

УДК 551.463.5

©Е. Н. Корчемкина*, Е. В. Маньковская

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

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

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ В РАЙОНЕ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ВО ВРЕМЯ ЦВЕТЕНИЯ КОККОЛИТОФОРИД В 2012 И 2017 ГГ.

Статья поступила в редакцию 31.01.2020, после доработки 11.03.2020

Показаны результаты оптических измерений, проводившихся в период цветения кокколитофорид, а также восстановленные по ним первичные биооптические характеристики. При цветении кокколитофориды производят значительное количество минеральной взвеси, увеличивая рассеяние света и существенно снижая прозрачность воды. Увеличение рассеяния назад приводит к возрастанию значений восходящей яркости моря и коэффициента яркости. Натурные измерения выполнялись на океанографической платформе, расположенной в 600 м от береговой линии, в июле 2012 г. и в мае 2017 г. Измеряемые параметры включали: показатель ослабления направленного света, коэффициент яркости моря и глубину видимости белого диска, дополнительно использовались спутниковые данные сканеров MODIS 2-го и 3-го уровней обработки. Измеренные показатели ослабления света вдвое превышали значения при отсутствии цветения, коэффициент яркости — втрое. Измеренные величины демонстрируют сходную временную изменчивость. Расчеты первичных биооптических характеристик проводились при помощи полуаналитических алгоритмов. Проведены оценки концентрации кокколитофоров различными способами, результаты и их временной ход хорошо согласуются. Рассчитанное обратное рассеяние завышено на порядок по сравнению с отсутствием цветения, при этом модель GIOP несколько занижает расчетные значения. Совместное использование спутниковых и контактных данных дает возможность восстановить одновременно полное и обратное рассеяние. Рассчитанные по ним коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния и вклад обратного рассеяния показывают повышение доли мелких частиц с высоким показателем преломления.

Ключевые слова: оптические измерения, показатель ослабления направленного света, коэффициент яркости моря, белый диск, *pic*, взвешенное вещество, хлорофилл, кокколитофориды, кокколитофиты, Черное море.

©Е. Н. Korchemkina, E. V. Mankovskaya

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

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

OPTICAL PROPERTIES OF THE BLACK SEA WATERS NEAR OCEANOGRAPHIC PLATFORM DURING COCCOLITHOPHORE BLOOMS IN 2012 AND 2017

Received 31.01.2020, in final form 11.03.2020

The paper shows the results of optical measurements carried out during the coccolithophore bloom and the primary bio-optical characteristics obtained. Blooming coccolithophores produce a significant amount of mineral suspension, increasing light scattering and reducing the transparency of water. An increase in the backward scattering leads to an increase in the upwelling radiance and the reflectance coefficient of the sea water. Field measurements were carried out on an oceanographic platform located 600 meters from the coastline in July 2012 and May 2017. The measured parameters included light beam attenuation coefficient, sea reflectance, and the Secchi disk depth, satellite data from MODIS scanners Leves 2 and 3 were also used. The measured beam attenuation coefficient was twice higher than in the absence of the bloom, the reflectance was three times higher. Measured values show similar temporal variability. The calculations of the primary bio-optical characteristics were carried out using semi-analytical algorithms. The coccolith concentration was estimated in various ways; the results and their temporal variability are in good agreement. The calculated backscattering is an order of magnitude higher compared to the absence of the bloom, while the GIOP model somewhat underestimates the calculated values. The combined use of satellite and contact data makes it possible to restore both total scattering and backscattering. The asymmetry coefficient of the scattering and the backscattering ratio show an increase in the fraction of small particles with a high refractive index.

Key words: optical measurements, light beam attenuation coefficient, sea reflectance, Secchi disk, *pic*, suspended matter, chlorophyll, coccolithophore, coccoliths.

Ссылка для цитирования: Корчемкина Е.Н., Маньковская Е.В. Оптические характеристики вод Черного моря в районе океанографической платформы во время цветения кокколитофорид в 2012 и 2017 гг. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 2. С. 25–34. doi: 10.7868/S2073667320020033

For citation: Korchemkina E.N., Mankovskaya E.V. Optical properties of the Black Sea waters near oceanographic platform during coccolithophore blooms in 2012 and 2017. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 2, 25–34. doi: 10.7868/S2073667320020033

1. Введение

Кокколитофорида относятся к нанопланктонным водорослям (диаметр клеток 5–20 мкм). Особенностью кокколитофорид является наличие на их оболочке известковых дисков — кокколитов в количестве ~15 шт. Диаметр кокколитов 1–2 мкм, толщина 0.25 мкм [1]. В Черном море преобладают кокколитофорида вида *Emiliania huxleyi*, составляя 90–99 % от общей численности кокколитофорид [2]. Клетки вида *Emiliania huxleyi* могут сбрасывать кокколиты, и тогда их количество по отношению к количеству клеток может достигать, по данным [3], до 400, а их концентрация в воде составлять порядка 10^{10} – 10^{11} м⁻³. При таких высоких концентрациях кокколиты производят сильное рассеяние света, значительно снижая прозрачность воды. Увеличение рассеяния назад приводит к возрастанию значений восходящей яркости моря и коэффициента яркости.

С начала 1990-х гг. стали наблюдаться вспышки развития кокколитофорид, охватывающие всю глубоководную область моря. Так, при цветении кокколитофорид летом 1992 г. более половины глубоководной области моря занимали воды с прозрачностью воды по белому диску $Z_6 < 6$ м, а треть вод здесь имели прозрачность $Z_6 = 2$ –4 м [4, рис. 6].

В настоящее время, как показывают спутниковые данные, цветения кокколитофорид наблюдаются в Черном море каждый год в мае-июне, начинаясь с восточной либо центральной части моря [5]. В отдельные годы в случаях высокой интенсивности цветение захватывает прибрежные воды вдоль побережья Крыма, что дает возможность изучать его со стационарной океанографической платформы.

С 2002 г. регулярные гидрооптические измерения проводятся на океанографической платформе, традиционно используемой в составе опорного подспутникового полигона [6] и находящейся в районе Южного берега Крыма (пос. Качивели) на расстоянии 600 м от берега (координаты 44°23' с. ш. 33°59' в. д., глубина дна около 30 м). Контактные измерения, проведенные в июле 2012 г. сотрудниками Морского гидрофизического института, позволили изучить аномальное по интенсивности и продолжительности цветение кокколитофорид. В мае 2017 г. были проведены аналогичные измерения, показавшие сопоставимое по интенсивности цветение одноклеточной водоросли *Emiliania huxleyi*.

Основная цель настоящей работы — оценить влияние интенсивного развития кокколитофорид на биооптические свойства вод Черного моря. В работе показаны результаты оптических измерений, проводившихся на океанографической платформе в период цветения кокколитофорид, а также восстановленные по ним первичные гидрооптические характеристики. Одновременно выполнены оценки биооптических характеристик по данным спутниковых сканеров цвета моря. Рассмотрены и сопоставлены различные методы расчета концентрации кокколитов.

2. Приборы и данные

В работе использованы контактные данные, полученные в результате измерений с океанографической платформы: глубина видимости белого диска, показатель ослабления направленного света (ПОС), спектральный коэффициент яркости. В 2012 г. измерения выполнялись с 07 по 16 июля, в 2017 г. — с 24 по 31 мая.

Глубина видимости белого диска (Z_6 , м) определялась по стандартной методике [7]. Для определения спектрального коэффициента яркости (ρ , %) использовался разработанный в лаборатории отдела оптики и биофизики моря Морского гидрофизического института (МГИ) спектрофотометр [8]. Показатель ослабления направленного света ($\varepsilon(\lambda)$, м⁻¹) измерялся с помощью спектральных измерителей прозрачности, разработанных там же. В 2012 г. использовался лабораторный автоколлимационный прозрачномер [9] (416; 432; 468; 490; 506; 527; 547; 567; 587; 610; 625; 640; 677 нм), в 2017 г. — одноканальный прозрачномер [10] (660 нм).

В качестве альтернативного способа оценки биооптических характеристик морской воды использованы следующие данные, полученные при помощи спутниковых сканеров цвета MODIS Aqua/Terra: коэффициент яркости моря ($R_{rs}(\lambda)$), содержание углерода в минеральной взвеси (pic , моль(С)/м³), показатель обратного рассеяния взвесью ($b_{bp}(555)$, м⁻¹), концентрация хлорофилла-*a* (C_{chl} , мг/м³). Значения коэффициента яркости моря взяты для уровня Level 2, остальные величины представляют собой конечный спутниковый продукт (Level 3), в том числе по модели GIOP [11].

Для 2012 г. доступны данные за 9, 10, 13, 14, 15 и 16 июля, для 2017 г. — за 26, 27, 29, 31 мая, попадающие в близлежащую область вокруг океанографической платформы. Значения коэффициента яркости за 2017 г. проходили дополнительную коррекцию [12] для устранения расхождений с натурными данными в коротковолновой области.

3. Результаты и обсуждение натуральных данных

На рис. 1 показана изменчивость спектрального коэффициента яркости: средний (с СКО), а также минимальный и максимальный измеренные спектры в июле 2012 г. и мае 2017 г. Спектры коэффициента яркости имеют величины, завышенные в 3–4 раза по сравнению с характерными (1–2 %) для данного района и периода времени [5], что объясняется влиянием интенсивного развития кокколитофорид *Emiliana huxleyi*. Значения в максимуме составили: 3.13–6.60 % в июле 2012 г. и 3.60–5.80 % в мае 2017 г., в среднем ~ 4.5 %. При этом спектры имеют характерную для вод Черного моря форму с максимумом в области длины волны 490 нм.

Временной ход максимальных значений коэффициента яркости приведен на рис. 2. Для данных 2012 г. спектр с максимальными значениями в максимуме $\rho_{\max} = 6.60\%$ на длине волны $\lambda = 495$ нм зафиксирован 9 июля, а с минимальными значениями $\rho_{\min} = 3.13\%$ на длине волны 485 нм — 15 июля. Согласно

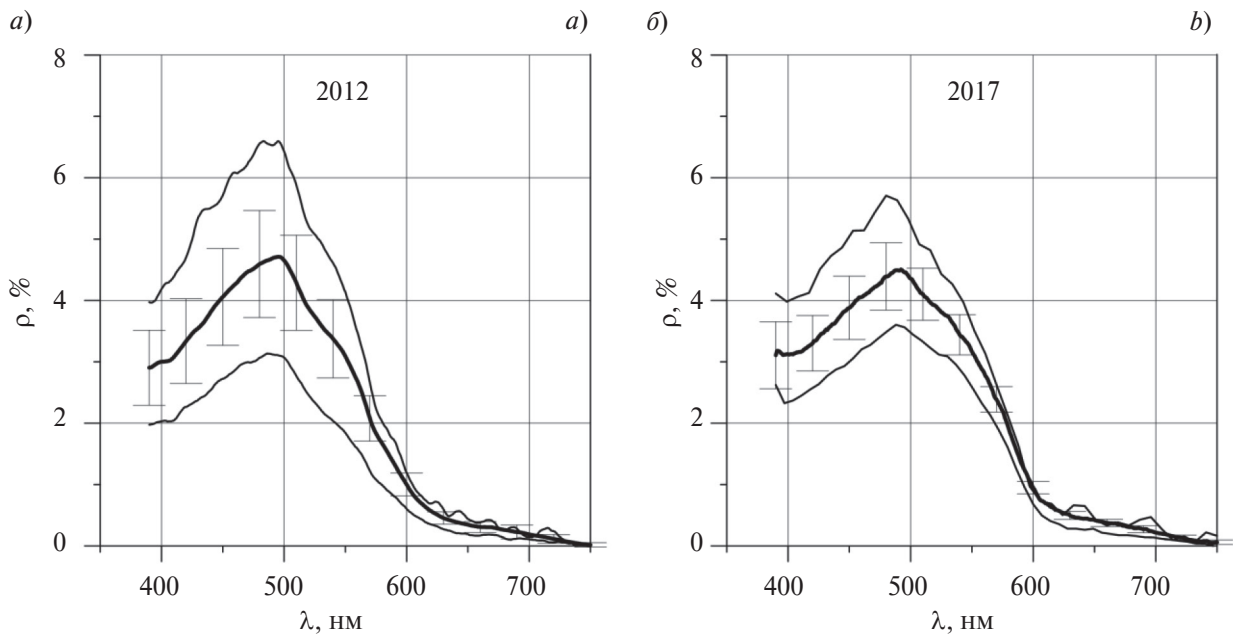


Рис. 1. Средний спектр коэффициента яркости по результатам всех измерений (жирная линия), минимальный и максимальный измеренные спектры: июль 2012 г. (а) и май 2017 г. (б).

Fig. 1. Average (solid black line), minimal and maximal reflectance spectra through all measurements in July 2012 (a) and May 2017 (b).

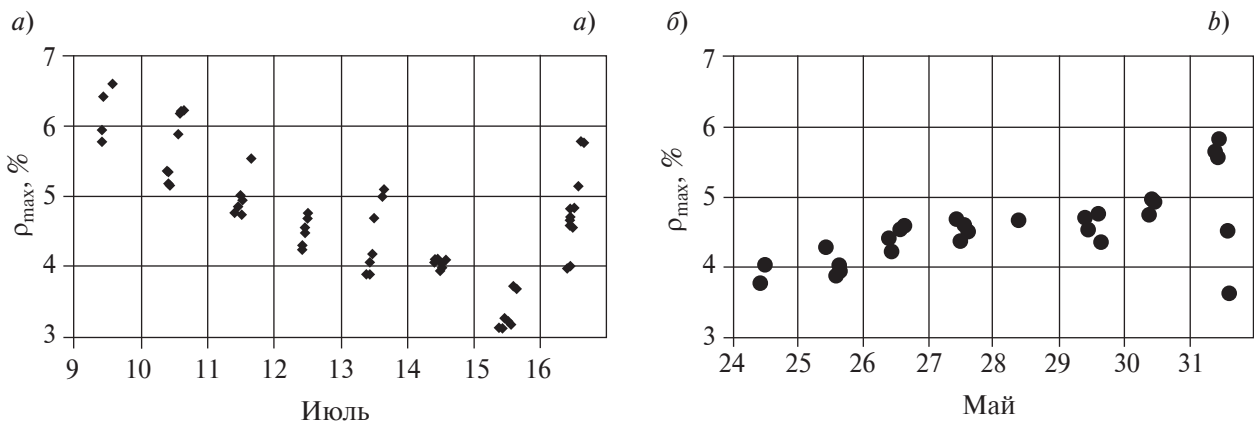


Рис. 2. Временной ход максимальных значений коэффициента яркости: июль 2012 г. (а), май 2017 г. (б).

Fig. 2. Temporal variability of maximal reflectance values in July 2012 (a) and May 2017 (b).

спутниковым снимкам (MODIS) время проведения измерений на океанографической платформе в 2012 г. пришлось на период завершения интенсивного развития кокколитофорид. Основой максимум их развития наблюдался в июне. Соответственно, значения коэффициента яркости снижались в течение эксперимента, что объясняется постепенным осаждением кокколитов. Однако сильное нагонное течение с юга, наблюдавшееся 16 июля, привело к скачкообразному возрастанию коэффициента яркости в течение 20 мин, что можно объяснить повышенным содержанием взвеси (кокколитов) в нагонной воде.

В 2017 г. в течение эксперимента наблюдалось постепенное возрастание значений коэффициента яркости во всем спектральном интервале с последующим резким падением в последний день измерений (31.05), обусловленным, по всей видимости, сменой направления течения, принесшего более чистые воды. Таким образом, максимальное ($\rho_{\max} = 5.8\%$) и минимальное ($\rho_{\max} = 3.6\%$) значения, показанные на рис. 2, получены в один день с разницей в 4 ч. Данный период проведения измерений на океанографической платформе соответствовал начальному этапу массового развития *Emiliana huxleyi*. Согласно спутниковым данным (MODIS), а также данным контактных оптических измерений в ходе экспедиции НИС «Профессор Водяницкий» по Черному морю (14.06–30.06) максимум цветения наблюдался во второй половине июня. Тогда величины коэффициента яркости по спутниковым данным оказались завышенными в ~10 раз по сравнению с характерными для данного района и периода времени, значения в максимуме достигали 10 %.

Глубина видимости белого диска в период проведения измерений на океанографической платформе также имела аномально низкие значения [13, рис. 2]. Характерный диапазон величин Z_6 в глубоководной части Черного моря по данным [13] в среднем составляет 10–20 м. В июле 2012 г. Z_6 в среднем составила 8 м. Измеренные значения изменялись в пределах от 5 до 12.5 м. В мае 2017 г. средняя величина $Z_6 = 6$ м, диапазон значений составил 5–6.5 м.

Между максимальными величинами коэффициента яркости и глубиной видимости белого диска в 2012 г. наблюдалась существенная корреляция (рис. 3), коэффициент корреляции составил 0.92. Можно отметить, что в 2017 г. такой связи не наблюдалось, коэффициент корреляции составил всего 0.26. В работе [14] показано, что Z_6 сильно зависит от концентрации в воде мелких частиц взвеси: «с увеличением их концентрации Z_6 уменьшается, даже если при этом общая концентрация взвеси остается неизменной». График рис. 5, в хорошо иллюстрирует данное положение: концентрация мелких частиц взвеси в виде кокколитов в 2012 г. падает со временем, в 2017 г. — концентрация в течение всего периода измерений сильно не изменяется.

Измеренные величины показателя ослабления в красной области спектра составили: $\varepsilon(667) = 0.88 \pm 0.03 \text{ м}^{-1}$ в июле 2012 г. и $\varepsilon(660) = 0.91 \pm 0.04 \text{ м}^{-1}$ в мае 2017 г. Значения завышены по сравнению с характерными для этого района и периода времени в ~2 раза [13].

Изменчивость спектров показателя ослабления в июле 2012 г. (рис. 4) хорошо согласуется с тенденцией хода максимальных значений коэффициента яркости (рис. 2): те и другие постепенно снижаются в период

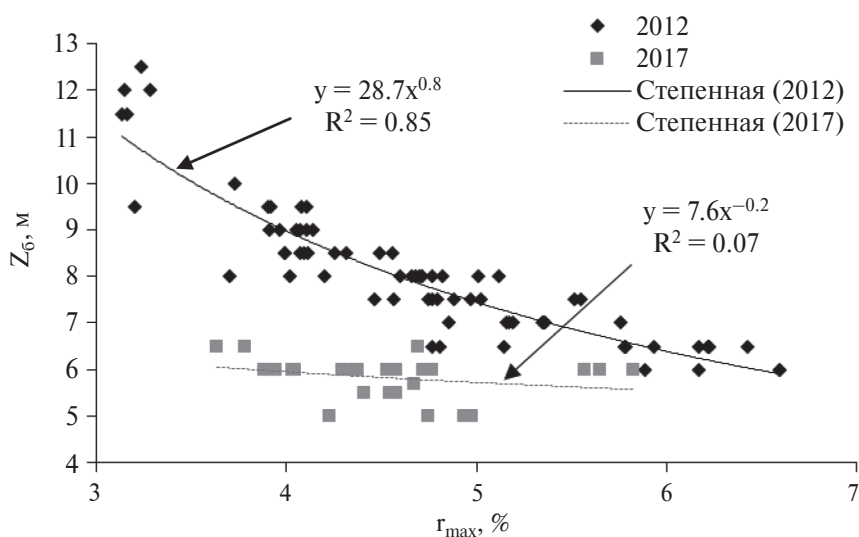


Рис. 3. Связь максимумов коэффициента яркости и глубины видимости белого диска.

Fig. 3. Correlation between maximal reflectance values and Secchi disk depth.

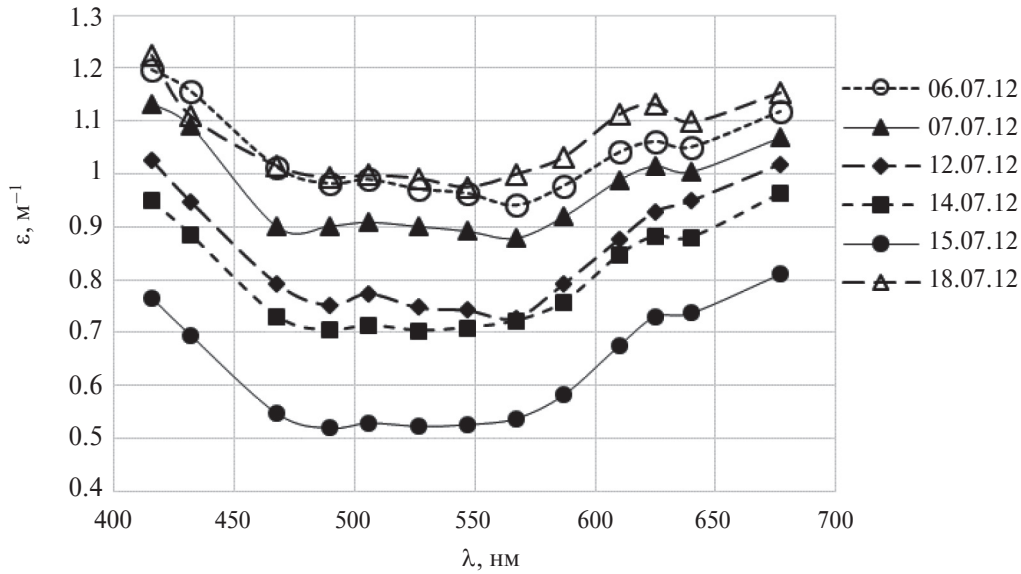


Рис. 4. Спектры показателя ослабления света за 6–18 июля 2012 г.

Fig. 4. Beam attenuation spectra during July 6 to 18, 2012.

с 9 по 15 июля, а затем резко возрастают 16 июля. Возрастание величин показателя ослабления в целом по спектру отражает увеличение содержания в воде взвеси. Форма спектров (рис. 4) соответствует мутным водам [15], содержащим значительное количество растворенного органического вещества (РОВ). При высокой концентрации РОВ коротковолновая область спектра поднимается и может быть даже выше длинноволновой. При этом происходит смещение минимума показателя ослабления в длинноволновую область. В данном случае наблюдалось следующее расположение минимума ПОС: 6 июля — на 567 нм, 15 июля — на 490 нм, 18 июля — на 547 нм.

4. Расчет, результаты и обсуждение восстановленных биооптических характеристик

Все рассчитанные параметры приведены в таблице. Расчеты проводились по массиву спутниковых и контактных данных с разбросом по времени до двух часов. По этой причине контактные данные и результаты их анализа за несколько дней, не покрытых спутниковыми измерениями, в итоговую таблицу не вошли.

По данным контактных и спутниковых измерений коэффициента яркости и показателя ослабления света были рассчитаны: концентрация пигментов фитопланктона (C_{ph} , мг/м³), показатель обратного рассеяния взвесью ($b_{bp}(550)$, м⁻¹), показатель рассеяния частицами взвеси ($b_p(550)$, м⁻¹). Использовались полуаналитические алгоритмы, подробно изложенные в работах [16, 17].

На рис. 5, а приводится концентрация хлорофилла, рассчитанная по спутниковым и контактным данным. Можно отметить, что результаты работы стандартного алгоритма обработки спутниковых данных (ОСХ, Level 3 [18]) хорошо совпадают со значениями, восстановленными по натурным данным коэффициента яркости. Концентрации хлорофилла, восстановленные по спутниковым данным Level 2 после применения дополнительной атмосферной коррекции, оказались немного заниженными (май 2017 г.) относительно других расчетов.

В целом, при цветении кокколитофорид не наблюдается существенного увеличения концентрации хлорофилла из-за малого размера клеток и низкого содержания хлорофилла-а в клетках [19]. Доля кокколитофорид в общей биомассе фитопланктона обычно составляет ниже 50 % [20]. Средняя концентрация хлорофилла по данным контактных измерений коэффициента яркости составила: ~0.44 мг/м³ — в июле 2012 г.; ~0.67 мг/м³ — в мае 2017 г, что находится в диапазоне наблюдавшихся по натурным измерениям величин для весенне-летнего периода [21, 22].

Временной ход показателя обратного рассеяния назад на длине волны 443 нм, рассчитанный по контактным и спутниковым данным, приводится на рис. 5, б. Среднее значение $b_{bp}(443)$, рассчитанное по натурным данным, составило: 0.014 м⁻¹ в июле 2012 г. и 0.015 м⁻¹ в мае 2017 г., т. е. практически одинаковую величину, которая на порядок выше типичных для Черного моря значений, наблюдаемых вне периода

интенсивного развития кокколитофорид [23, 24]. Значения, восстановленные по измерениям коэффициента яркости со спутника, немного завышены, в то время как величины, представляющие собой конечный спутниковый продукт, — немного занижены.

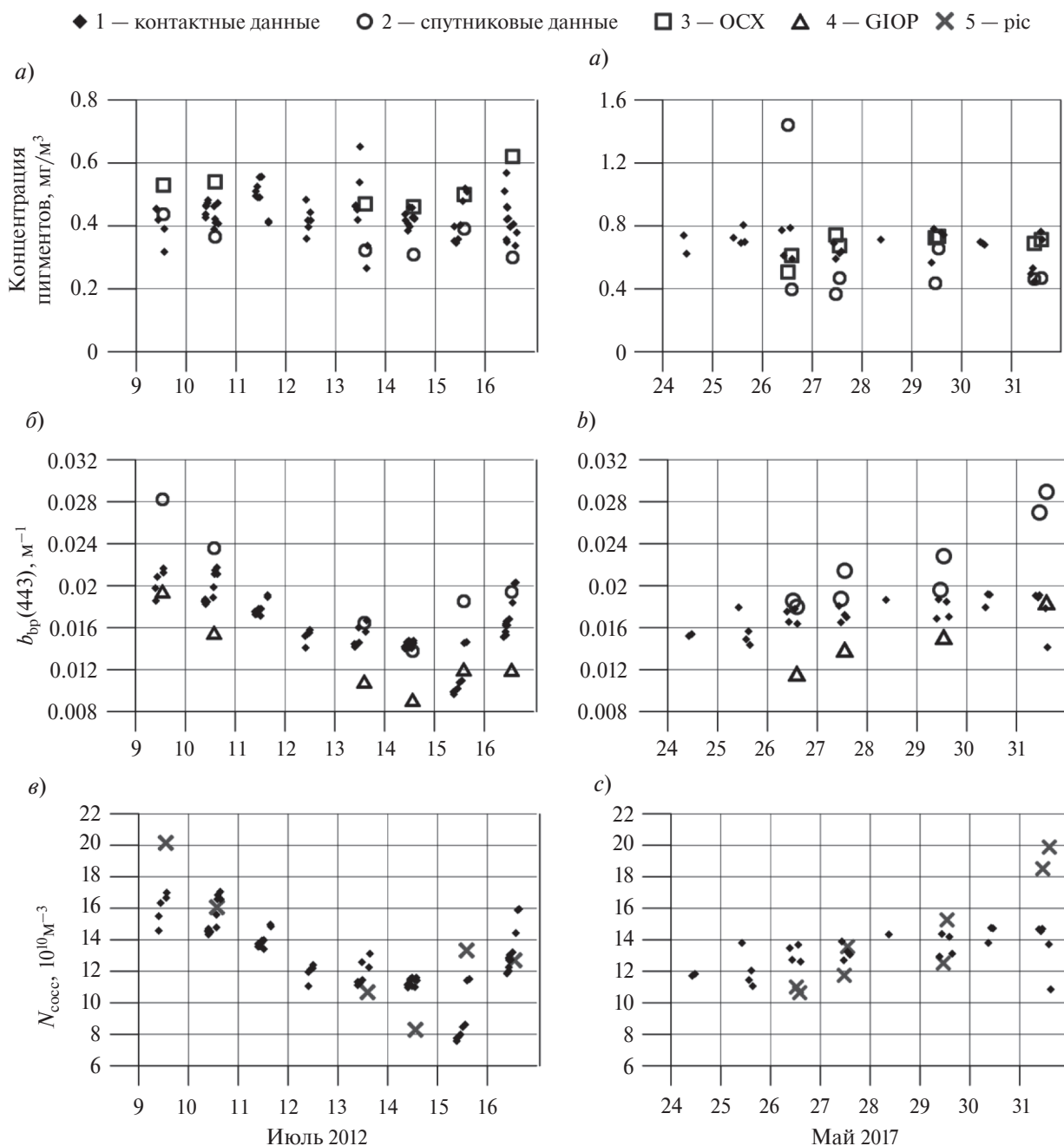


Рис. 5. Биооптические параметры в районе океанографической платформы в июле 2012 г. и мае 2017 г.: концентрация пигментов фитопланктона (а); показатель обратного рассеяния взвесью на длине волны 443 нм (б); концентрация кокколитов (в). Обозначения величин: (1) — рассчитанные по измерениям коэффициента яркости на платформе; (2) — рассчитанные по измерениям коэффициента яркости со спутника (Level 2), (3) — спутниковый продукт Level 3, алгоритм ОСХ [18], (4) — спутниковый продукт Level 3, модель GIOP [11], (5) — рассчитанные по спутниковым данным *pic* (см. «Концентрация кокколитов...», п. 2).

Fig. 5. Bio-optical parameters near oceanographic platform in July 2012 and May 2017: phyto-plankton pigments concentration (a); particles backscattering (b); coccolith concentration (c). Descriptions: (1) — calculated with semi-analytical algorithm from contact reflectance data; (2) — calculated with semi-analytical algorithm from satellite Level 2 reflectance data; (3) — standard satellite Level 3 OCX product [25]; (4) — standard satellite Level 3 GIOP model product [11]; (5) — calculated from satellite *pic* data.

Биооптические параметры морской воды в районе океанографической платформы в июне 2012 и мае 2017 гг.

Bio-optical characteristics of seawater near the platform in July 2012 and May 2017

Параметры, определенные дистанционно	2012	2017	Параметры, определенные по контактными измерениям	2012	2017
$\rho_{max}, \%$	4.4 ± 1.1	4.1 ± 0.2	$\rho_{max}, \%$	4.7 ± 0.9	4.5 ± 0.5
ОСХ $C_{Chl}, \text{mg/m}^3$	0.52 ± 0.06	0.67 ± 0.08	$C_{ph}, \text{mg/m}^3$	0.44 ± 0.07	0.67 ± 0.09
GIOP $b_{bp}(555), \text{m}^{-1}$	0.011 ± 0.03	0.012 ± 0.02	$b_{bp}(550), \text{m}^{-1}$	0.014 ± 0.002	0.015 ± 0.001
$C_{ph}, \text{mg/m}^3$	0.35 ± 0.05	0.59 ± 0.36	$N_{cocc}(b_{bp}), 10^{10} \text{m}^{-3}$	12.9 ± 2.3	13.2 ± 1.2
$b_{bp}(550), \text{m}^{-1}$	0.017 ± 0.004	0.018 ± 0.003	$\varepsilon(660), \text{m}^{-1}$	$0.88^* \pm 0.03$	0.91 ± 0.04
$N_{cocc}(b_{bp}), 10^{10} \text{m}^{-3}$	11.9 ± 3.1	16.8 ± 3.2	$b_p(550), \text{m}^{-1}$	0.66 ± 0.11	0.59 ± 0.04
$N_{cocc}(pic), 10^{10} \text{m}^{-3}$	13.5 ± 4.2	14.1 ± 3.5	K	46 ± 3	41 ± 3
$100 N_c(b_{bp}), 10^{10} \text{m}^{-3}$	14.4 ± 4.9	16.5 ± 3.8	\tilde{b}	0.022 ± 0.001	0.024 ± 0.001

*данная величина получена для длины волны 667 нм.

Показатели рассеяния взвесью $b_p(550)$ и обратного рассеяния взвесью $b_{bp}(550)$ хорошо коррелируют, особенно в июле 2012 г. Коэффициенты корреляции составили 0.94 и 0.66 в 2012 и 2017 гг. соответственно. По восстановленным значениям $b_{bp}(550)$ и $b_p(550)$ оценивался вклад обратного рассеяния $\tilde{b} = b_{bp} / b_p$ на длине волны 550 нм и коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния K , исходя из соотношения $b_p / b_{bp} = K + 1$. Эти параметры несут информацию о распределении частиц по размеру и типу частиц. Полученные величины коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния и вклада обратного рассеяния (табл. 1) показывают повышение доли мелких частиц с высоким показателем преломления.

Концентрация кокколитов N_{cocc} оценивалась несколькими способами.

1. По эмпирической формуле из работы [4]: $b_{b_cocc}(546) = 1.1 \cdot 10^{-13} N_{cocc}$.

Приведенная формула для общего рассеяния назад получена экспериментально как раз для случаев сильно развитого цветения, когда относительное количество сброшенных кокколитов высоко. По данным работы [4], при получении этой формулы отношения числа кокколитов к клеткам были порядка 100. Таким образом, показатель рассеяния кокколитофоридами и сброшенными кокколитами $b_{b_cocc}(546)$ принимался нами равным показателю обратного рассеяния взвешенными частицами $b_{bp}(550)$, причем вклад остальной взвеси (в т. ч. клеток кокколитофорид) считался пренебрежимо малым.

По этой формуле рассчитаны концентрации кокколитов $N_{cocc}(b_{bp})$ по значениям $b_{bp}(550)$, найденным по спутниковым и контактными данным. Средние величины составили:

$N_{cocc} = (1.29 \pm 0.23) \cdot 10^{11} \text{m}^{-3}$ в июле 2012 г. и $N_{cocc} = (1.32 \pm 0.12) \cdot 10^{11} \text{m}^{-3}$ в мае 2017 г. — в случае вычислений по измерениям коэффициента яркости на океанографической платформе;

$N_{cocc} = (1.19 \pm 0.31) \cdot 10^{11} \text{m}^{-3}$ в июле 2012 г. и $N_{cocc} = (1.68 \pm 0.32) \cdot 10^{11} \text{m}^{-3}$ в мае 2017 г. — в случае вычислений по измерениям коэффициента яркости со спутника;

2. По спутниковым данным о содержании углерода в минеральной взвеси (particulate inorganic carbon, *pic*, моль(C)/м³).

Данные *pic* пересчитывались в концентрацию кокколитов с помощью соотношения $pic \cdot \mu(C) = m_{C_cocc} N_{cocc}$, где $\mu(C)$ — молярная масса углерода; $m_{C_cocc} = 2 \cdot 10^{-13} \text{г}$ — содержание углерода в кокколите по данным [3]. Средние величины $N_{cocc}(pic)$ составили: $N_{cocc} = (1.35 \pm 0.42) \cdot 10^{11} \text{m}^{-3}$ в июле 2012 г. и $N_{cocc} = (1.41 \pm 0.35) \times 10^{11} \text{m}^{-3}$ в мае 2017 г.

3. Через концентрацию клеток кокколитофорид по формуле из работы [25]: $N_c, 10^6 \text{cells/l} = 160 b_{bp}(555) - 0.32$, считая, что $N_{cocc} / N_c \sim 100$. Значения $b_{bp}(555)$ взяты по модели GIOP (спутниковые данные). Средние величины $100 N_c(b_{bp})$ составили: $100 N_c(b_{bp}) = (1.44 \pm 0.49) \cdot 10^{11} \text{m}^{-3}$ в июле 2012 г. и $100 N_c(b_{bp}) = (1.65 \pm 0.38) \cdot 10^{11} \text{m}^{-3}$ в мае 2017 г.

Полученные по спутниковым и контактными данным значения концентрации кокколитов достаточно хорошо согласуются между собой и по данным [2] соответствуют периоду цветения водорослей *Emiliania huxleyi*. Наиболее близки величины концентрации кокколитов, рассчитанные по контактными измерениями коэффициента яркости и по спутниковым данным о содержании углерода в минеральной взвеси (рис. 5, в).

Если в формуле из работы [25] отношение $N_{cocc} / N_c \sim 100$ не задавать, то соответствующая величина отношения концентрации кокколитов к концентрации клеток составит: в 2012 г. — 84 ± 7 , в 2017 г. — 54 ± 2 .

Для расчетов взята концентрация кокколитофитов, определенная по натурным данным коэффициента яркости (п. 1). Полученные отношения, как упоминалась ранее, показывают, что в июле 2012 г. цветение кокколитофитов находилось в фазе завершения и число сброшенных клетками кокколитофитов было велико, в то время как в мае 2017 г. цветение находилось в начальной фазе и сброшенных кокколитофитов было меньше.

5. Заключение

Оптические измерения на океанографической платформе во время цветения кокколитофитов позволили сделать следующие выводы.

1. Коэффициент яркости в спектральном максимуме достигал в среднем 4.5 %. В июле 2012 г. наблюдался спад значений, говорящий о финальной фазе цветения, в мае 2017 г. — рост.

2. Средние значения показателя ослабления света $\varepsilon(660)$ вдвое превышали наблюдаемые значения в районе океанографической платформы при отсутствии цветения.

3. Глубина видимости белого диска в период проведения измерений имела аномально низкие значения: в среднем 8 м и 6 м в 2012 и 2017 г. соответственно.

4. Спутниковые данные коэффициента яркости в среднем ниже, чем данные контактных определений. Соответственно величина обратного рассеяния по модели GIOP занижена, а концентрация хлорофилла — завышена.

5. Оценки обратного рассеяния взвесью в среднем завышены на порядок по сравнению с отсутствием цветения.

6. Средние концентрации кокколитофитов, рассчитанные разными методами, различаются не сильно, временной ход хорошо согласуется.

7. Коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния и вклад обратного рассеяния показывают повышение доли мелких частиц с высоким показателем преломления.

6. Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0827–2019–0002 «Оперативная океанология», № 0827–2019–0004 «Прибрежные исследования».

Литература

1. Balch W.M., Kilpatrick K.A., Trees C.C. The 1991 coccolithophore bloom in the central North. I. Optical properties and factors affecting their distribution // *Limnology and Oceanography*. 1996. V. 41, № 8. P. 1669–1683.
2. Микаэлян А.С., Силкин В.А., Паутова Л.А. Развитие кокколитофитов в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 1. С. 45–53.
3. Balch W.M., Holligan P.M., Ackleson S.G., Voss K.J. Biological and optical properties of mesoscale coccolithophore blooms in the Gulf of Maine // *Limnology and Oceanography*. 1991. V. 36, № 4. P. 629–643.
4. Маньковский В.И. и др. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х — начале 90-х годов. Препр. Севастополь: МГИ НАНУ, 1996. 32 с.
5. Карабашев Г.С., Шеберстов С.В., Якубенко В.Г. Июньский максимум нормализованной яркости и его связь с гидрологическими условиями и «цветением» кокколитофитов в Черном море // *Океанология*. 2006. Т. 46, № 3. С. 331–343.
6. Иванов В.А., Дулов В.А. Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2014. 517 с.
7. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Ленинград, 1974 г.
8. Ли М.Е., Мартынов О.В. Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2000. С. 163–173.
9. Маньковский В.И. Спектральный лабораторный прозрачномер с переменной базой // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2012. Вып. 17. С. 56–60.
10. Ли М.Е. Разработки гидрооптических приборов в МГИ НАН Украины // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2012. Вып. 17. С. 7–20.
11. Werdell P., Franz B., Bailey S. et al. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties // *Appl. Opt.* 2013. V. 52, N 10. P. 2019–2037.
12. Корчемкина Е.Н., Шибанов Е.Е., Ли М.Е. Усовершенствование методики атмосферной коррекции для дистанционных исследований прибрежных вод Черного моря // *Исследование Земли из космоса*. 2009, № 6. С. 24–30.

13. Ли М.Е., Латушкин А.А., Мартынов О.В. Долговременная изменчивость прозрачности поверхностных вод Черного моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 40–46.
14. Маньковский В.И. Влияние состава взвеси на глубину видимости белого диска // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. № 1. С. 24–28.
15. Маньковский В.И., Соловьев М.В., Маньковская Е.В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. 90 с.
16. 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.
17. Корчёмкина Е.Н., Латушкин А.А. Определение концентраций растворенного органического вещества и взвеси по спектральному показателю ослабления направленного света // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2016. № 3. С. 44–48.
18. Hu C., Lee Z., Franz B. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117(C1). doi: 10.1029/2011jc007395
19. Paasche E. A Review of the Coccolithophorid *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae), with Particular Reference to Growth, Coccolith Formation, and Calcification-Photosynthesis Interactions // *Phycologia*. 2002. V. 40, N 6. P. 503–529.
20. Mikaelyan A.S., Pautova L.A., Pogosyan S.I., Sukhanova I.N. Summer Bloom of Coccolithophorids in the Northeastern Black Sea // *Oceanology*. 2005. V. 45, N 1. P. S127–S138.
21. 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) // *Proc. SPIE10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104664B (30 November 2017)*; doi: 10.1117/12.2288339
22. Moiseeva N., Churilova T., Efimova T., Krivenko O., Latushkin A. Light absorption coefficients by phytoplankton pigments, suspended particles, and colored dissolved organic matter in the Crimea coastal water (the Black sea) in June 2016 // *Proc. SPIE10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104664C (30 November 2017)*; doi: 10.1117/12.2288351
23. Chami M., Shybanov E.B., Churilova T.Y., Khomenko G.A., Lee M.E.-G., Martynov O.V., Berseneva G.A., Korotaev G.K. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. C11020.
24. Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Буренков В.И. Сезонная и межгодовая изменчивость биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева, Белого, Черного и Каспийского морей по спутниковым данным // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2015. Т. 8, № 1. С. 7–16.
25. Чурилова Т.Я., Суслин В.В. О причинах доминирования *Emiliania Huxleyi* в фитопланктоне глубоководной части Черного моря в начале лета // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2012. № 26–2. С. 195–203.

References

1. Balch W.M., Kilpatrick K.A. & Trees C.C. The 1991 coccolithophore bloom in the central North. I. Optical properties and factors affecting their distribution. *Limnology*. 1996, 41, 1669–1683.
2. Mikaelyan A.S., Silkin V.A., Pautova L.A. Coccolithophorids in the Black Sea: Their interannual and long-term changes. *Oceanology*. 2011, 51, 39–48. <https://doi.org/10.1134/S0001437011010127>
3. Balch W.M., Holligan P.M., Ackleson S.G., Voss K.J. Biological and optical properties of mesoscale coccolithophore blooms in the Gulf of Maine. *Limnology and Oceanography*. 1991, 36, 4, 629–643.
4. Mankovsky V.I., Vladimirov V.L., Afonin E.I., Mishonov A.V., Soloviev M.V., Anninsky B.E., Georgieva L.V., Yunev O.A. The long-term variability of water transparency in the Black Sea and the factors that caused its strong decline in the late 80s and early 90s. *Sevastopol, MGI NANU*, 1996. 32 p. (in Russian).
5. Karabashev G.S., Sheberstov S.V., Yakubenko V.G. The June maximum of normalized radiance and its relation to the hydrological conditions and coccolithophorid bloom in the Black Sea. *Oceanology*. 2006, 46, 3, 305–317.
6. Ivanov V.A., Dulov V.A. Monitoring of the coastal zone at the Black Sea experimental sub-satellite range. *Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics*, 2014. 517 p. (in Russian).
7. Guide to hydrological works in the oceans and seas. *Leningrad*, 1974. (in Russian).
8. Lee M.E., Martynov O.V. Reflectance meter for sub-satellite measurements of bio-optical water parameters. *Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources. Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics*, 2000, 163–173 (in Russian).
9. Mankovsky V.I. Spectral laboratory transparency meter with variable base. *Environmental Monitoring Systems. Sevastopol, MGI NASU*, 2012, 17, 56–60 (in Russian).
10. Lee M.E. Development of hydro-optical devices at the Marine Hydrophysical Institute of NAS of Ukraine. *Environmental Monitoring Systems. Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics*, 2012, 17, 7–20 (in Russian).
11. Werdell P., Franz B., Bailey S. et al. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. *Appl. Opt.* 2013, 52, 2019–2037.

12. Korchemkina E.N., Shybanov E.B., Lee M.E. Improvement of atmospheric correction techniques for remote studies of the coastal waters of the Black Sea. *Issledovaniye Zemli iz Kosmosa*. 2009, 6, 24–30 (in Russian).
13. Lee M.E., Latushkin A.A., Martynov O.V. Long-term variability of transparency of surface waters of the Black Sea. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 3, 40–46 (in Russian).
14. Mankovsky V.I. Influence of suspension composition on Secchi disk depth. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019, 1, 24–28 (in Russian).
15. Mankovsky V.I., Soloviev M.V., Mankovskaya E.V. Hydro-optical characteristics of the Black Sea. *Reference Book. Sevastopol, MGI NAS of Ukraine*, 2009. 90 p. (in Russian).
16. Lee M.E., Shybanov E.B., Korchemkina E.N., Martynov O.V. Determination of the concentration of components in the seawater under upwelling radiation brightness spectrum. *Physical Oceanography*. 2015, 6, 15–30.
17. Korchemkina E.N., Latushkin A.A. Determination of the concentrations of dissolved organic matter and suspension by the spectral light beam attenuation coefficient. *Ekologicheskaya Bezopasnost Pribrezhnoy i Shelfovoy Zon Morya*. 2016, 3, 44–48 (in Russian).
18. Hu C., Lee Z., Franz B. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *J. Geophys. Res.* 2012, 117(C1). doi: 10.1029/2011jc007395
19. Paasche E. A Review of the Coccolithophorid *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae), with Particular Reference to Growth, Coccolith Formation, and Calcification–Photosynthesis Interactions. *Phycologia*. 40 (6), 503–529 (2002).
20. Mikaelyan A.S., Pautova L.A., Pogosyan S.I., Sukhanova I.N. Summer Bloom of Coccolithophorids in the Northeastern Black Sea. *Oceanology*. 2005, 45, 1, S127–S138.
21. 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). *Proc. SPIE10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 104664B (30 November 2017). doi: 10.1117/12.2288339
22. Moiseeva N., Churilova T., Efimova T., Krivenko O., Latushkin A. Light absorption coefficients by phytoplankton pigments, suspended particles, and colored dissolved organic matter in the Crimea coastal water (the Black sea) in June 2016. *Proc. SPIE10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 104664C (30 November 2017). doi: 10.1117/12.2288351
23. Chami M., Shybanov E.B., Churilova T.Y., Khomenko G.A., Lee M.E.-G., Martynov O.V., Berseneva G.A., Korotaev G.K. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea). *J. Geophys. Res.* 2005, 110, C11020.
24. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Saling I.V., Vazyulya S.V., Burenkov V.I. Seasonal and interannual variability of the bio-optical characteristics of the waters of the surface layer of the Barents, White, Black and the Caspian Sea according to satellite data. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2015, 8, 1, 7–16 (in Russian).
25. Churilova T.Ya., Suslin V.V. On the reasons for the dominance of *Emiliana Huxleyi* in phytoplankton of the deep-water part of the Black Sea in early summer. *Ecological Safety of the Coastal and Shelf Zones and the Integrated Use of Shelf Resources*. 2012, 26–2, 195–203 (in Russian).