

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

Научная статья

УДК 551.463.5

EDN: HMPHDG

Спектральный коэффициент яркости, цветовые характеристики и относительная прозрачность вод Черного моря весной 2019 и 2021 годов: сравнительная изменчивость и эмпирические связи

Е. Н. Корчемкина , Е. В. Маньковская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 *korchemkina@mhi-ras.ru*

Поступила в редакцию 24.03.2023; одобрена после рецензирования 04.05.2023;
принята к публикации 15.11.2023.

Аннотация

Цель. Цель работы – исследование пространственной изменчивости коэффициента яркости по натурным данным, а также получение эмпирических связей цветовых и биооптических характеристик и сравнение их с литературными данными.

Методы и результаты. Используются данные измерений спектрального коэффициента яркости толщи вод и глубины видимости белого диска, полученные в ходе экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» в северной и северо-восточной частях Черного моря 18 апреля – 13 мая 2019 г. и 22 апреля – 8 мая 2021 г. По спектрам коэффициента яркости рассчитаны цветовые характеристики: доминирующая длина волны, чистота цвета воды, угол цветности, а также первичные оптические характеристики (показатель поглощения растворенным органическим веществом и показатель рассеяния назад частицами взвешенного вещества). Проанализирована изменчивость коэффициента яркости и его цветовых характеристик за аналогичные весенние периоды 2019 и 2021 гг. Для совокупности данных за 2019 и 2021 гг. получены уравнения связи между глубиной видимости белого диска и коэффициентом яркости в максимуме, а также доминирующей длиной волны, проведено их сопоставление с литературными данными. Для расчета первичных оптических характеристик в водах Черного моря впервые получены эмпирические соотношения угла цветности с показателем поглощения растворенным органическим веществом и с показателем рассеяния назад частицами взвешенного вещества.

Выводы. В 2019 г. наблюдалось более типичное для второй половины весны распределение коэффициента яркости, тогда как в 2021 г. наблюдаемое распределение говорит, скорее, о продолжающемся зимне-весеннем развитии фитопланктонных сообществ, что характерно для глубоководной части Черного моря в годы с холодными зимами. Установлены значимые связи между цветовыми характеристиками и биооптическими параметрами. Полученные соотношения могут применяться в составе эмпирических и полуаналитических алгоритмов для комплексной оценки гидрооптических характеристик вод Черного моря, в том числе по данным дистанционного зондирования.

Ключевые слова: спектральный коэффициент яркости, глубина видимости белого диска, доминирующая длина волны, чистота цвета, угол цветности, диаграмма цветности, поглощение растворенным органическим веществом, показатель рассеяния назад взвесью, диск Секки, цвет моря

© Корчемкина Е. Н., Маньковская Е. В., 2024

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по темам № FNNN-2024-0016 и № FNNN-2024-0012, данные получены в 106-м и 116-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий» (Центр коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»).

Для цитирования: Корчемкина Е. Н., Маньковская Е. В. Спектральный коэффициент яркости, цветовые характеристики и относительная прозрачность вод Черного моря весной 2019 и 2021 годов: сравнительная изменчивость и эмпирические связи // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 5–20. EDN HMPHDG.

Original article

Spectral Reflectance Coefficient, Color Characteristics and Relative Transparency of the Black Sea Waters in Spring, 2019 and 2021: Comparative Variability and Empirical Relationships

E. N. Korchemkina , E. V. Mankovskaya

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

 *korchemkina@mhi-ras.ru*

Abstract

Purpose. The work is purposed at studying spatial variability of the sea reflectance coefficient using the field data, as well as at obtaining empirical relationships between the colorimetric and bio-optical characteristics and their comparing with the already published data.

Methods and Results. The measurement data on spectral reflectance coefficient of the water column and the Secchi disk depth obtained in the expeditions of the R/V *Professor Vodyanitsky* in the northern and northeastern parts of the Black Sea in April 18 – May 13, 2019 and April 22 – May 8, 2021 were used. Based on the reflectance spectra, the following color characteristics were calculated: dominant wavelength, water color purity, hue angle, and the inherent optical characteristics (absorption by dissolved organic matter and backscattering by suspended particles). Variability of the sea reflectance coefficient and its color characteristics was analyzed for similar periods in spring, 2019 and 2021. For the combined data for 2019 and 2021, the relationships between the Secchi disk depth and the reflectance coefficient at maximum, as well as the dominant wavelength were obtained and compared to the known data. To calculate the inherent optical characteristics of the Black Sea waters, for the first time the empirical relationships connecting the hue angle with the dissolved organic matter absorption and the backscattering by suspended particles were obtained.

Conclusions. The observed in 2019 distribution of reflectance coefficient is more typical of late spring, whereas the analogous distribution observed in 2021 rather indicates the continuing winter-spring development of phytoplankton communities, that is typical of the deep part of the Black Sea waters in the years with cold winters. Significant correlations between the colorimetric and bio-optical parameters of seawater were established. They can be used as a part of the empirical and semi-analytical algorithms for comprehensive assessing (including application of remote sensing data) the hydrooptical characteristics of the Black Sea waters.

Keywords: spectral reflectance coefficient, Secchi disk depth, dominant wavelength, color purity, hue angle, chromaticity diagram, absorption by dissolved organic matter, particles backscattering, Secchi disk, ocean color

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of state assignment on themes No. FNNN-2024-0016 and No. FNNN-2024-0012, the data were obtained in the 106th and 116th cruises of the R/V *Professor Vodyanitsky* (Center for Collective Use “R/V *Professor Vodyanitsky*” of the Federal State Budgetary Scientific Institution of Federal Research Center “A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS”).

For citation: Korchemkina, E.N. and Mankovskaya, E.V., 2024. Spectral Reflectance Coefficient, Color Characteristics and Relative Transparency of the Black Sea Waters in Spring, 2019 and 2021: Comparative Variability and Empirical Relationships. *Physical Oceanography*, 31(1), pp. 3-17.

Введение

В Морском гидрофизическом институте РАН накоплен и постоянно пополняется массив данных измерений оптических параметров вод моря, таких как спектральный коэффициент яркости толщи вод, показатель ослабления направленного света, глубина видимости белого диска (относительная прозрачность) и др. Анализ этих данных дает хорошую возможность для исследования изменчивости прежде всего спектрального коэффициента яркости – основного параметра, измеряемого как контактными методами, так и дистанционно, а также цветовых характеристик воды и связей с другими биооптическими параметрами.

Разные районы Мирового океана различаются видимым цветом вод, который может меняться от насыщенно синего до почти коричневого. Изменение цвета обусловлено содержанием в воде примесей различного происхождения. Спектр коэффициента яркости и его форма несут в себе информацию о цветовых характеристиках вод.

Первой океанологической характеристикой цвета воды была шкала Фореля – Уле¹ с номерами пробирок различного цвета. Результат использования этой цветовой шкалы может быть в некоторой степени субъективным, так как цвет определяется визуально. Для объективной оценки цвета воды используются параметры, в математической форме представляющие цвет на основе трехкомпонентной теории цветового зрения человека: цветовые координаты и угол цветности, доминирующая длина волны и чистота цвета² [1, 2].

В настоящей работе представлены данные измерений спектрального коэффициента яркости (КЯ) толщи вод и глубины видимости белого диска, полученные в 2019 и 2021 гг. в экспедициях по северной и северо-восточной частям Черного моря. Целью работы является анализ пространственной изменчивости коэффициента яркости по натурным данным, а также получение эмпирических связей цветовых и биооптических характеристик и сравнение их с литературными данными. Работа является в некоторой степени продолжением статьи [3] авторов, поскольку в 2021 г. были получены новые данные контактных оптических измерений в том же районе моря и в тот же период года. Это позволило провести сравнительный анализ изменчивости коэффициента яркости и цветовых характеристик вод Черного моря, а также установить новые эмпирические зависимости и уточнить полученные ранее.

Использование эмпирических формул связи между изучаемыми параметрами является простым способом моделирования в случае, когда физический характер связи не важен. Эмпирические связи между гидрооптическими характеристиками обладают региональным и сезонным характером и при правильном выборе условий и диапазонов изменчивости исследуемых параметров дают удовлетворительный результат. Поскольку цветовые характеристики морской воды просты в определении, связи между ними и биооптическими параметрами применяются давно³. Они применяются в составе эмпирических

¹ Ерлов Н. Г. Оптика моря. Ленинград : Гидрометеиздат, 1980. С. 181–191.

² Шифрин К. С. Глубина видимости белого диска и цвет моря // Введение в оптику океана. Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. С. 23–30.

³ Маньковский В. И., Соловьев М. В., Маньковская Е. В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2009. С. 40–41.

и полуаналитических алгоритмов [4] для комплексной оценки гидрооптических характеристик морской воды. С учетом определенных поправок [5] цветовые характеристики могут вычисляться по спутниковым измерениям, что расширяет их область применения.

Материалы и методы

В настоящей работе рассматриваются данные измерений спектрального коэффициента яркости (КЯ) толщи вод и глубины видимости белого диска, полученные в ходе экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» весной 2019 и 2021 гг. по Черному морю. Съемка выполнена в северной и северо-восточной частях Черного моря (42,5° – 45,8° с. ш.; 31,5° – 39,8° в. д.) 18.04.2019–13.05.2019 (106-й рейс) и 22.04.2021–08.05.2021 (116-й рейс). Измерения спектрального коэффициента яркости проводились с борта судна спектрофотометром, разработанным в отделе оптики и биофизики моря Морского гидрофизического института РАН [6]. Глубина видимости белого диска (относительная прозрачность) определялась по стандартной методике ⁴.

По измеренным спектрам коэффициента яркости рассчитаны следующие цветовые характеристики: доминирующая длина волны в спектре излучения моря, чистота цвета воды, угол цветности.

Количественной оценкой цвета воды является доминирующая длина волны λ_{dom} в спектре излучения моря ². Она основана на колориметрической системе X, Y, Z (рис. 1), в которой координаты цветности x, y, z рассчитываются по формулам

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

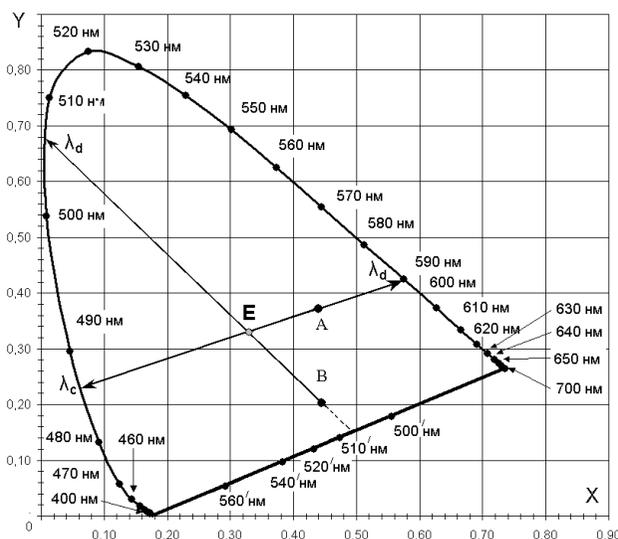
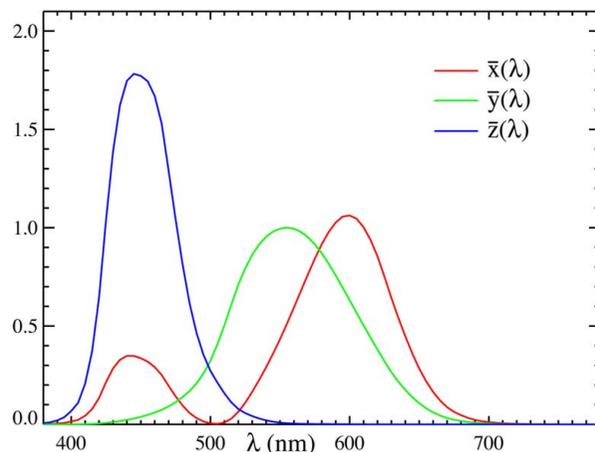
$$Y = \int_{400}^{700} R_{rs}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda; \quad y = Y/(X + Y + Z);$$

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

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).

Чистота цвета воды P представляет собой пропорцию (в процентах), в которой необходимо смешать монохроматическое излучение (доминирующая длина волны) с белым излучением, чтобы получить видимый цвет моря. Чистота цвета воды связана с ее прозрачностью: высокопрозрачные воды характеризуются высокой чистотой цвета, в мутных водах чистота цвета низкая [3]. Величина P определяется отношением двух коллинеарных расстояний $P = E\lambda d/EA$ (рис. 1, *снизу*).

⁴ Определение относительной прозрачности и цвета морской воды // Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. С. 299–303.



Р и с. 1. Функции спектральной чувствительности для стандартного наблюдателя согласно CIE 1931⁵ [1] (сверху); цветовой треугольник в координатах x, y ⁶ (снизу): 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 CIE 1931⁵ [1] (top); color triangle in x, y coordinates⁶ (bottom): point E is the white color; points A and B are some arbitrary colors; λ_d is the position of dominant wavelength

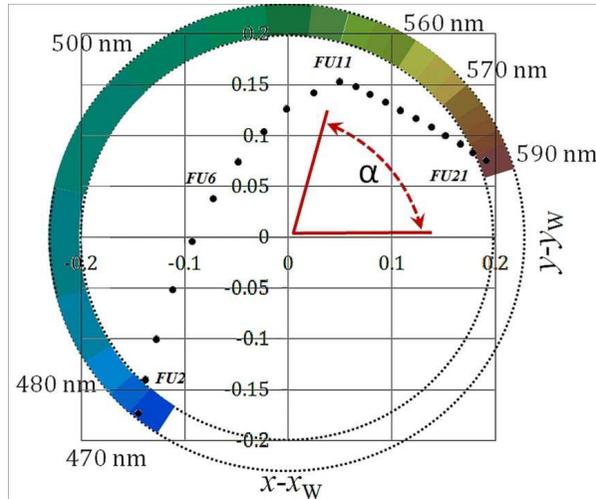
Для любой заданной точки (x, y) на диаграмме цветности значение угла цветности α определяется как значение угла (в градусах) между отрезком, соединяющим «белую точку» с заданной точкой (x, y) , и осью X [2]. То есть угол цветности α (в градусах) определяется выражением

$$\alpha = (180/\pi)(\arctg((y - y_w)/(x - x_w))) \bmod 2\pi,$$

⁵ URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/87/CIE1931_XYZCMF.png (дата обращения: 23.01.2023).

⁶ Ларионова Е. В. Физические основы цвета. СПб., 2013. С. 113.
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 1 2024

где $x_w = y_w = 1/3$ – координаты точки белого цвета на диаграмме цветности (рис. 1, *снизу*). Сине-зеленому и синему цвету соответствуют углы цветности, превышающие 180° . Со смещением доминирующей длины волны в длинно-волновую область угол цветности уменьшается (рис. 2).



Р и с. 2. Диаграмма цветности, показывающая соответствие угла оттенка цвета α точке белого цвета (x_w, y_w) шкалы цветов *FU* (Фореля – Уле). Доминирующая длина волны конкретного сегмента указана в нанометрах [2, с. 25667]

F i g. 2. Chromaticity diagram showing the correspondence of colour hue angle α to the white point (x_w, y_w) of the *FU* scale of colours. The dominant wavelength of the specific segment is indicated in nm [2, p. 25667]

В работе рассчитываются показатели поглощения растворенным органическим веществом и рассеяния назад частицами взвешенного вещества с использованием полуаналитического алгоритма [6], в котором спектр коэффициента яркости имеет вид

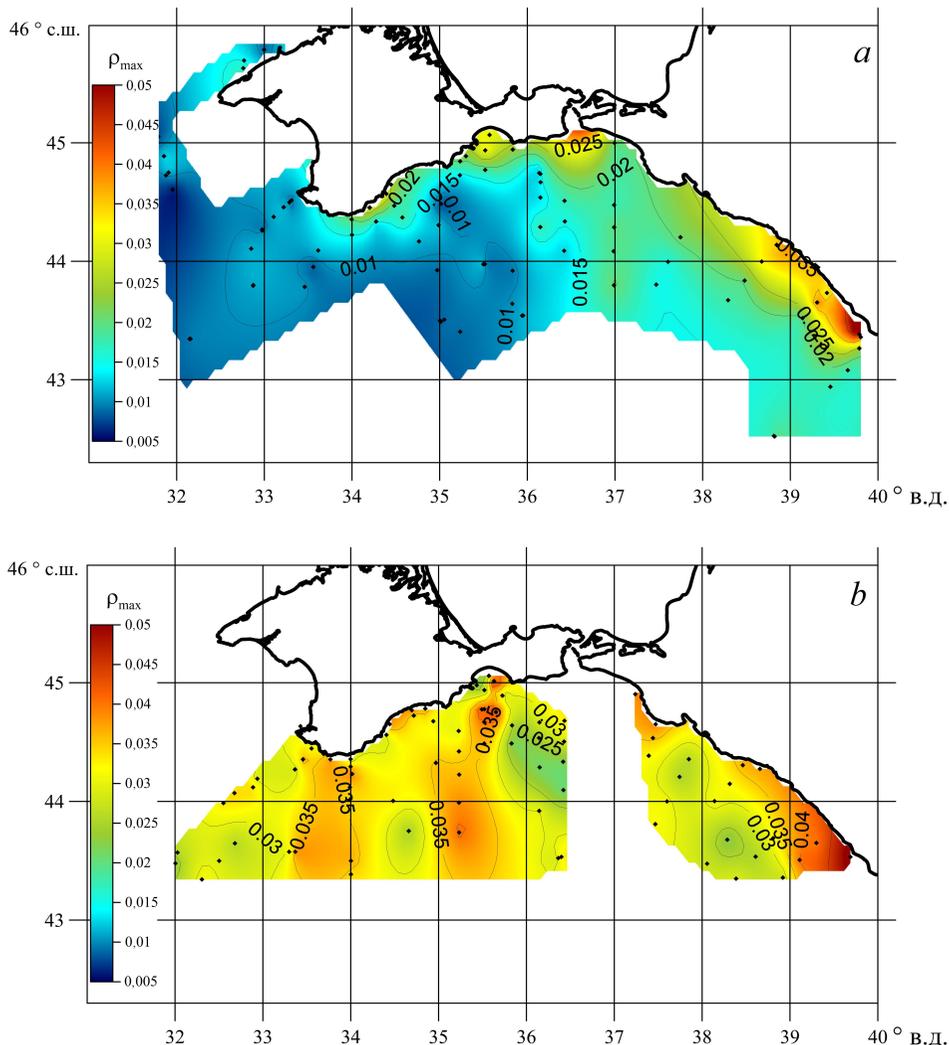
$$R_{rs}(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550)(550/\lambda)^\nu}{a_w(\lambda) + C_{ph} a_{ph}^*(\lambda) + a_{org}(440)e^{-S(\lambda-440)}}$$

где $k = 0,15$; $b_{bw}(\lambda)$ – показатель рассеяния назад чистой водой [7]; $a_w(\lambda)$ – показатель поглощения чистой водой [8]; $a^*(\lambda_{ph})$ – спектр удельного поглощения пигментами фитопланктона (нормированный на концентрацию хлорофилла a) [9]; $\nu = 1$ – спектральный наклон рассеяния назад, зависящий от размера частиц⁷; $S = 0,018$ – спектральный наклон показателя поглощения света растворенным органическим веществом [10]; $b_{bp}(550)$ – показатель рассеяния назад частицами взвеси на длине волны 550 нм; C_{ph} – концентрация пигментов фитопланктона и $a_{org}(440)$ – показатель поглощения растворенным органическим веществом на длине волны 440 нм.

⁷ Оптика океана : [В 2-х т.] / [Отв. ред. А. С. Мони́н]. Москва : Наука, 1983.

Сравнительная изменчивость коэффициента яркости и цветовых характеристик

Оптические экспедиционные измерения выполнены за аналогичные весенние периоды 2019 и 2021 гг., что позволяет провести анализ изменчивости коэффициента яркости и цветовых характеристик вод моря.



Р и с. 3. Распределение спектральных максимумов коэффициента яркости: *a* – в 2019 г.; *b* – в 2021 г. Черными точками показаны станции измерения спектров коэффициента яркости
F i g. 3. Distribution of the reflectance coefficient spectral maxima: *a* – in 2019; *b* – in 2021. Black dots show the stations where reflectance measurements were made

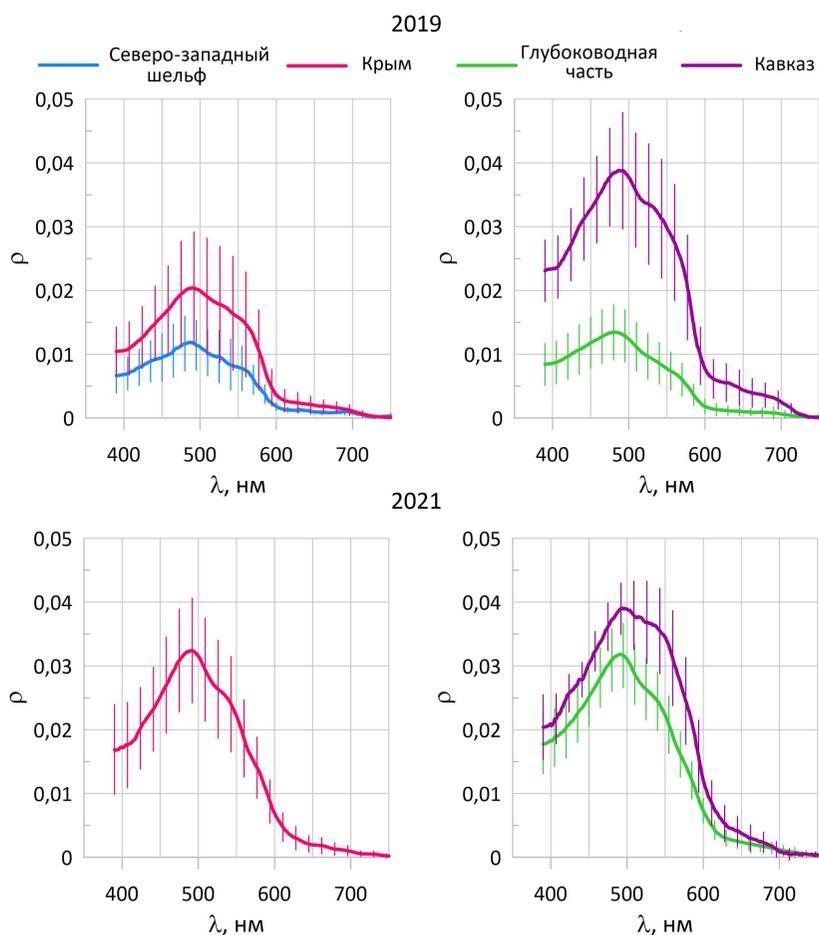
В 2019 г. спектры коэффициента яркости водной толщи были получены на 89 станциях, в 2021 г. – на 68. Распределение максимумов коэффициента яркости вод по данным экспедиций показано на рис. 3. Для дальнейшего анализа в исследуемой области было выделено четыре района:

- 1) северо-западный шельф (только в 2019 г.),

- 2) прибрежная зона Крыма с глубинами до 200 м,
- 3) прибрежная зона Кавказа с глубинами до 1000 м,
- 4) центральная глубоководная часть.

Следует отметить, что разделение на районы выполнено иначе, чем в статье [3]. У Кавказского побережья шельфовая зона с глубинами до 200 м простирается на 5–6 км от берега, причем речные плюмы распространяются дальше ее. Поэтому как границу прибрежной зоны выбрали изобату 1000 м, располагающуюся в среднем на расстоянии 15 км от берега. В предыдущей статье выделялась «восточная часть» (область восточнее 37° в. д.). В настоящей работе часть этой области вошла в «центральную глубоководную часть».

Средние спектры коэффициента яркости для выделенных районов представлены на рис. 4. Осредненные по набору станций соответствующего района измеренные и расчетные оптические характеристики вод моря приведены в таблице.



Р и с. 4. Средние по районам спектры КЯ и их среднеквадратическое отклонение (показано штриховкой) по данным измерений в 2019 и 2021 гг.

F i g. 4. *Rrs* spectra averaged over the regions and their standard deviation (shown by shading) based on the measurement data obtained in 2019 and 2021

Глубина видимости белого диска (Z_d , м), КЯ и его характеристики
Secchi disk depth (Z_d , m), Rrs and its characteristics

Район / Region	Z_d , м / Z_d , m	ρ_{\max}	λ_{\max} , нм / λ_{\max} , nm	λ_{dom} , нм / λ_{dom} , nm	P , %	α , °
<i>2019</i>						
Северо-западный шельф / Northwestern shelf	12 ± 3	0,012 ± 0,004	485 ± 9	489 ± 2	38 ± 3	192 ± 7
Прибрежная зона Крыма / Coastal zone of Crimea	8 ± 3	0,021 ± 0,009	491 ± 6	491 ± 4	35 ± 7	192 ± 16
Центральная глубоководная часть / Central deep-sea part	13 ± 4	0,014 ± 0,004	482 ± 7	485 ± 2	45 ± 6	203 ± 9
Прибрежная зона Кавказа / Coastal zone of the Caucasus	6 ± 2	0,039 ± 0,009	486 ± 6	489 ± 3	35 ± 7	185 ± 10
<i>2021</i>						
Прибрежная зона Крыма / Coastal zone of Crimea	8 ± 2	0,032 ± 0,008	492 ± 5	490 ± 2	36 ± 6	187 ± 7
Центральная глубоководная часть / Central deep-sea part	7 ± 1	0,032 ± 0,005	491 ± 6	490 ± 2	36 ± 4	187 ± 8
Прибрежная зона Кавказа / Coastal zone of the Caucasus	4 ± 1	0,040 ± 0,005	503 ± 12	495 ± 6	26 ± 7	155 ± 20

Пр и м е ч а н и е: ρ_{\max} – спектральный максимум КЯ; λ_{\max} – соответствующая ему длина волны (нм); λ_{dom} – доминирующая длины волн (нм); P – чистота цвета (%); α – угол цветности (°). Приведены средние по районам значения ± среднеквадратические отклонения по всему ансамблю измерений.

Н о т е: ρ_{\max} is the Rrs spectral maximum; λ_{\max} is the corresponding wavelength (nm); λ_{dom} is the dominant wavelength (nm); P is color purity (%); α is the hue angle (°). The region-averaged values are given, ± standard deviations over the whole ensemble of measurements.

КЯ в 2019 г. изменяется значительно: от 0,005...0,01 (в спектральном максимуме) в районе северо-западного шельфа и в центральной глубоководной части до 0,03...0,05 в прибрежных зонах Крыма и Кавказа (рис. 4). Форма всех спектров КЯ является характерной для вод Черного моря. Небольшие различия наблюдаются в расположении максимума КЯ. Он находится в окрестности 480 нм в центральной глубоководной части и на северо-западном шельфе и в окрестности 490 нм в прибрежной зоне Крыма. Форма спектра КЯ отличается для вод в районе Сочи, где был зафиксирован плом из-за стока реки Мзымты. Здесь максимум спектра КЯ смещен в сторону длинных волн до 497 нм.

В 2021 г. значения КЯ изменялись незначительно во всей области исследования. Различие между глубоководной и прибрежными частями как по форме спектров, так и по величинам КЯ практически отсутствовало. Исключение составили значения КЯ в районе Феодосийского залива. Разброс максимальных значений наблюдался от 0,05 в заливе до 0,02 на шельфе за пределами залива. Вдоль Кавказского побережья также зафиксированы наибольшие

значения КЯ, обусловленные речным стоком – известным источником поступления взвешенных веществ. В целом значения КЯ в 2021 г. были выше, чем в 2019 г.

Наблюдения за глубиной видимости белого диска Z_d выполнены для 69 станций в 2019 г. и для 48 станций в 2021 г. В 2019 г. наблюдающийся разброс значений составил от 4 м в плюме возле Кавказского побережья до 23 м в глубоководной части Черного моря. В 2021 г. разброс составил от 5 до 12 м как в глубоководной части моря, так и в прибрежной зоне Крыма, что соответствует наблюдающейся низкой изменчивости КЯ.

По данным всех измерений спектров коэффициента яркости, диапазон изменчивости значений доминирующей длины волны в 2019 г. составил 482–496 нм. Согласно диаграмме цветности (см. рис. 2), в диапазоне длин волн 480–490 нм цвет характеризуется как голубой, в диапазоне 490–500 нм – голубовато-зеленый. Смещение цвета в сторону длинных волн оценочно соответствует повышению содержания органических веществ в воде.

Расчетные значения чистоты цвета в 2019 г. изменялись от 24 до 56 %. Низкие значения, т. е. более мутные воды, наблюдались в плюме возле Сочи, в районе Ялты и Феодосии, а также в области 33° в. д., 44° с. ш. На данных станциях, по визуальным оценкам, воды имели более зеленоватый оттенок, чем воды остальной части полигона. Высокие значения чистоты цвета получены для восточной части глубоководной области.

В 2021 г. диапазон изменчивости значений доминирующей длины волны составил 486–509 нм. Воды с зеленоватым оттенком наблюдались в прибрежной зоне у Кавказского побережья, в которой также зарегистрированы низкие значения чистоты цвета ($P = 13\%$). Высокие значения (до 47 %), как и в 2019 г., отмечены в глубоководной части.

Анализ метеорологических данных показал, что погодные условия в 2019 г. были более теплые (температура воздуха в среднем выше на $\sim 2^\circ\text{C}$ и более 0°C в январе – марте) и отличались меньшим количеством осадков, чем в 2021 г. Различие в климатических условиях отразилось на особенностях формирования полей гидрооптических характеристик. Несмотря на одинаковые календарные периоды проведения оптических измерений, картина распределения КЯ различается. В 2019 г. наблюдалось более типичное для весеннего периода распределение КЯ, тогда как в 2021 г. наблюдаемое распределение было более характерно для местной климатической зимы. Данная ситуация подтверждается распределениями концентрации хлорофилла a и общего взвешенного вещества, полученными в результате экспедиционных измерений. По данным биологических определений, концентрация хлорофилла a была в среднем в 2–4 раза выше в 2021 г., что говорит о продолжающемся зимне-весеннем развитии фитопланктонных сообществ. Такая особенность сезонной динамики фитопланктона присуща открытым водам Черного моря и наблюдается обычно с января по март [11, 12]. При этом в годы с холодными зимами величина биомассы и продолжительность развития фитопланктона выше, чем в годы с теплыми зимами [11].

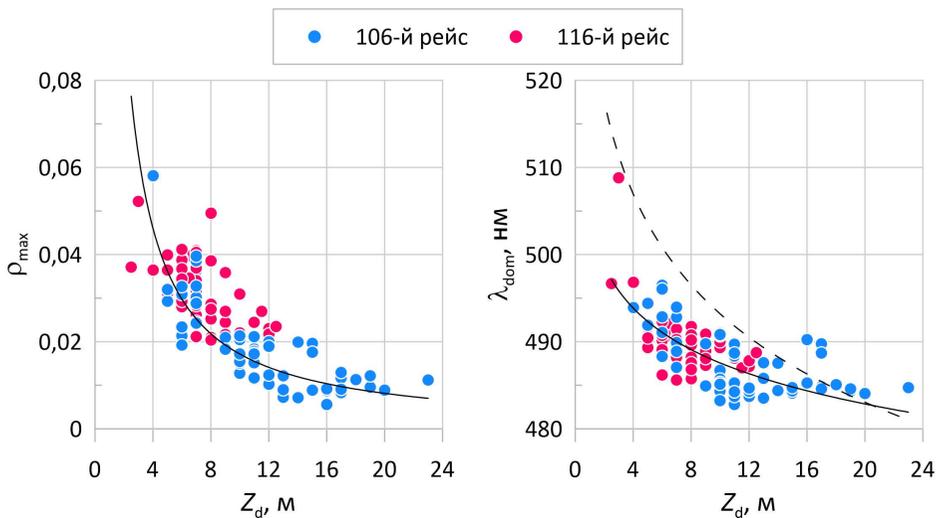
Эмпирические связи цветовых характеристик коэффициента яркости

Ранее в нашей работе [3] были получены эмпирические соотношения для глубины видимости белого диска, спектрального максимума КЯ и доминирующей длины волны. Полученные в 2021 г. новые натурные данные позволяют уточнить указанные взаимосвязи, поскольку измерения выполнены тем же прибором по той же методике в аналогичных районах и в одинаковые периоды года.

Для всей совокупности данных за 2019 и 2021 гг. уравнения связи между глубиной видимости белого диска Z_d и значениями коэффициента яркости в максимуме ρ_{\max} и доминирующей длиной волны λ_{dom} имеют вид (рис. 5)

$$\ln \rho_{\max} = -1,08 \ln Z_d - 1,59; R = 0,82,$$

$$\ln \lambda_{\text{dom}} = -0,014 \ln Z_d + 6,22; R = 0,73.$$



Р и с. 5. Связь глубины видимости белого диска со спектральным максимумом коэффициента яркости (слева) и доминирующей длиной волны (справа). Сплошная линия – по данным контактных измерений 2019 и 2021 гг., штриховая линия – по формуле связи из работы [13]

Fig. 5. Relationship between the Secchi disk depth and the reflectance coefficient spectral maximum (left) as well as the dominant wavelength (right). Solid line is the approximation of contact measurements in 2019 and 2021, dashed line is the relation equation from [13]

В работе [13] по измерениям в водах Тропической Атлантики получена формула связи $\lambda_{\text{dom}} = f(Z_d)$ для значений Z_d в диапазоне 10–41 м:

$$\ln \lambda_{\text{dom}} = -0,032 \ln Z_d + 6,27; R = 0,99.$$

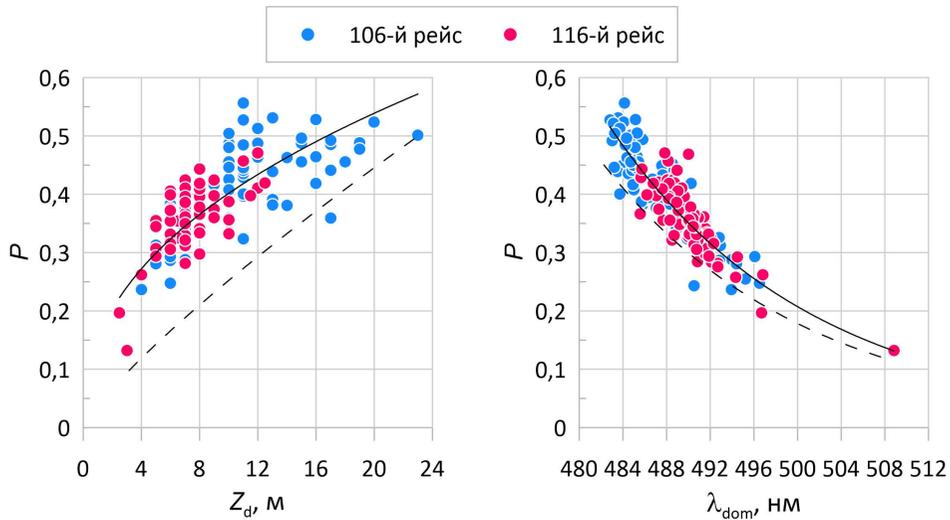
Соответствующая связь показана штриховой линией на рис. 5, справа. Эту формулу в работе [13] рекомендовано использовать при оценке λ_{dom} в различных водах для значений Z_d в пределах 5–41 м. Однако, по рассматриваемым данным контактных измерений 2019 и 2021 гг., существует различие между эмпирическими соотношениями, предлагаемыми в [13] и полученными нами. Расхождение кривых объясняется разной концентрацией во взвеси мелких частиц (радиусы менее 1 мкм) в Черном море и в тропических водах Атлантического океана. Согласно работе [14], чем выше концентрация мелкой взвеси,

тем, при равных условиях освещения моря и показателя ослабления света водой, меньше глубина видимости белого диска. По данным справочника³ и работы [15], концентрация мелких частиц в Черном море в 5–6 раз выше, чем в тропических водах Атлантического океана, соответственно значения Z_d ниже.

Пересечение кривых $\lambda_{dom} = f(Z_d)$ при $Z_d = 20$ м (рис. 5, *справа*) можно объяснить следующим образом. Концентрация мелкой взвеси в море уменьшается от прибрежных районов, где она максимальна, к центральным районам вследствие постепенного выпадения мелкой взвеси в осадок. В районах с $Z_d = 20$ м концентрация мелкой взвеси была такой же, как и в водах Тропической Атлантики.

Между значениями глубины видимости белого диска Z_d и чистотой цвета P наблюдается прямая корреляционная зависимость (рис. 6, *слева*):

$$\ln P = 0,42 \ln Z_d - 1,89; R = 0,79.$$



Р и с. 6. Связь чистоты цвета с глубиной видимости белого диска (*слева*) и доминирующей длиной волны (*справа*). Сплошная линия – по данным контактных измерений 2019 и 2021 гг., штриховая линия – по формуле связи из работы [13]

F i g. 6. Relationship between the color purity and the Secchi disk depth (*left*) as well as the dominant wavelength (*right*). Solid line is the approximation of contact measurements in 2019 and 2021, dashed line is the relation equation from [13]

Обратная зависимость наблюдается между чистотой цвета P и доминирующей длиной волны λ_{dom} (рис. 6, *справа*). Соответствующее уравнение связи:

$$\ln P = 0,04 - 26,02 \ln \left(\frac{\lambda_d}{531} \right); R = 0,91.$$

В работе [13] связь чистоты цвета воды с относительной прозрачностью $P = f(Z_d)$, по измерениям спектров яркости вод в Тропической Атлантике ($Z_d = 10 \dots 41$ м) и в Черном море ($Z_d = 3 \dots 16$ м), выражается формулой

$$\ln P = 0,82 \ln Z_d + 1,34; R = 0,98,$$

а связь чистоты цвета с доминирующей длиной волны формулой

$$\ln P = 1,34 - 25,63 \ln(\lambda_d/531).$$

Для вод Атлантического океана при значениях глубины видимости белого диска Z_d , превышающих 10 м, соответствующая часть линии взаимосвязи $P = f(Z_d)$ из [13], показанной штриховой линией (рис. 6, *слева*), приближается к зависимости, полученной в нашем исследовании. В диапазоне значений глубины видимости белого диска Z_d 3–23 м, наблюдающихся по данным измерений в 2019 и 2021 гг., линия связи из работы [13] лежит ниже полученной нами. Различие обусловлено тем, что формула связи в [13] получена в основном по данным измерений КЯ в Атлантическом океане, а для вод Черного моря использовано менее десяти значений из работы [16, с. 66]. Это объясняется также разным соотношением содержания в воде взвешенных крупных органических частиц и мелких частиц в основном минерального происхождения. Так, при одинаковой глубине видимости белого диска Z_d значения чистоты цвета могут различаться, и наоборот. Например, в нашем исследовании чистота цвета воды изменялась от $P = 13\%$ при $Z_d = 3$ м до $P = 50\%$ при $Z_d = 23$ м. Наблюдались ситуации, когда значения чистоты цвета были немного выше (55%), но при этом относительная прозрачность была меньше ($Z_d = 10...13$ м).

На графике рис. 6, *слева* хорошо видно различие между расположением наборов точек для двух экспедиций. В 2021 г. (красные точки) концентрация органических частиц взвеси выше, чем в 2019 г. (синие точки), из-за продолжающегося зимне-весеннего развития фитопланктона, что отражается в значениях чистоты цвета – они ниже. При наличии данных о составе и численности фитопланктонного сообщества данный вид связи $P = f(Z_d)$, предположительно, можно использовать для оценки биооптического состояния вод Черного моря.

В Черном море цвет морской воды определяется главным образом растворенным и взвешенным органическим веществом, увеличение поглощения света органикой в коротковолновом участке спектра приводит к смещению максимума КЯ и, вследствие этого, доминирующей длины волны в сторону длинных волн. Угол цветности является некоторой функцией доминирующей длины волны и, следовательно, связан с поглощением органическим веществом.

В работе [17] получена зависимость между показателем поглощения растворенным органическим веществом α_{org} и углом цветности α . Она представляет собой полином 3-й степени:

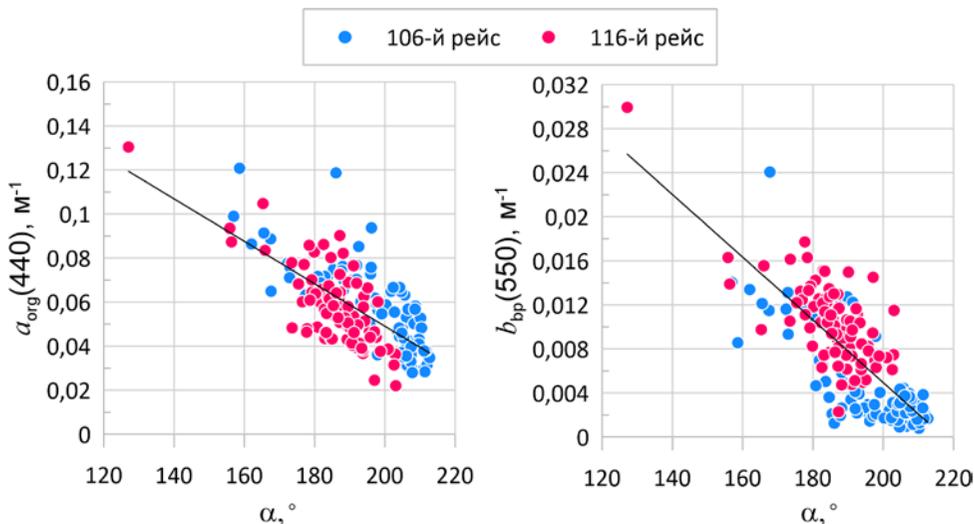
$$\log(\alpha_{\text{org}}(440)) = -7,406 \cdot 10^{-7} \alpha^3 + 2,999 \cdot 10^{-4} \alpha^2 - 0,04493 \alpha + 1,984; R = 0,96.$$

Уравнение получено для различных вод Мирового океана для широкого диапазона изменчивости угла цветности от 50° до 225° . Оно может использоваться и для вод типа 2 (в соответствии с классификацией А. Мореля и Л. Приера [18]) с большим содержанием растворенных органических веществ и взвешенных веществ. Значение угла цветности определяется по дистанционно измеренному коэффициенту яркости моря R_{rs} .

Натурные данные в нашем исследовании имеют гораздо меньший разброс значений угла цветности от 150° до 215° (исключение – одна точка, где угол

цветности равен 127°). Поэтому корреляция величин α_{org} и α менее значима, а аппроксимация их зависимости полиномом, как в работе [18], не существенно отличается от линейной (рис. 7, *слева*) и имеет вид

$$\alpha_{\text{org}}(440) = -0,001\alpha + 0,243; R = 0,70.$$



Р и с. 7. Связь угла цветности с показателями поглощения растворенным органическим веществом (*слева*) и рассеяния назад частицами взвешенного вещества (*справа*)

F i g. 7. Relationship between the chromaticity angle and the absorption by dissolved organic matter (*left*) as well as the suspended particles backscattering (*right*)

Между рассеянием назад частицами взвешенного вещества и углом цветности также наблюдается корреляция. Ее можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, взвешенное органическое вещество не только поглощает, но и рассеивает свет, то есть воды, богатые органикой, будут иметь больший показатель рассеяния назад взвесью. Кроме того, прибрежные воды могут содержать повышенное количество растворенного органического вещества и минеральной взвеси, что обусловлено стоками с суши.

Аппроксимация связи рассеяния назад частицами взвешенного вещества b_{bp} и угла цветности α в водах Черного моря также представляется в виде линейной зависимости (рис. 7, *справа*)

$$b_{\text{bp}}(550) = -2,8 \cdot 10^{-4}\alpha + 0,062; R = 0,77.$$

Данные эмпирические соотношения могут быть использованы для расчета первичных оптических величин в водах Черного моря: показателя поглощения растворенным органическим веществом и показателя рассеяния назад частицами взвешенного вещества. Значения угла цветности, в свою очередь, могут быть рассчитаны по оптическим данным дистанционного зондирования моря, если отсутствуют данные контактных измерений спектрального коэффициента яркости.

Заключение

Рассмотрены данные измерений спектрального коэффициента яркости толщи вод и глубины видимости белого диска, полученные в ходе экспедиций в северной и северо-восточной частях Черного моря 18.04.2019–13.05.2019 и 22.04.2021–08.05.2021. Анализ изменчивости коэффициента яркости и его цветовых характеристик за аналогичные весенние периоды 2019 и 2021 гг. показал следующее. Все спектры КЯ имеют сходную, характерную для вод Черного моря форму. В 2019 г. наблюдается высокая изменчивость КЯ. Самые низкие значения зафиксированы на северо-западном шельфе и в центральной глубоководной части полигона. Повышенные значения наблюдались в прибрежных зонах Крыма и Кавказа. В 2021 г. в исследуемой области изменчивость КЯ сравнительно низкая. Различие между глубоководной и прибрежной частями по значениям практически отсутствовало. В целом значения КЯ и его цветовых характеристик в 2021 г. выше, чем в 2019 г. Значения цветовых характеристик вод моря соответствуют в основном голубовато-зеленому цвету на диаграмме цветности.

Предшествующие погодные условия в 2019 г. были более теплыми и отличались меньшим количеством осадков, чем в 2021 г. В 2019 г. наблюдалось более типичное для второй половины весны распределение КЯ, тогда как в 2021 г. наблюдаемое распределение говорит, скорее, о продолжающемся зимне-весеннем развитии фитопланктонных сообществ, что характерно для глубоководной части Черного моря в годы с холодными зимами.

Установлены значимые эмпирические зависимости между глубиной видимости белого диска и спектральным максимумом коэффициента яркости, доминирующей длиной волны и чистотой цвета. Тесная корреляция наблюдается между чистотой цвета и доминирующей длиной волны. Полученные эмпирические связи позволяют классифицировать спектры КЯ и упростить такие подходы, как, например, кластерный анализ.

Для расчета первичных оптических величин в водах Черного моря впервые получены эмпирические соотношения угла цветности с показателем поглощения растворенным органическим веществом и с показателем рассеяния назад частицами взвешенного вещества. Значения угла цветности могут быть рассчитаны по данным дистанционного зондирования коэффициента яркости моря, если отсутствуют данные его контактных измерений. В дальнейшем планируется выполнить расчеты угла цветности по спутниковым данным с использованием регионального алгоритма атмосферной коррекции для Черного моря и провести сопоставление со значениями угла цветности, полученными в этой работе по данным контактных измерений спектрального КЯ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith T., Guild J.* The C.I.E. colorimetric standards and their use // Transactions of the Optical Society. 1931. Vol. 33, iss. 3. P. 73–134. doi:10.1088/1475-4878/33/3/301
2. *Van der Woerd H. J., Wernand M. R.* True colour classification of natural waters with medium-spectral resolution satellites: SeaWiFS, MODIS, MERIS and OLCI // Sensors. 2015. Vol. 15, iss. 10. P. 25663–25680. doi:10.3390/s151025663
3. *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. EDN EWNWZM. doi:10.48612/fpg/47v1-8k56-g93n

4. Classifying natural waters with the Forel-Ule colour index system: Results, applications, correlations and crowdsourcing / S. P. Garaba [et al.] // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. Vol. 12, iss. 12. P. 16096–16109. doi:10.3390/ijerph121215044
5. *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, iss. 2. P. 180. doi:10.3390/rs10020180
6. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения / М. Е. Ли [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 17–33. EDN VHEWVT.
7. *Morel A.* Optical properties of pure water and pure sea water // *Optical Aspects of Oceanography* / Edited by N. G. Jerlov, E. S. Nielson. New York : Academic Press, 1974. P. 1–24.
8. *Smith R. C., Baker K. S.* Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // *Applied Optics*. 1981. Vol. 20, iss. 2. P. 177–184. <https://doi.org/10.1364/AO.20.000177>
9. Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the Black Sea: Seasonality and parametrization / T. Churilova [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2017. Vol. 4. 90. doi:10.3389/fmars.2017.00090
10. Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in coastal waters of Crimea (the Black Sea) / T. Churilova [et al.] // *Proceedings of SPIE. Irkutsk : SPIE*, 2017. Vol. 10466 : 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 104664B. doi:10.1117/12.2288339
11. Phenology and drivers of the winter–spring phytoplankton bloom in the open Black Sea: The application of Sverdrup’s hypothesis and its refinements / A. S. Mikaelyan [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2017. Vol. 151. P. 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.12.006>
12. *Финенко З. З., Мансурова И. М., Суслин В. В.* Временная динамика биомассы фитопланктона в поверхностном слое Черного моря по данным спутниковых наблюдений // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 3. С. 416–427. EDN NEKDHS. doi:10.31857/S0030157422030042
13. *Маньковский В. И.* Цветовые характеристики вод и их корреляции с относительной прозрачностью // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 5. С. 679–682. EDN ZMDPIL. doi:10.7868/S003015741705001X
14. *Маньковский В. И.* Влияние состава взвеси на глубину видимости белого диска // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32, № 1. С. 24–28. EDN YTYPTV. doi:10.15372/AOO20190104
15. *Маньковский В. И., Гринченко Д. В.* Взвешенное вещество и его состав по данным о рассеянии света на макрополигоне в северной части тропической зоны Атлантического океана // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 3. С. 254–266. EDN SJYVPR. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-254-266
16. Оптические характеристики прибрежных вод и атмосферы в районе Южного берега Крыма в конце летнего сезона 2008 года / В. И. Маньковский [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 3. С. 52–74. EDN TMJWNT.
17. *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, iss. 18. P. 4043. doi:10.3390/s19184043
18. *Morel A., Prieur L.* Analysis of variations in ocean color // *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22, iss. 4. P. 709–722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>

Об авторах:

Корчемкина Елена Николаевна, старший научный сотрудник, отдел оптики и биофизики моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0526-4083**, **WoS ResearcherID: I-1595-2015**, **Scopus Author ID: 23004799100**, **SPIN-код: 9973-4657**, korchemkina@mhi-ras.ru

Маньковская Екатерина Викторовна, старший научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **Scopus Author ID: 57192647961**, **WoS ResearcherID: AAB-5303-2019**, **SPIN-код: 2453-9943**, emankovskaya@mhi-ras.ru