., Darecki M., Sagan S. Empirical formulas for estimating backscattering and absorption coefficients in complex waters from remote-sensing reflectance spectra and examples of their application. *Sensors*. 2019, 19(18), 4043. doi:10.3390/s19184043
3. Woerd H.J.v.d., Wernand M.R. Hue-angle product for low to medium spatial resolution optical satellite sensors. *Remote Sensing*. 2018, 10, 180. doi:10.3390/rs10020180
4. Woerd H.J.v.d., Wernand M.R. True colour classification of natural waters with medium-spectral resolution satellites: SeaWiFS, MODIS, MERIS and OLCI. *Sensors*. 2015, 15, 25663–25680. doi:10.3390/s151025663
5. Mankovsky V.I. Color characteristics of waters and their correlation with Secchi depth. *Oceanology*. 2017, 57, 5, 611–614. doi:10.1134/S0001437017050101
6. Maritorenna S., Siegel D.A., Peterson A.R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Applied Optics*. 2002, 41(15), 2705. doi:10.1364/ao.41.002705
7. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*. 1977, 22, 709–722. doi:10.4319/lo.1977.22.4.0709
8. Lee M.E., Shybanov E.B., Korchemkina E.N., Martynov O.V. Determination of the concentration of seawater components based on upwelling radiation spectrum. *Physical Oceanography*. 2015, 6, 15–30. doi:10.22449/1573-160X-2015-6-15-30
9. Determination of the relative transparency and color of seawater. Guide for Hydrological Works in the Oceans and Seas. *Leningrad, Gidrometeoizdat*. 1977, 299–303 (in Russian).
10. O'Reilly J.E., Maritorenna S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Garver S.A., Kahru M., McClain C.R. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*. 1998, 103, 24937–24953. doi:10.1029/98JC02160
11. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm). *Applied Optics*. 1981, 20, 177–184. doi:10.1364/AO.20.000177
12. Churilova T., Suslin V., Krivenko O., Efimova T., Moiseeva N., Mukhanov V., Smirnova L. Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the Black Sea: Seasonality and parametrization. *Frontiers in Marine Science*. 2017, 4, 90. doi:10.3389/fmars.2017.00090
13. Ocean Optics, Vol. 2. Applied Optics of the Ocean / A.S. Monin, Ed. *Moscow, Nauka*, 1983, 208–234 (in Russian).
14. Churilova T., Moiseeva N., Efimova T., Suslin V., Krivenko O., Zemlianskaia E. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in coastal waters of Crimea (the Black Sea). *Proceedings of SPIE23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, Irkutsk, Russia, 30 November 2017 (104664B). doi:10.1117/12.2288339
15. Shifrin K.S. Secchi disk depth and ocean color. Introduction to the Ocean Optics. *Leningrad, Gidrometeoizdat*. 1983, 23–30 (in Russian).
16. Smith T., Guild J. The C.I.E. colorimetric standards and their use. *Transactions of the Optical Society*. 1931, 33 (3), 73–134. doi:10.1088/1475-4878/33/3/301
17. Report on the work in the 106th cruise of the R/V “Professor Vodyanitsky” (April 18 — May 13, 2019). *Sevastopol, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Marine Hydrophysical Institute of RAS*. 2020, 110–123.
18. Jerlov N.G. Marine optics. *Leningrad, Gidrometeoizdat*. 1980, 148–156 (in Russian).
19. Man'kovskii V.I., Tolkachenko G.A., Shibanov E.B., Martynov O.V., Korchemkina E.N., Yakovleva D.V., Kalinskii I.A. Optical characteristics of coastal waters and atmosphere near the south coast of the Crimea at the end of summer 2008. *Physical Oceanography*. 2010, 20, 207–230. doi:10.1007/s11110-010-9079-x
20. Urdenko V.A., Haltrin V.I., Afonin E.I. Empirical relationships between hydro-optical and biological characteristics and parameters of the light field. *Optical Remote Sensing of the Sea and the Influence of the Atmosphere* / V.A. Urdenko, G. Zimmerman Ed. *Berlin, Institute for Space Research Academy of Sciences of GDR*. 1985, 209–250.
21. Suslin V.V., Churilova T. Ya., Lee M., Moncheva S., Finenko Z.Z. Comparison of the Black Sea chlorophyll-a algorithms for SeaWiFS and MODIS instruments. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 64–72. doi:10.7868/S2073667318030085 (In Russian).

Об авторах

КОРЧЁМКИНА Елена Николаевна	Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 05961na22	ORCID ID: 0000-0003-0526-4083, WoS ResearcherID: I-1595–2015, Scopus AuthorID: 23004799100, e-mail: korchemkina@mhi-ras.ru
МАНЬКОВСКАЯ Екатерина Викторовна	Кандидат технических наук, Старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 05961na22	ORCID ID: 0000-0002-4086-1687, WoS ResearcherID: AAB-5303-2019, Scopus Author ID: 57192647961, e-mail: Emankovskaya@mhi-ras.ru