

Научная статья

УДК 551.465
EDN: BXWJJQ

Основные характеристики фитопланктона и оценка биооптических свойств прибрежных вод Черного моря в летний период 2023 года в условиях массового развития кокколитофорид

Е. Н. Корчёмкина ¹, ✉, Р. И. Ли ²¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия² Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия
✉ korchemkina@mhi-ras.ruПоступила в редакцию 04.03.2025; одобрена после рецензирования 26.09.2025;
принята к публикации 10.11.2025.

Аннотация

Цель. Описание пространственного распределения и структуры фитопланктонного сообщества и выявление взаимосвязей оптических характеристик морской воды с численностью и биомассой фитопланктона в прибрежной акватории Южного берега Крыма – цель настоящего исследования. **Методы и результаты.** Численность и биомасса фитопланктона определялась в 127-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» путем отбора проб и последующей лабораторной обработки. Параллельно при помощи полуаналитического алгоритма рассчитывались концентрации пигментов фитопланктона на основе измерений коэффициента спектральной яркости моря с борта судна. По видовому составу фитопланктона исследованная акватория достаточно однородна, в фитоценозе слоя вод 0–10 м преобладали динофитовые, диатомовые и гаптофитовые водоросли. Показано, что в период массового развития гаптофитовой водоросли *Gephyrocapsa huxleyi* (Lohmann) P. Reinhardt 1972 она доминирует по численности в фитопланктонном сообществе, ее вклад в суммарную численность составлял 30–70 %, однако в то же время основную часть сырой биомассы 42–98 % составляют гетеротрофные и миксотрофные формы динофитовых. Получено, что концентрации пигментов фитопланктона, рассчитанные при помощи полуаналитического алгоритма, хорошо коррелируют с биомассой, однако слабо – с численностью клеток. **Выводы.** Существенный рост рассеяния света при незначительном увеличении поглощения при массовом развитии кокколитофорид *Gephyrocapsa huxleyi* усложняет описание морской среды оптическими методами. Тем не менее в этих условиях возможна оценка содержания пигментов фитопланктона и далее – его биомассы.

Ключевые слова: ведущий комплекс фитопланктона, *Gephyrocapsa huxleyi*, биомасса, численность, коэффициент яркости моря, хлорофилл *a*

Благодарности: работа выполнена по теме НИР № 124030100137-6 «Функциональные, метаболические и молекулярно-генетические механизмы адаптации морских организмов к условиям экстремальных экотопов Черного и Азовского морей и других акваторий Мирового океана» и в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений». Данные получены в 127-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (ЦКП «НИС Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»). Авторы выражают благодарность А. А. Сысоеву за отбор проб планктона в 127-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий».

© Корчёмкина Е. Н., Ли Р. И., 2026

Для цитирования: Корчёмкина Е. Н., Ли Р. И. Основные характеристики фитопланктона и оценка биооптических свойств прибрежных вод Черного моря в летний период 2023 года в условиях массового развития кокколитофорид // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 1. С. 53–67. EDN BXWJJQ.

Original article

Main Characteristics of Phytoplankton and Assessment of Bio-Optical Properties of the Black Sea Coastal Waters in Summer 2023 during the Coccolithophore Bloom

E. N. Korchemkina , R. I. Lee

¹ Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

² A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation

 korchemkina@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to describe spatial distribution and structure of the phytoplankton community, and to reveal the relationships between the seawater optical characteristics and the phytoplankton abundance and biomass in the coastal waters of the Southern Coast of Crimea.

Methods and Results. The phytoplankton abundance and biomass were determined during the 127th cruise of R/V “Professor Vodyanitsky” by taking samples and their subsequent laboratory processing. Application of a semi-analytical algorithm made it possible to calculate simultaneously the phytoplankton pigment concentrations using the spectral reflectance coefficient of the sea measured from board the ship. As for the species composition of phytoplankton, the water area under study was quite homogeneous: dinoflagellates, diatoms, and haptophytes were predominant in the phytocenosis of the 0–10 m layer. It is shown that during the period of mass development of the haptophyte alga *Gephyrocapsa huxleyi* (Lohmann) P. Reinhardt 1972, its abundance dominated in the phytoplankton community, namely its contribution to the total abundance ranged from 30 to 70 %. At the same time, the main part of raw biomass (42 to 98 %) consisted of heterotrophic and mixotrophic forms of dinoflagellates. It was revealed that the phytoplankton pigment concentrations calculated using a semi-analytical algorithm correlated well with the biomass, but poorly – with the cell abundance.

Conclusions. During mass development of coccolithophores *Gephyrocapsa huxleyi*, a significant increase in light scattering accompanied by a slightly grown absorption complicates the description of marine environment by optical methods. Under the specified conditions, assessing the phytoplankton pigment content, and later its biomass is still possible.

Keywords: leading phytoplankton complex, *Gephyrocapsa huxleyi*, biomass, abundance, reflectance coefficient of the sea, chlorophyll *a*

Acknowledgements: The study was carried out as a part of research project No. 124030100137-6 “Functional, metabolic, and molecular-genetic mechanisms of adaptation of marine organisms to the conditions of extreme ecotopes of the Black and Azov seas and other water areas of the World Ocean”, and within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0012 “Analysis, diagnosis, and operational forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine water areas based on mathematical modeling using the data of remote and contact measurement methods.” The data were obtained during the 127th cruise of R/V “Professor Vodyanitsky” (Collective Use Center “R/V Professor Vodyanitsky” of FSBSI FRC IBSS). The authors are grateful to A. A. Sysoev for collecting plankton samples during the 127th cruise of R/V “Professor Vodyanitsky”.

For citation: Korchemkina, E.N. and Lee, R.I., 2026. Main Characteristics of Phytoplankton and Assessment of Bio-Optical Properties of the Black Sea Coastal Waters in Summer 2023 during the Coccolithophore Bloom. *Physical Oceanography*, 33(1), pp. 48-61.

Введение

Фитопланктонное сообщество Черного моря представляет собой сложный механизм, чувствительный к изменениям биотических и абиотических условий, приводящих к смене лидирующего комплекса видов. Пространственно-временные изменения состава фитопланктона сказываются на продуктивности и определяют состояние морской экосистемы. За последние десятилетия в фитопланктоне Черного моря отмечается массовое развитие кокколитофорид *Gephyrocapsa huxleyi* [1–4]. Способность кокколитофорид к миксотрофному питанию и высокая скорость роста приводят к тому, что в большей части поверхностного слоя вод Черного моря в весенне-летний и осенне-зимний периоды наблюдается их массовое развитие, или «цветение» [5]. Основная роль в ведущем комплексе фитопланктона, как в его сезонных, так и в межгодовых изменениях, распределяется между динофитовыми, диатомовыми и гаптофитовыми (*Gephyrocapsa huxleyi*) водорослями. Вследствие особенностей клеточного строения *Gephyrocapsa huxleyi* при массовом развитии оказывают существенное воздействие на радиационный баланс водоема [6, 7]. Мелкая кальцитная взвесь, производимая клетками, во-первых, приводит к возрастанию отражательной способности водной поверхности, во-вторых, затрудняет поступление солнечной энергии к нижележащим слоям моря, препятствуя их освещению и прогреву.

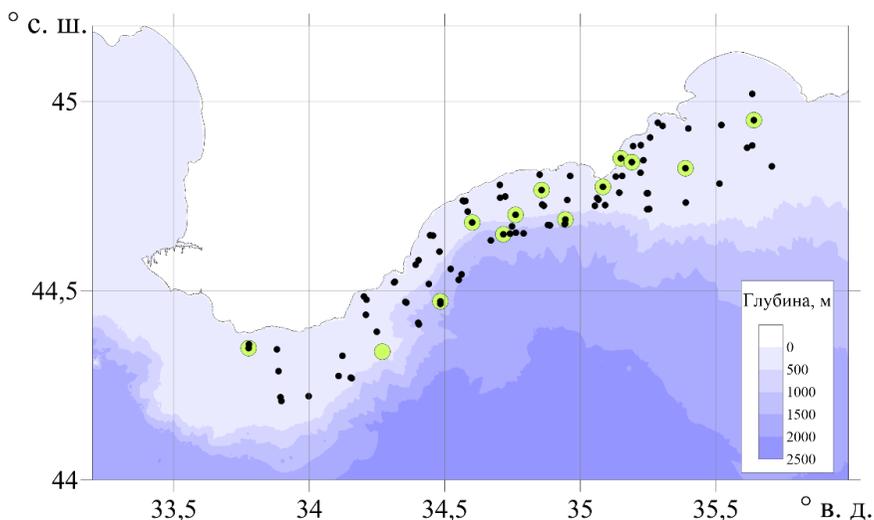
В настоящее время в условиях глобального изменения климата и большого антропогенного воздействия на экосистемы возникает необходимость в постоянном мониторинге фитопланктона с применением как дистанционного зондирования [8], так и непосредственно контактных методов измерения [9]. Основным методом определения численности и биомассы остается отбор проб с последующей лабораторной обработкой. Также для оценки биопродуктивности используются оптические методы, являющиеся достаточно оперативными и неинвазивными. К ним можно отнести измерения *in situ* профилей показателя ослабления света (прозрачности), флюоресценции и подводной облученности, а также измерения восходящей яркости моря над или под поверхностью. В настоящей работе использованы именно измерения восходящей яркости, так как полученные по ним эмпирические связи можно впоследствии перенести на спутниковые измерения.

Целью работы является описание структуры и пространственного распределения основных характеристик фитопланктона, полученных в 127-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (14 июня – 6 июля 2023 г.), и их влияния на интегральные характеристики морской воды – спектральный коэффициент яркости водной толщи и эффективную концентрацию хлорофилла *a* в слое первой оптической глубины.

Материалы и методы

Район исследований. В настоящей работе рассматриваются данные измерений спектрального коэффициента яркости (КЯ, ρ , безразмерная величина) толщи вод и исследуются структура и пространственное распределение основных характеристик фитопланктона в слое вод 0–10 м в летний период, полу-

ченных в ходе 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Съемка проводилась в прибрежной части Черного моря у побережья Крыма. Расположение выполненных станций показано на рис. 1.



Р и с. 1. Точки измерения (черные) коэффициента яркости и точки отбора проб (зеленые) для определения биомассы и численности фитопланктона

F i g. 1. Points (black) of measurements of the sea reflectance, and points (green) of sampling for determining biomass and phytoplankton abundance

Коэффициент яркости моря. Измерения коэффициента яркости проводились с борта судна спектрофотометром, разработанным в отделе оптики и биофизики моря Морского гидрофизического института РАН [10]. Методика измерений согласуется с протоколами NASA для подспутниковых измерений [11]. Измерения КЯ проводились в светлое время суток при высоте солнца более 30° в безоблачную или малооблачную погоду. В результате получены спектры в диапазоне 390–750 нм с шагом 5 нм.

Метод расчета концентрации хлорофилла a . Для дальнейшего анализа были использованы рассчитанные концентрации хлорофилла a , показатели поглощения неживого органического вещества и рассеяния назад частицами взвешенного вещества с использованием полуаналитического алгоритма [10], в котором спектр КЯ имеет вид

$$\rho(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550)(\lambda_0/\lambda)^v}{a_w(\lambda) + C_{ph} a_{chl}^*(\lambda) + a_{org}(440)e^{-S(\lambda-\lambda_0)}}$$

где $k = 0,15$; $b_{bw}(\lambda)$ – показатель рассеяния назад чистой водой [12]; $a_w(\lambda)$ – показатель поглощения чистой водой [13]; $a_{chl}^*(\lambda)$ – спектр удельного поглощения пигментами фитопланктона (нормированный на концентрацию хлоро-

филла a) [14]; $v = 0,8$ – спектральный наклон показателя рассеяния назад, зависящий от размера частиц ¹; S – спектральный наклон показателя поглощения света неживым органическим веществом, связанный эмпирическим соотношением с поглощением на длине волны 490 нм [15]; $b_{bp}(550)$ – показатель рассеяния назад частицами взвеси на длине волны 550 нм; C_{ph} – концентрация пигментов фитопланктона; $a_{org}(440)$ – показатель поглощения неживой органики на длине волны 440 нм.

Спектральный наклон показателя рассеяния назад выбран постоянным в предположении, что основную часть минеральной взвеси составляют отделенные кокколиты, которые имеют довольно узкое распределение по размерам [16].

На основе рассчитанных параметров и известной геометрии измерений был получен также показатель диффузного ослабления света K_d на длине волны 490 нм.

Численность и биомасса фитопланктона. Батометрические пробы воды (2 л) для определения качественного и количественного состава фитопланктона отбирали батометром с двух горизонтов – поверхностного и 10-метрового (на ст. 116 – с горизонта 20 м), сгущали до 50–100 мл с помощью воронки обратной фильтрации через трековые мембранные фильтры с диаметром пор 1 мкм (производство Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Россия) [17, 18] и фиксировали 40-процентным формалином до конечной концентрации 2 %. Идентификацию видового состава, подсчет и определение размера клеток фитопланктона осуществляли под световым микроскопом *BRESSER BioScience Bino* (с увеличением 400–1000x) на специальных предметных стеклах (разграфленных на полосы с шагом 0,04 км при помощи лазера), на поверхность которых дозаторной пипеткой объемом 0,04 мл наносили одну или несколько капель суспензии из тщательно перемешанной исследуемой пробы. Для вычисления сырой биомассы фитопланктона использовали данные измерения клеток и определяли объемы на основе их геометрического подобия [19, 20]. Номенклатурные названия таксонов микроводорослей приведены с использованием интернет-базы данных <http://www.algaebase.org>.

Для сопоставления с оптическими параметрами использовалась «эффективная» биомасса фитопланктона, рассчитанная как средневзвешенная по глубине с учетом поглощения вышележащих слоев [21]:

$$B_{eff} = k_1 B_0 + k_2 B_{10},$$

где B_0 и B_{10} – биомасса на горизонтах 0 и 10 м; k_1 и k_2 вычислены для тех же глубин как

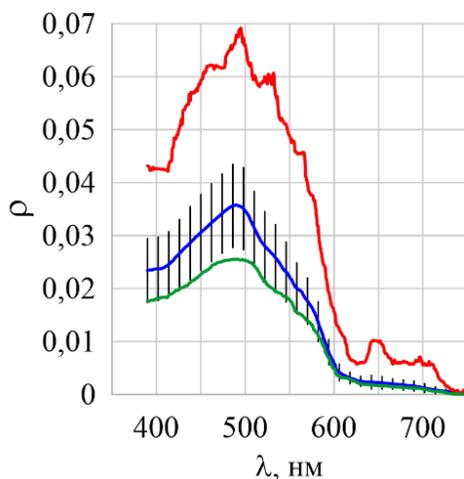
$$k_n = \frac{\exp(-3K_d h_n)}{\sum_n (1 + \exp(-3K_d h_n))}, n = 1 \dots, 2.$$

Здесь K_d – показатель диффузного ослабления света на длине волны 490 нм, рассчитанный для каждой станции при помощи полуаналитического алгоритма. Вес k_1 и k_2 составлял в среднем $0,8 \pm 0,02$ и $0,13 \pm 0,02$ соответственно.

¹ Оптика океана. Т. 2. Прикладная оптика океана / Под ред. А. С. Мониной. Москва : Наука, 1983. С. 213–233.

Результаты и обсуждение

Всего получено 12 станций, для которых есть одновременные измерения КЯ и данные о численности и биомассе фитопланктона. Форма спектров КЯ была типичной для Черного моря, с одним максимумом в диапазоне длин волн 480–500 нм (рис. 2). Среднее значение максимумов составляло $0,036 \pm 0,008$, что завышено по сравнению с нормальным состоянием и, согласно экспериментальным данным, наблюдается во время массового развития кокколитофорид [10]. Увеличение КЯ является следствием роста концентрации мелкой минеральной взвеси (до 2 мкм) в воде, которая вносит наибольший вклад в рассеяние назад, при этом не наблюдается существенного роста в длинноволновой части вследствие высокой спектральной селективности рассеяния мелкой взвеси¹.

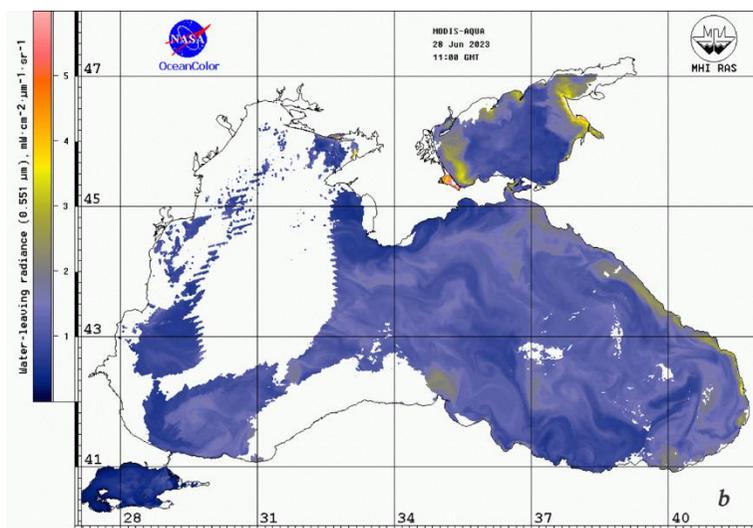
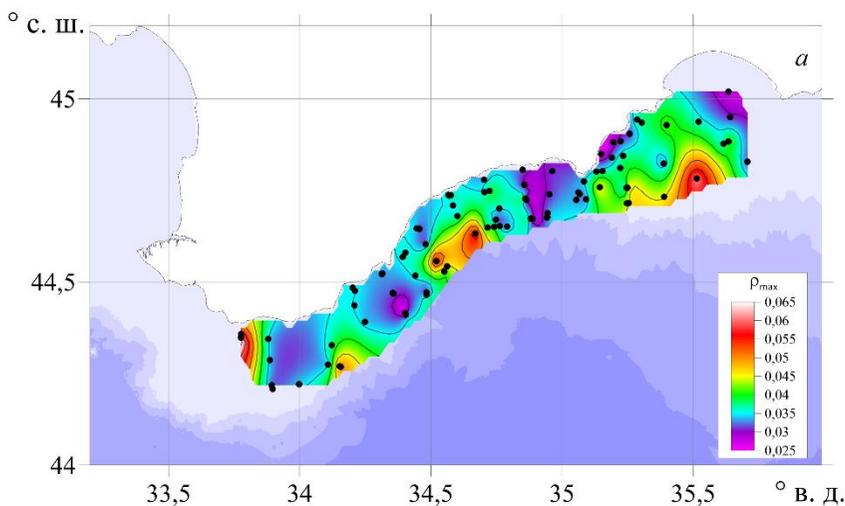


Р и с. 2. Максимальный (красная кривая), средний (синяя) и минимальный (зеленая) спектры коэффициента яркости моря. Штриховыми линиями показано среднеквадратическое отклонение по всем измерениям

F i g. 2. Maximum (red curve), average (blue curve), and minimum (green curve) spectra of the sea reflectance. Dashed lines show the standard deviation for all measurements

Данные показывают слабую пространственную изменчивость, среднеквадратическое отклонение составляет 22 % в области максимума КЯ (на 490 нм). Отдельные выбросы наблюдались на границе прибрежной и глубоководной зон (рис. 3, *a*). Как видно на распределении восходящей яркости моря (рис. 3, *b*), эти выбросы могут возникать вследствие затекания отдельных струй Основного Черноморского течения, переносящего светорассеивающую примесь, в прибрежную зону.

Параметры фитопланктона были исследованы в пробах, отобранных с двух горизонтов – 0 и 10 м.



Р и с. 3. Пространственное распределение: *a* – максимальных значений коэффициента яркости (точками показаны выполненные станции); *b* – восходящей яркости моря на длине волны 555 нм (<http://dvs.net.ru/>) за 28 июня 2023 г. по данным *MODIS/Aqua*

F i g. 3. Spatial distribution: *a* – maximum values of the reflectance (dots indicate completed stations); *b* – water-leaving radiance at a wavelength 555 nm (<http://dvs.net.ru/>) for June 28, 2023 based on the *MODIS/Aqua* data

В этот период в поверхностном слое вод (глубина 0–1,5 м) на исследованной акватории было идентифицировано 114 наименований микроводорослей, из которых 14 определены только до рода. В фитопланктонном сообществе присутствовали виды, принадлежащие к шести отделам: Miozoa (динофитовые), Bacillariophyta, Naptophyta, Chlorophyta, Ochrophyta, Euglenophyta. Наибольшим числом видов характеризовались динофитовые (84 вида), другие отделы были представлены значительно меньшим видовым разнообразием: Bacillariophyta – 17 видов, Naptophyta – 9 и по одному-двум видам из отделов

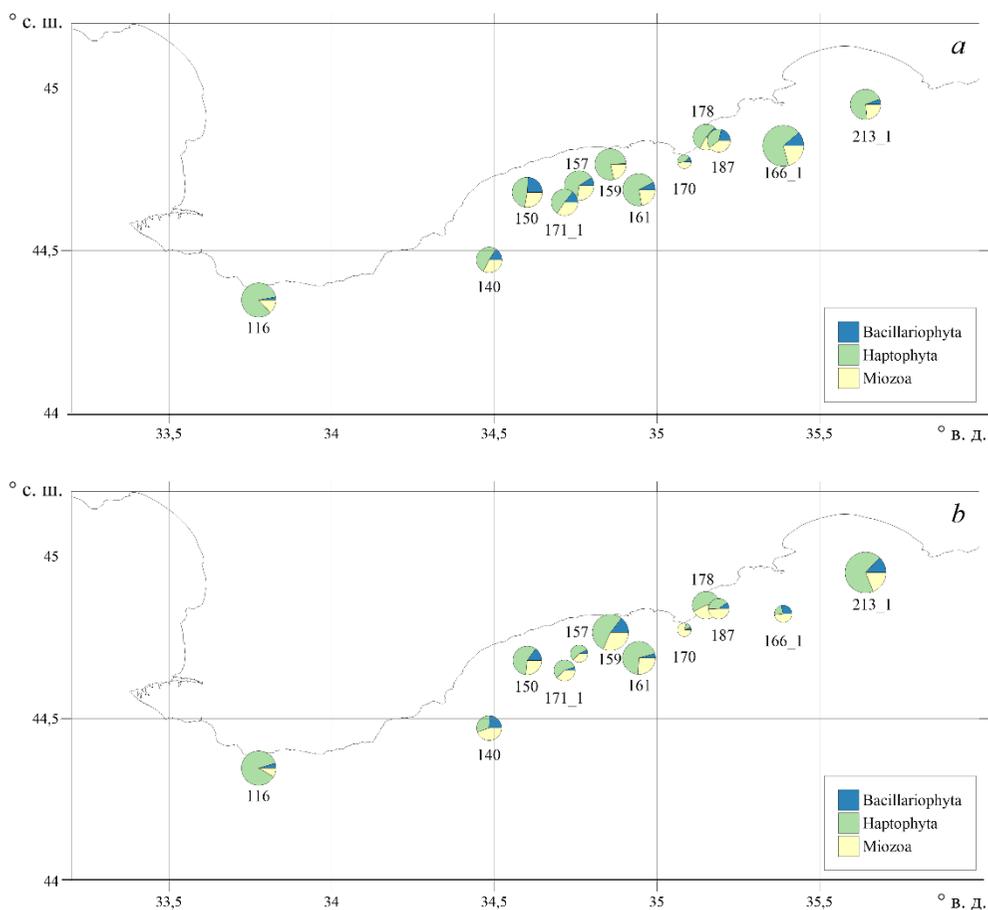
Chlorophyta, Ochrophyta, Euglenophyta. Численность фитопланктона изменялась в диапазоне 82,7–699,4 млн кл/м³, биомасса – в диапазоне 277,4–917,0 мг/м³ (таблица). Средняя численность составила 423,8 ± 136,6 млн. кл/м³; средняя биомасса 696,28 ± 181,72 мг/м³. В суммарную сырую биомассу основной вклад вносили миксотрофные и гетеротрофные формы динофитовых (540,05 ± 169,17 мг/м³, 77 %), автотрофные формы диатомовых (72,48 ± 65,16 мг/м³, 10 %) и гаптофитовая водоросль *Gephyrocapsa huxleyi* (42 ± 26,78 мг/м³, 6 %).

Численность и биомасса основных отделов фитопланктона Abundance and biomass of main phytoplankton groups

Отделы / Groups	Численность, $N \cdot 10^5$ кл/л / Abundance, $N, 10^5$ cells/l				Биомасса, $B, \text{мкг/л}$ / Biomass, $B, \mu\text{g/l}$			
	мин / min	макс / max	мин / min	макс / max	мин / min	макс / max	мин / min	макс / max
	на горизонте, м / at depth, m							
	0		10		0		10	
Бацилларииphyta	5,3	109,7	10,3	94,0	8,8	193,9	9,6	180,2
Мизозои	38,7	145,5	49,2	195,3	183,9	792,2	174,0	1233,5
Нартопфиты	34,3	475,0	22,2	508,2	12,1	135,8	6,4	101,7
Общая	82,7	699,4	161,8	716,3	274,3	916,9	339,4	1379,8

В результате анализа отмечены доминирующие виды по биомассе, которые присутствовали на трех и более станциях в поверхностном слое: *Diplopsalis lenticula* Bergh 1882, *Gymnodinium fuscum* (Ehrenberg) F. Stein 1878, *Phalacroma rotundatum* (Claparède & Lachmann) Kofoid & J. R. Michener 1911, *Prorocentrum balticum* (Lohmann) Loeblich III 1970, *Prorocentrum compressum* (Bailey) T. H. Abé ex J. D. Dodge 1975, *Prorocentrum micans* Ehrenberg 1834, *Protoperidinium divergens* (Ehrenberg) Balech 1974, *Scrippsiella acuminata* (Ehrenberg) Kretschmann, Elbrächter, Zinssmeister, S. Soehner, Kirsch, Kusber & Gottschling 2015, *Tripes furca* (Ehrenberg) F. Gómez 2013, *Tripes muelleri* Bory 1826, вклад каждого вида на станциях составлял 30–107 мг/м³ (4–15 %). По численности на всех станциях количественно доминировала гаптофитовая водоросль *Gephyrocapsa huxleyi*, ее численность изменялась в диапазоне 33–471 млн. кл/м³, что составляло 30–70 % на станциях (рис. 4).

В фитопланктоне на горизонте 10 м были отмечены 100 видов водорослей, из них 11 форм, определенных до рода, из отделов Miozoa, Bacillariophyta, Hartophyta, Chlorophyta, Ochrophyta, Euglenophyta. Наибольшим видовым разнообразием отличались представители динофитовых водорослей – 74, затем диатомовые – 15, гаптофитовые – 7 и остальные по одному-двум видам. Численность изменялась в диапазоне 161,8–716 млн. кл/м³, биомасса – в диапазоне 339,4–1379,8 мг/м³.



Р и с. 4. Доля численности трех основных отделов фитопланктона на горизонте 0 м (а) и 10 м (b)
F i g. 4. Proportion of the abundance of three main groups of phytoplankton at the 0-m (a) and 10-m (b) horizons

Максимальные вклады в биомассу вносили представители динофитовых водорослей: *Diplopsalis lenticula*, *Gymnodinium fuscum*, *Lingulodinium polyedra* (F. Stein) M. J. Head, K. N. Mertens & R. A. Fensome 2024, *Phalacroma rotundatum*, *Prorocentrum balticum*, *Prorocentrum compressum*, *Prorocentrum micans* Ehrenberg 1834, *Protoperidinium divergens*, *Scrippsiella acuminata*, *Triadinium orientale* (Lindemann) J. D. Dodge 1981, *Triplos muelleri* и диатомовая водоросль *Proboscia alata* (Brightwell) Sundström 1986, вклад каждого вида в биомассу составлял 30–199,1 мг/м³ (3–28 %). Наибольший вклад в численность вносила гаптофитовая водоросль *Gephyrocapsa huxleyi*, ее значения изменялись в диапазоне 33–471 млн. кл/м³ (рис. 5). На данном горизонте средняя численность составила 418 ± 145 млн. кл/м³, биомасса 812,6 ± 150,16 мг/м³. Основной вклад в биомассу внесли динофитовые (691,6 ± 149,2 мг/м³, 85 %), диатомовые (71,78 ± 44,07 мг/м³, 8 %) и гаптофитовая водоросль *Gephyrocapsa huxleyi* (46,78 ± 25,08 мг/м³, 5 %).

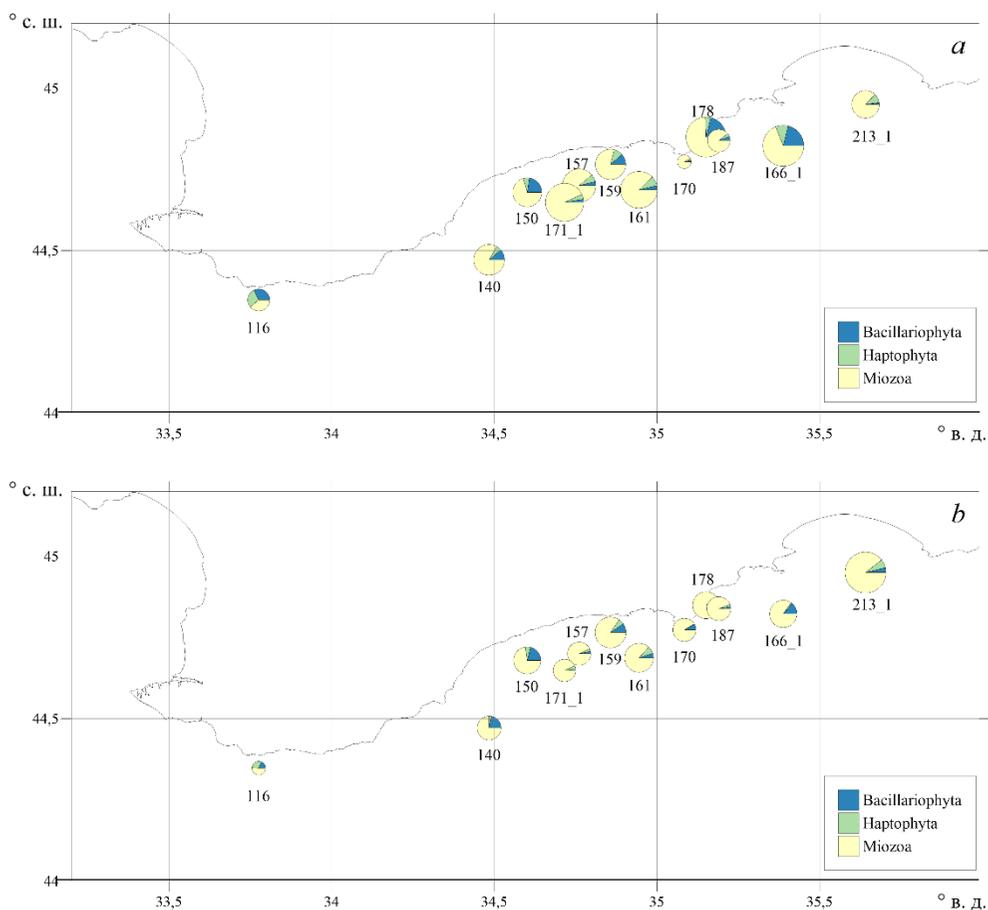


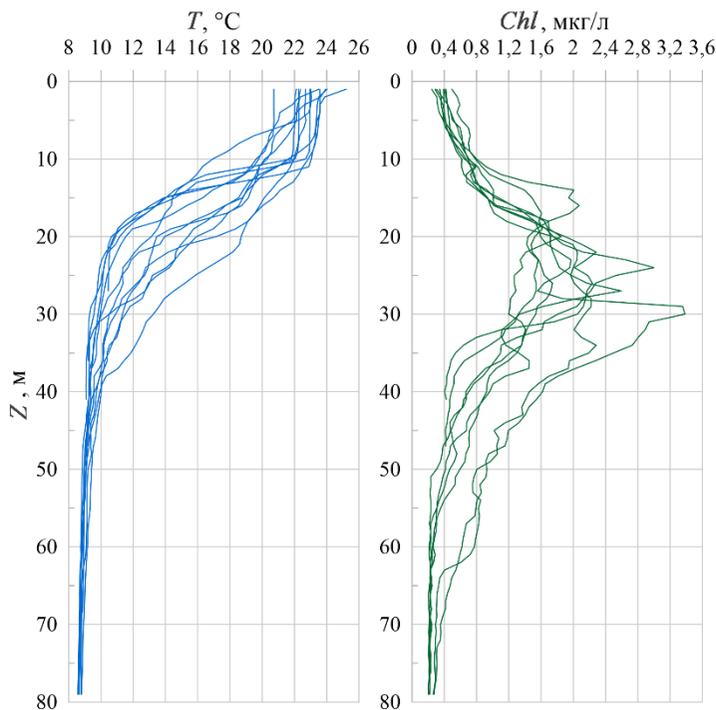
Рис. 5. Доля биомассы трех основных отделов фитопланктона на горизонте 0 м (*a*) и 10 м (*b*)
Fig. 5. Proportion of biomass of three main phytoplankton groups at the 0-m (*a*) and 10-m (*b*) horizons

Нужно отметить, что на ст. 116, где зафиксирована максимальная доля численности гаптофитовых водорослей (рис. 4), получены самые высокие значения КЯ – максимальный спектр, приведенный на рис. 2. При этом на ст. 170, где численность фитопланктона в целом была минимальной, спектр КЯ близок к среднему по всем измерениям. Причиной можно считать то, что численность клеток *Gephyrocapsa huxleyi* оказывает лишь опосредованное влияние на оптические свойства морской воды, а большую роль играет производимая ими мелкая минеральная взвесь. Коэффициент общности видов Чекановского – Серенсена между горизонтами 0 и 10 м составил 0,83, что говорит о большом видовом сходстве [22].

Были рассчитаны концентрация хлорофилла *a*, показатель рассеяния назад и численная концентрация взвешенного вещества. Концентрация хлорофилла *a* составила в среднем $0,50 \pm 0,16$ мг/м³. Показатель рассеяния назад на длине волны 550 нм был равен в среднем $0,01 \pm 0,002$ 1/м при типичных значениях 0,003–0,009 1/м [23]. В предположении о доминировании кокколитофорид

и производимой ими взвеси среди общего взвешенного вещества можно оценить численную концентрацию взвеси по эмпирической формуле В. И. Маньковского [24] $b_{b_cocc}(546) = 1,1 \cdot 10^{-13} N_c$, если пренебречь изменениями рассеяния в пределах 5 нм. Она составляет $(1,10 \pm 0,27)10^{11} \text{ 1/м}^3$, что в случае кокколитной взвеси соответствует развитому «цветению» [2]. Однако натурно определяемая численность кокколитофорид примерно в два раза ниже границы, определяемой как «цветение», что говорит о существенном вкладе терригенной взвеси в рассеяние назад и восходящую яркость. Корреляция численности фитопланктона, как и численности отдельно *Gephyrocapsa huxleyi*, с показателем рассеяния назад очень слабая. Это также показывает, что клетки *Gephyrocapsa huxleyi*, как оптически крупные частицы, вносят минимальный вклад в рассеяние назад.

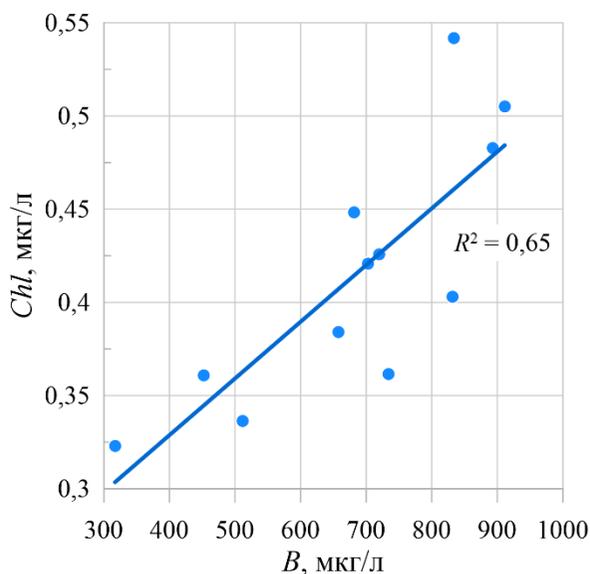
Как можно увидеть из профилей температуры и концентрации хлорофилла *a* по датчику флюоресценции (рис. 6), перемешанный слой составлял во время исследований ~ 10 м. Слой термоклина, как правило, совпадает со слоем повышенной мутности, косвенным подтверждением этому служит и то, что глубина видимости белого диска на исследованных станциях не превышала 13 м и в среднем составляла 10 м. Несмотря на то что на глубинах ~ 30 м располагается максимум концентрации хлорофилла *a*, он практически не влияет на интегральные оптические характеристики водной толщи, такие как восходящая яркость.



Р и с. 6. Профили температуры и концентрации хлорофилла *a* для исследованных станций по данным зонда *Idronaut*

F i g. 6. Profiles of temperature and chlorophyll *a* concentrations at the completed stations derived from the *Idronaut* probe data

Рассчитанная при помощи полуаналитического алгоритма концентрация хлорофилла *a* достаточно хорошо коррелирует с биомассой фитопланктона (рис. 7). Данная корреляция находится на грани средней и сильной, однако является значимой с $p < 0,01$. При этом нужно заметить, что в фитопланктонном сообществе по биомассе доминируют динофлагелляты и от 3 до 36 % общей биомассы (в среднем 17 %) составляют их гетеротрофные виды (например из рода *Protoperidinium* и *Diplopsalis* [25]), клетки которых не содержат хлорофилл *a*. Их присутствие может снижать корреляцию с расчетной концентрацией пигментов.



Р и с. 7. Сопоставление эффективной биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла *a* для слоя 0–10 м

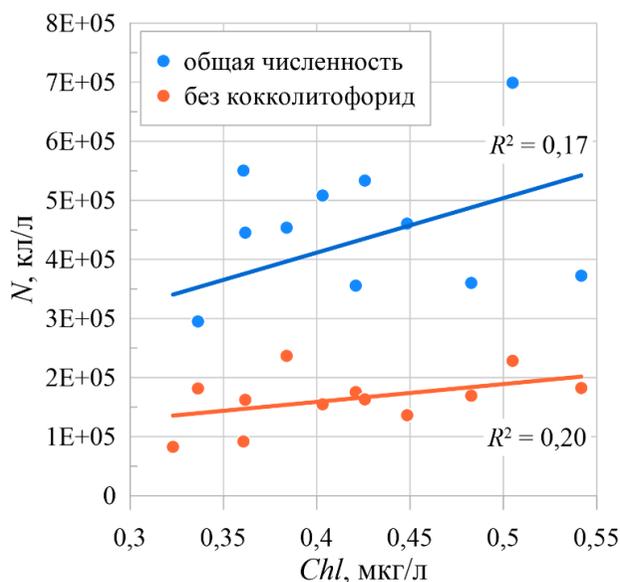
F i g. 7. Comparison of the effective phytoplankton biomass with the chlorophyll *a* concentration for the 0–10-m layer

Кроме того, можно предположить существование некоторой пропорциональности в развитии гетеротрофных и миксотрофных видов, благодаря которой общая биомасса будет пропорциональна биомассе миксотрофных видов и будет коррелировать с концентрацией хлорофилла *a*.

Однако корреляция между концентрацией хлорофилла *a* и численностью фитопланктона низкая (рис. 8) и незначимая ($p = 0,18$). Это можно объяснить наличием большого количества клеток кокколитофорид, покрытых минеральной оболочкой, которая ограничивает влияние находящегося в них хлорофилла *a* на интегральные оптические свойства воды. При вычитании численности кокколитофорид корреляция немного увеличивается, однако утверждать значимость изменения настолько слабой корреляции не имеет смысла.

В итоге можно сказать, что дистанционно оптическими методами во время массового развития кокколитофорид можно достаточно достоверно оценивать биомассу фитопланктона через концентрацию хлорофилла *a*, а также численность мелкой взвеси отделенных кокколитов по показателю рассеяния назад.

Найти же связи оптических параметров с численностью клеток затруднительно вследствие того малого вклада, который они вносят в интегральные светорассеивающие свойства морской воды.



Р и с. 8. Сопоставление численности клеток фитопланктона и концентрации хлорофилла *a* для слоя 0–10 м

F i g. 8. Comparison of the phytoplankton cell abundance with the chlorophyll *a* concentration for the 0–10-m layer

Выводы

В результате исследования фитопланктона прибрежной зоны Черного моря от Фороса до Феодосийского залива в его пробах было определено 123 наименования микроводорослей (из них 14 идентифицированы только до рода), принадлежащих к шести отделам: Miozoa (динофитовые), Bacillariophyta, Naptophyta, Chlorophyta, Ochrophyta, Euglenophyta. В фитоценозе преобладали динофитовые водоросли (88 видов), диатомовые (20), гаптофитовые (9), из остальных отделов присутствовали по одному-два вида. Коэффициент общности видов Чекановского – Серенсена между горизонтами 0 и 10 м составил 0,83, что говорит о большом видовом сходстве.

Средняя численность составила $422,2 \pm 109,3$ млн кл/м³, средняя биомасса $742,95 \pm 128,36$ мг/м³. В суммарную сырую биомассу основной вклад вносили миксотрофные и гетеротрофные формы динофитовых ($612,77 \pm 148,49$ мг/м³), автотрофные формы диатомовых ($76,15 \pm 52,0$ мг/м³) и гаптофитовая водоросль *Gephyrocapsa huxleyi* ($51,42 \pm 24,88$ мг/м³). Количественное развитие фитопланктона характеризовалось высокими значениями численности, преимущественно за счет *Gephyrocapsa huxleyi*, ее вклад в суммарную численность составлял 30–70 % на станциях. Таким образом, *Gephyrocapsa huxleyi* вносит значительный вклад в численность фитопланктона, но малый – в биомассу, что и определяет ее влияние на оптические свойства морской воды: существенный рост рассеяния и незначительный – поглощения.

Получена значимая корреляция рассчитанной концентрации пигментов с биомассой фитопланктона, определенной в пробах, при этом корреляция с численностью клеток является незначимой. Несмотря на то что в биомассе не проведено разделение на гетеротрофные и миксотрофные виды планктона, корреляция с биомассой показывает, что гетеротрофные виды составляют достаточно стабильную долю в фитопланктонном сообществе. Данная взаимосвязь является статистической и не учитывает содержание хлорофилла *a* в клетках конкретных видов, поэтому ее можно использовать в предположении, что вклад гетеротрофных видов останется постоянным.

Массовое развитие кокколитофорид усложняет описание морской среды оптическими методами. При исследовании таких разных по своим оптическим свойствам объектов, как клетки фитопланктона, покрытые и не покрытые «непрозрачной» оболочкой, а также отделенные кокколиты, более правильным подходом будет использование комплексных оптических измерений, как, например, совместные измерения показателя ослабления света и коэффициента яркости. Оценка одновременно общего рассеяния и доли рассеяния назад, как было показано ранее, дает более полное представление о природе взвешенных частиц и их размерном составе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Силкин В. А., Паутова Л. А., Лифанчук А. В.* Физиологические механизмы регуляции структуры морских фитопланктонных сообществ // Физиология растений. 2013. Т. 60, № 4. С. 574–581. EDN QAXJEN. <https://doi.org/10.7868/S0015330313040179>
2. *Микаэлян А. С., Силкин В. А., Паутова Л. А.* Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // Океанология. 2011. Т. 51, № 1. С. 45–53. EDN NDJCPH.
3. Распределение биооптических параметров в фотическом слое северной части Черного моря в период интенсивного цветения кокколитофорид / А. А. Латушкин [и др.] // Современные проблемы оптики естественных вод (ONW'2019) : труды X юб. Всерос. конф., Санкт-Петербург, 9–11 октября 2019 г. Санкт-Петербург : ОАО «Изд-во ХИМИЗДАТ», 2019. С. 125–130.
4. Regional Algorithm for Estimating High Coccolithophore Concentration in the Northeastern Part of the Black Sea / S. Vazyulya [et al.] // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, iss. 9. 2219. EDN TZWXHV. <https://doi.org/10.3390/rs15092219>
5. *Стельмах Л. В., Сеничева М. И., Бабич И. И.* Эколого-физиологические основы «цветения» воды, вызываемого *Emiliania huxleyi* в Севастопольской бухте // Экология моря. 2009. Вып. 77. С. 28–32.
6. *Глуховец Д. И., Шеберстов С. В.* Влияние фитопланктона на альbedo океана // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 3. С. 73–83. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(3\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(3)-6)
7. Satellite monitoring of coccolithophore blooms in the Black Sea from ocean color data / O. Kopelevich [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 146. P. 113–123. EDN SKRGWV. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.009>
8. *Чурилова Т. Я., Суслин В. В., Кривенко О. В.* «Цветение» кокколитофорид в Черном море по данным дистанционного зондирования в 1998–2023 годах: интенсивность и частота // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 6. С. 853–877. EDN QNNWJO.
9. *Финенко З. З., Суслин В. В., Ковалева И. В.* Сезонные и многолетние изменения концентрации хлорофилла в Черном море по спутниковым наблюдениям // Океанология. 2014. Т. 54, № 5. С. 596–605. 635 EDN STHKNH. <https://doi.org/10.7868/S0030157414050062>
10. 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. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-6-17-33>

11. Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation. Volume 3.0: Protocols for Satellite Ocean Colour Data Validation: In Situ Optical Radiometry / Eds. G. Zibordi, K. J. Voss, B. C. Johnson, J. L. Mueller. Dartmouth, NS, Canada : International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG), 2019. 67 p. (IOCCG Protocol Series ; vol. 3.0). <https://doi.org/10.25607/OBP-691>
12. *Morel A.* Optical Properties of Pure Water and Pure Seawater // Optical aspects of Oceanography / Eds. N. G. Jerlov, E. Steemann Nielson. London, New York : Academic Press, 1974. P. 1–24.
13. *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>
14. 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. EDN ZSKVJL. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00090>
15. Light absorption by non-algal particles and colored dissolved organic matter at the wavelength of 490 nm in the Black Sea in the autumn (2015 and 2016) / N. Moiseeva [et al.] // Proceedings of SPIE. 2018. Vol. 10833 : 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 108336B. EDN EMNUYD. <https://doi.org/10.1117/12.2504650>
16. *Linge Johnsen S. A., Bollmann J.* Coccolith mass and morphology of different *Emiliania huxleyi* morphotypes: A critical examination using Canary Islands material // PLoS One. 2020. Vol. 15, iss. 3. e0230569. EDN ZMEPPC. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230569>
17. *Сорокин Ю. И.* К методике концентрирования фитопланктона // Гидробиологический журнал. 1979. Т. 15, № 2. С. 71–76.
18. *Суханова И. Н.* Концентрирование фитопланктона в пробе // Современные методы количественной оценки распределения морского планктона. Москва : Наука, 1983. С. 97–105.
19. *Киселев И. А.* Методы исследования планктона // Жизнь пресных вод СССР. Москва – Ленинград : АН СССР, 1956. Т. IV. С. 183–253.
20. *Sun J., Liu D.* Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton // Journal of Plankton Research. 2003. Vol. 25, iss. 11. P. 1331–1346. <https://doi.org/10.1093/plankt/fgb096>
21. *Шибанов Е. Б., Корчемкина Е. Н.* Восстановление биооптических характеристик вод Черного моря при условии постоянства коэффициента яркости на длине волны 400 нм // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 1. С. 38–50. EDN YORJZJ.
22. *Sørensen T. J.* A Method of Establishing Group of Equal Amplitude in Plant Sociology Based on Similarity of a Species Content and its Application to Analysis of the Vegetation on Danish Commons. Biologiske Skrifter // Kongelige Danske Videnskabernes Selskab: Biologiske skrifter. 1948. Vol. 5, iss. 4. P. 1–34.
23. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) / M. Chami [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2005. Vol. 110, iss. C11. C11020. EDN WOVVTX. <https://doi.org/10.1029/2005JC003008>
24. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х и начале 90-х годов / В. И. Маньковский [и др.]. Севастополь : Морской гидрофизический институт, 1996. 32 с. (Препринт / Морской гидрофизический институт).
25. *Seidinger K. A., Tangen K.* Dinoflagellates // Identifying Marine Phytoplankton / Ed. C. R. Tomas. San Diego : Academic Press, 1997. P. 397–534.

Об авторах:

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

Ли Ранса Игнатъевна, научный сотрудник, отдел функционирования морских экосистем, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, просп. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-2482-0105**, **Scopus Author ID: 57214997607**, **SPIN-код: 8355-3004**, raisa-lee@ibss.su