

**ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А»
В ЧЕРНОМ МОРЕ В ЛЕТНИЙ И ОСЕННИЙ ПЕРИОДЫ
ПО ДАННЫМ ЗОНДИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА И ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ****И.М. Мансурова, Л.В. Стельмах, А.А. Фарбер**

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
РФ, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2
E-mail: lustelm@mail.ru

Выполнен анализ вертикального распределения концентрации хлорофилла «а» в Черном море по данным зондирующего комплекса и прямым измерениям для летнего и осеннего периодов 2022 г. Наиболее тесная связь ($R^2 = 0,80$) между изучаемыми параметрами наблюдается летом в верхнем квазигомогенном слое (ВКС) глубоководной области. В термоклине и под ним, а также в мелководных районах во всех трех слоях эта связь значительно ослабевает ($R^2 = 0,05-0,56$). Осенью в ВКС и в термоклине коэффициент детерминации, отражающий возможную связь между изучаемыми параметрами, составил 0,03–0,14.

Ключевые слова: фитопланктон, хлорофилл «а», флуоресценция, Черное море.

Поступила в редакцию: 26.04.2023.

Введение. Хлорофилл «а» – фотосинтетически активный пигмент, который является косвенным показателем количественного развития фитопланктона, в гидробиологических исследованиях используется как один из основных параметров в системе комплексного экологического мониторинга [1, 2]. Наиболее точные его определения производятся прямым методом, основанном на экстракции пигментов в ацетоне с последующим измерением их флуоресценции, что позволяет рассчитать концентрацию хлорофилла «а» и продукта его разрушения феофитина «а» по стандартным уравнениям [3]. Данные исследования требуют значительного количества времени, предварительной подготовки проб, и часто проводятся уже на берегу. В качестве экспресс-метода определения содержания хлорофилла «а» в Черном море некоторые авторы использовали флуоресценцию пигментов *in vivo*, определяемую с помощью погружного флуоресцентного зонда непосредственно во время проведения заборных работ [4]. В то время как отбор проб для прямого определения хлорофилла возможен только с выбранных фиксированных горизонтов, подобное зондирование произво-

дится непрерывно. Однако, исследования, представленные в ряде работ, свидетельствуют о низкой точности таких определений вследствие слабой корреляции между хлорофиллом «а» и его флуоресценцией, а также отсутствием по этой причине возможности использования постоянного коэффициента, связывающего эти два параметра [1, 5, 6]. Мы полагаем, что в стратифицированных водах Черного моря различия в результатах определения хлорофилла описанными выше двумя методами будут максимальными.

Цель данной работы состояла в сравнительной оценке определения концентрации хлорофилла «а» в фитопланктоне Черного моря по данным, полученным с помощью зондирующего комплекса, и прямых измерений в период температурной стратификации вод.

Материалы и методы исследования. Исследования были выполнены в акватории Черного моря у южного и юго-восточного побережья Крыма в 122 (7 июня – 2 июля 2022 г.) и 124 (27 сентября – 22 октября 2022 г.) рейсах НИС «Профессор Водяницкий» ФИЦ ИнБЮМ (рис. 1).

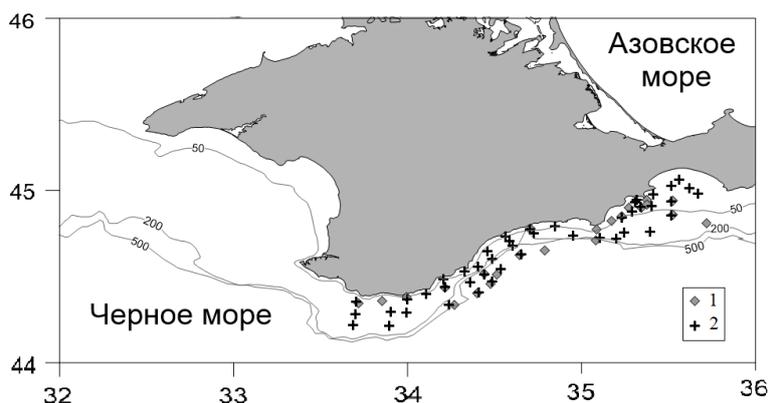


Рис. 1. Схема станций отбора проб для определения гидробиологических параметров в рейсах НИС «Профессор Водяницкий»: 1 – 122 (7 июня–2 июля 2022 г.) и 2 – 124 (27 сентября–22 октября 2022 г.)

Fig. 1. Sampling map for determining the hydrobiological parameters on cruises of the R/V Professor Vodyanitsky: 1 – 122 (June 7–July 2, 2022) and 2 – 124 (September 27–October 22, 2022)

Общая глубина станций варьировала от 32 до 1500 м летом и от 23 до 1469 м осенью. Станции условно разделили на мелководные (≤ 200 м) и глубоководные (≥ 200 м). Летом было выполнено 9 глубоководных станций из 23, осенью – 6 из 19.

Толщину верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) рассчитывали на основании данных глубины, на которой относительная плотность воды (сигма-т) на 0,07 выше, чем на поверхности [7].

Протяженность эвфотической зоны (Z_{eu}), куда проникает от 100 до 1% света, достигающего поверхности моря, определяли по уравнению [8]

$$Z_{eu} = 4,6 / K_d, \quad (1)$$

где 4,6 соответствует оптической глубине ($K_d \cdot z$), на которую проникает 1% фотосинтетически активной радиации (ФАР); K_d – показатель диффузионного ослабления света, который оценивали на основе данных видимости белого диска Секки (Z_s) по формуле, представленной в работе [8]

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

Непрерывная регистрация флуоресценции хлорофилла *in vivo* проводилась с помощью датчика Cusclaps-6К фирмы

Turner Designs, установленного на CTD-зонд IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 Plus M. Датчик был откалиброван по стандартным концентрациям хлорофилла «а» фирмой-поставщиком, что предполагает наличие постоянного коэффициента между флуоресценцией и концентрацией хлорофилла. В результате данные флуоресцентного зонда были представлены в виде абсолютных значений концентрации этого пигмента (mg/m^3).

Для определения концентрации хлорофилла «а» и продукта его разрушения – феофитина «а» прямым методом пробы воды отбирали с помощью пластиковых батометров измерительного комплекса Idronaut Ocean Seven 320 Plus M с 5–7 горизонтов, выбранных в процессе гидрологического зондирования по следующим критериям: поверхностный слой, начало и нижняя граница термоклина, зоны пиков флуоресценции и придонный слой для станций общей глубиной ≤ 100 м. Измерение концентрации хлорофилла проводили флуориметрическим методом [3] на флуориметре Turner Designs Trilogy. Прибор был предварительно откалиброван по стандарту чистого хлорофилла «а» (Sigma-Aldrich, США) с помощью спектрофотометра СФ-2000.

В процессе анализа данных исследу-

емый слой делили на 3 части – ВКС, термоклин (ТК), область под термоклином до глубины 70 м. Статистическую обработку данных выполняли с помощью пакета программного обеспечения Excel 2013, построение графиков осуществляли с использованием программы Grapher 11.

Результаты исследования. Глубина верхнего квазиоднородного слоя летом 2022 г. у побережья Крыма в среднем для всех станций составила $9,2 \pm 4,1$ м. Температура воды на поверхности моря была $21,7 \pm 0,8$ °С. Сезонный термоклин был четко выражен и распространялся до 22 ± 6 м, градиент температуры в нем составлял около 10 °С. Осенью ВКС был в 3 раза больше, температура воды на поверхности моря составила $19,5 \pm 0,7$ °С. По-прежнему наблюдался четко выраженный термоклин с градиентом температуры около 10 °С, но его нижняя граница располагалась глубже – на 42 ± 10 м. Глубина зоны фотосинтеза летом составила 19 ± 5 м, осенью она была в 3 раза больше. В летний период, по данным прямых измерений, на большей части исследованной акватории отмечен мак-

симум хлорофилла «а» с концентрацией $1,37 \pm 0,61$ мг/м³, расположенный, как правило, в верхней части термоклина. Осенью подобный максимум со значениями $1,94 \pm 0,84$ мг/м³ отмечен для половины станций, в остальных случаях, как правило, хлорофилл слабо изменялся в пределах ВКС, затем уменьшался с глубиной. Относительное содержание феофитина «а» линейно возрастало с глубиной от 0 до 80 м в диапазоне значений от 8 до 70% летом и от 0 до 50% осенью, поэтому для поиска корреляции между хлорофиллом, полученным по прямым измерениям и по данным зондирования, в первом случае мы использовали «чистый» хлорофилл «а» без феофитина. В летний период по данным зондирования отмечен один, реже два максимума хлорофилла. Первый, как правило, совпадал по глубине с максимумом, полученным с помощью прямых измерений, однако значения по данным зонда были в 2–3 раза выше. Осенью же эти различия не превышали 1,3 раз, а сама форма профиля часто отличалась. Примеры представлены на рис. 2.

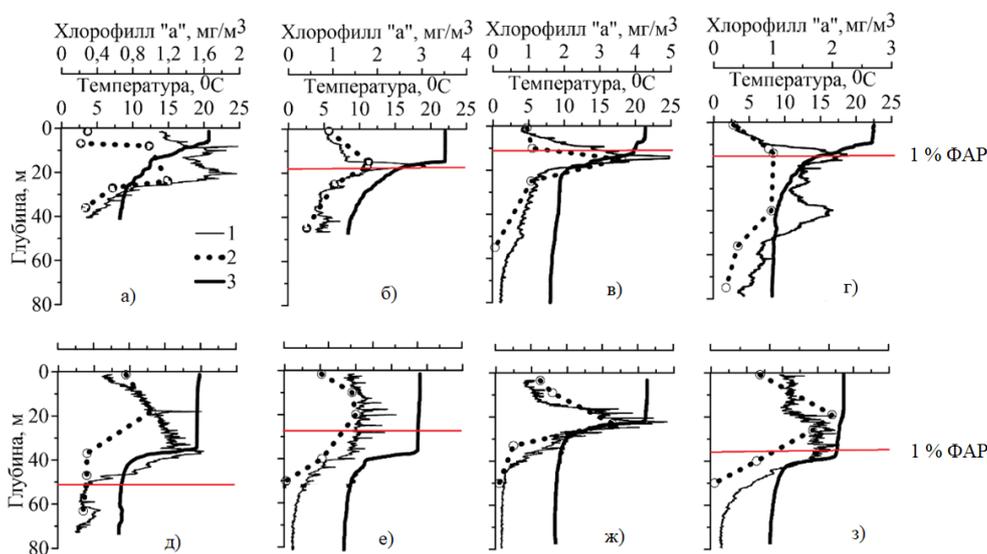


Рис. 2. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла «а» по данным зондирования (1) и прямых измерений (2), температуры воды (3) для мелководных (а, б, д, е) и глубоководных станций (в, г, ж, з) летом (вверху) и осенью (внизу) 2022 г.

Fig. 2. Vertical distribution of chlorophyll “a” concentration according to the probe CTD data (1) and direct measurements (2), water temperature (3) for shallow (a, b, e, f) and deep-water stations (c, d, g, h) in the summer (above) and autumn (below) of 2022

Коэффициент детерминации линейной зависимости вида $y = a \cdot x$ между концентрацией хлорофилла по данным зондирования (y) и по прямым измерениям

(x), как для всего массива данных, так и в каждом слое отдельно, представлен в табл. 1.

Таблица 1. Уравнения связи между концентрацией хлорофилла «а» по данным зондирования (y) и по прямым измерениям (x) для всего массива данных (0–80 м) и для слоев: верхнего квазиоднородного (ВКС), термоклина (ТК), слоя под термоклинном.

Слой	Лето			Осень		
	Все станции	Мелководные	Глубоководные	Все станции	Мелководные	Глубоководные
Весь слой	$y=1,56x$ $R^2=0,59$ $n=117$	$y=1,51x$ $R^2=0,44$ $n=71$	$y=1,62x$ $R^2=0,66$ $n=46$	$y=1,00x$ $R^2=0,07$ $n=96$	$y=0,92x$ $R^2=0,07$ $n=66$	$y=1,13x$ $R^2=0,36$ $n=30$
ВКС	$y=1,18x$ $R^2=0,42$ $n=31$	$y=1,17x$ $R^2=0,05$ $n=21$	$y=1,19x$ $R^2=0,80$ $n=10$	$y=0,84x$ $R^2=0,10$ $n=48$	$y=0,82x$ $R^2=0,03$ $n=35$	$y=0,87x$ $R^2=0,14$ $n=13$
ТК	$y=1,68x$ $R^2=0,48$ $n=36$	$y=1,62x$ $R^2=0,32$ $N=20$	$y=1,73x$ $R^2=0,46$ $n=16$	$y=1,53x$ $R^2=0,27$ $n=28$	$y=1,42x$ $R^2=0,07$ $N=7$	$y=1,75x$ $R^2=0,07$ $n=21$
Под ТК	$y=1,61x$ $R^2=0,43$ $n=49$	$y=1,61x$ $R^2=0,28$ $n=27$	$y=1,60x$ $R^2=0,56$ $n=21$	$y=2,02x$ $R^2=0,71$ $n=16$	$y=2,39x$ $R^2=0,81$ $n=7$	$y=1,69x$ $R^2=0,58$ $n=9$

Как видно из табл. 1, в летний период для всего слоя только в 59% случаев наблюдалась связь рассматриваемых параметров. Для всего исследованного слоя глубоководных станций она была выражена сильнее ($R^2 = 0,66$), чем для мелководных ($R^2 = 0,44$), что проявлялось и для каждого из выделенных слоев. Коэффициент уравнения показывает, что концентрация хлорофилла по данным зондирования в среднем в 1,18 раза завышена в слое ВКС, и в 1,61–1,68 раза – в нижележащих слоях. Рассматривая каждую станцию отдельно, можем заключить, что наибольшее количество станций с высоким коэффициентом детерминации для исследуемой зависимости были глубоководными.

Крайне низкие значения R^2 для всего слоя, ВКС и термоклина в осенний период отражает отсутствие достоверной связи между исследуемыми параметрами. Исключение составил слой под термоклинном, для которого, несмотря на сравнительно малое количество точек, получена достоверная связь между параметрами уравнения. Однако данные зондирования в два раза завышают концентрацию хлорофилла в этом слое.

Обсуждение результатов исследования. В современной гидробиологической практике метод оценки концентрации хлорофилла «а» по его флуоресценции *in vivo* достаточно широко распространен. Он основан на предположении о наличии постоянного коэффициента между этими параметрами [9]. Однако, как показали исследования в Черном море, выполненные ранее [1, 5, 6, 10], этот коэффициент изменяется как в пространстве, так и во времени. Об этом свидетельствуют результаты некоторых авторов, показавших, что с глубиной флуоресценция, нормированная на концентрацию хлорофилла «а», возрастает. Поэтому в результате адаптации фитопланктона к условиям среды вертикальный профиль флуоресценции часто не совпадает с вертикальным распределением концентрации хлорофилла. Кроме того, между содержанием хлорофилла в планктоне и его флуоресценцией достоверная связь часто не наблюдается или она крайне слабая [5, 6, 10]. Последнее обусловлено тем, что флуоресценция хлорофилла зависит не только от его концентрации, но и от интенсивности фотосинтетически активной радиации, а

также нескольких других параметров, характеризующих функционирование клеток водорослей. Это такие параметры, как среднее значение удельного показателя поглощения света пигментами фитопланктона, флуоресцентный внутриклеточный реабсорбционный фактор и квантовый выход флуоресценции *in vivo* [11]. Исследования, выполненные в Мировом океане [12] и теоретические расчеты [13], свидетельствуют о том, что удельный показатель поглощения света пигментами водорослей изменяется почти на порядок. Существенной вариативности подвержен и квантовый выход флуоресценции *in vivo*, который зависит от световых условий, уровня обеспеченности фитопланктона биогенными веществами, а также от видового и таксономического состава фитопланктона [14, 15].

Как следует из представленных выше результатов, в летний и осенний периоды основная часть функционально активного фитопланктона Черного моря, судя по вертикальному профилю концентрации основного фотосинтезирующего пигмента, сосредоточена в ВКС и термоклине. Концентрация хлорофилла «а», представленная на основе данных зондирующего комплекса, только в некоторых случаях совпадала со значениями этого параметра, полученными нами на основе его прямых определений. Летом во всех изученных трех слоях, и осенью в слое под термоклином, результаты, представленные по зонду, были завышены примерно в 1,2–2,4 раза. А значения коэффициента детерминации в большинстве случаев свидетельствуют о наличии либо слабой связи между изучаемыми параметрами, либо она отсутствует. Наиболее тесная связь между ними выявлена для верхнего квазиоднородного слоя глубоководной области моря в летний период ($R^2 = 0,80$). В слое термоклина и под ним, а также в мелководных районах во всех трех слоях эта связь значительно ослабевает ($R^2 = 0,05–0,56$). Осенью в ВКС и в термоклине концентрация хлорофилла, рассчитанная по флуоресценции, не коррелирует с его прямыми определениями.

Таким образом, в настоящее время данные по концентрации хлорофилла «а», получаемые с помощью флуоресцентного зонда с использованием постоянного коэффициента связи между флуоресценцией хлорофилла и его концентрацией, в стратифицированных по температуре водах Черного моря следует использовать лишь для ориентировочной оценки вертикальных профилей основного фотосинтетического пигмента фитопланктона.

Заключение. В стратифицированных водах Черного моря наиболее тесная связь между концентрацией хлорофилла, рассчитанной по флуоресценции, и прямыми определениями этого пигмента получена для верхнего квазиоднородного слоя глубоководной области в летний период. Тогда как в термоклине и под ним, а также во всех трех слоях мелководной области эта связь в большинстве случаев слабая. В осенний период в верхних двух слоях (ВКС и термоклине), где сосредоточена основная доля фитопланктона, результаты определений концентрации этого пигмента двумя методами полностью не совпадают. В настоящее время данные по концентрации хлорофилла «а», полученные на основе флуоресценции *in vivo*, следует применять только для ориентировочной оценки его вертикального распределения в море.

Работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (номер гос. регистрации 121041400077-1).

Проведенные исследования были выполнены в Центре коллективного пользования «Научно-исследовательское судно Профессор Водяницкий» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам ФИЦ ИнБЮМ Н.В. Мининой и В.В. Давыдову за помощь при выполнении данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финенко З.З., Мансурова И.М., Ковалёва И.В., Георгиева Е.Ю. Развитие фитопланктона в зимне-весенний период в прибрежных водах Крыма // Морской биологический журнал. 2021. Т. 6. № 1. С. 102–114.
2. Stelmakh L., Kovrigina N., Gorbunova T. Phytoplankton Seasonal Dynamics under Conditions of Climate Change and Anthropogenic Pollution in the Western Coastal Waters of the Black Sea (Sevastopol Region) // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11. Issue 3. Article No. 569. 14 p.
3. *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods* / Eds: S.W. Wright, S.W. Jeffrey, R.F.C. Mantoura. Paris: UNESCO Publishing, 1997. 661 p.
4. Крашенинникова С.Б., Бабич С.А. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* с учётом гидрологических, гидрохимических и гидрооптических условий Чёрного моря весной 2021 г. // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2022. Т. 7. № 3 (23). С. 13–22.
5. Моисеева Н.А., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Кривенко О.В., Маторин Д.Н. Концентрация и флуоресценция хлорофилла *a* в период сезонной стратификации вод в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 5. С. 481–495.
6. Моисеева Н.А., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Артемьев В.А., Скороход Е.Ю. Спектральные биооптические показатели вод Атлантического сектора Антарктики // Морской биологический журнал. 2020. Т. 5. № 4. С. 69–78.
7. Кубряков А.А. Белокопытов, В.Н., Зацепин, А.Г., Станичный, С.В., Пиотух, В.Б. Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 5 (209). С. 449–468.
8. Ведерников В.И. Первичная продукция и хлорофилл в Черном море в летне-осенний период // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря / Отв. ред. М.Е. Виноградов, М.В. Флинт. М.: Наука, 1989. С. 65–83.
9. Schmechtig C., Poteau A., Claustre H., D'Ortenzio F., Boss E. Processing BGC-Argo chlorophyll-A concentration at the DAC level. Argo data management. Ver. 1.0. France: IFREMER, 2015. 12 p.
10. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Лу П.И. Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Чёрном море // Морской экологический журнал. 2005. Т. 4. № 1. С. 15–46.
11. Babin M. Phytoplankton fluorescence: theory, current literature and in situ measurement // Real-time Coastal Observing Systems for Marine Ecosystem Dynamics and Harmful Algal Blooms: Theory, Instrumentation and Modelling / Eds: M. Babin, C.S. Roesler, J.J. Cullen. Paris: UNESCO Publishing, 2008. P. 237–280.
12. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1995. Vol. 100. Issue C7. P. 13321–13332.
13. Morel A., Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton // Deep-Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers. 1981. Vol. 28. Issue 11. P. 1375–1395.
14. Falkowski P., Kiefer D.A. Chlorophyll *a* fluorescence in phytoplankton: relationship to photosynthesis and biomass // Journal of Plankton Research. 1985. Vol. 7. Issue 5. P. 715–731.
15. Babin M., Morel A., Claustre H., Bricaud A., Kolber Z., Falkowski P.G. Nitrogen-and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems. // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1996. 43(8). P. 1241–1272.

**VERTICAL DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL “A” CONCENTRATION
IN THE BLACK SEA IN THE SUMMER AND AUTUMN PERIODS ACCORDING TO
THE DATA OF THE PROBE CTD COMPLEX AND DIRECT MEASUREMENTS**

I.M. Mansurova, L.V. Stelmakh, A.A. Farber

The A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
RF, Sevastopol, Nakhimov Av., 2

The analysis of the vertical distribution of the chlorophyll *a* concentration in the Black Sea was carried out according to the data of the probe CTD complex and direct measurements in the summer and autumn of 2022. The closest relation ($R^2 = 0,80$) between the studied parameters is observed in summer in the upper mixed layer (UML). In the thermocline and below it, as well as in shallow areas in all three layers, this relation is significantly weakened ($R^2 = 0,05-0,56$). In autumn, in the UML and in the thermocline, the coefficient of determination, reflecting a possible relation between the studied parameters, was 0,03–0,14.

Keywords: phytoplankton, chlorophyll *a*, fluorescence, Black Sea.

REFERENCES

1. *Finenko Z.Z., Mansurova I.M., Kovaljova I.V., and Georgieva E.Ju.* Razvitie fitoplanktona v zimne-vesennij period v pribrezhnyh vodah Kryma (Development of phytoplankton in the winter-spring period in the coastal waters of Crimea). *Morskoj biologicheskij zhurnal*, 2021, Vol. 6, No. 1, pp. 102–114.
2. *Stelmakh L., Kovrigina N., and Gorbunova T.* Phytoplankton Seasonal Dynamics under Conditions of Climate Change and Anthropogenic Pollution in the Western Coastal Waters of the Black Sea (Sevastopol Region). *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, Vol. 11, Issue 3, Article No. 569, 14 p.
3. *Wright S.W., Jeffrey S.W., and Mantoura R.F.C.* Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods. Paris: UNESCO Publishing, 1997, 661 p.
4. *Krashennikova S.B. and Babich S.A.* Prostranstvennoe raspredelenie koncentracii hlorofilla *a* s uchjotom gidrologicheskikh, gidrohimicheskikh i gidroopticheskikh uslovij Chjornogo morja vesnoj 2021 g. (Spatial distribution of chlorophyll-*a* concentration in hydrological, hydrochemical and hydroptical conditions of the Black Sea in spring 2021). *Trudy Karadagskoj nauchnoj stancii im. T.I. Vjazemskogo – prirodnoho zapovednika RAN*, 2022, Vol. 7, No. 3 (23), pp. 13–22.
5. *Moiseeva N.A., Churilova T.Ja., Efimova T.V., Krivenko O.V., and Matorin D.N.* Koncentracija i fluorescencija hlorofilla *a* v period sezonnoj stratifikacii vod v Chernom more (Fluorescence of Chlorophyll *a* During Seasonal Water Stratification in the Black Sea). *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 2019, Vol. 35, No. 5, pp. 481–495.
6. *Moiseeva N.A., Churilova T.Ja., Efimova T.V., Artem'ev V.A., and Skorohod E.Ju.* Spektral'nye bioopticheskie pokazateli vod Atlanticheskogo sektora Antarktiki (Spectral bio-optical properties of water of Atlantic sector of Antarctic). *Morskoj biologicheskij zhurnal*, 2020, Vol. 5, No. 4, pp. 69–78.
7. *Kubrjakov A.A., Belokopytov V.N., Zacepin A.G., Stanichnyj S V., and Piotuh V.B.* Izmenchivost' tolshhiny peremeshannogo sloja v Chernom more i ee svjaz' s dinamikoju vod i atmosferynym vozdejstviem (The Black Sea mixed layer depth variability and its relation to the basin dynamics and atmospheric forcing). *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 2019, Vol. 35, No. 5 (209), pp. 449–468.
8. *Vedernikov V.I.* Pervichnaja produkcija i hlorofill v Chernom more v letne-osennij period / Struktura i produkcionnye harakteristiki planktonnyh soobshhestv Chernogo morja (Primary production and chlorophyll in the Black Sea in the summer-autumn period / Structure and production characteristics of plankton communities in the Black Sea), Moscow: Nauka, 1989, pp. 65–83.

9. Schmechtig C., Poteau A., Claustre H., D'Ortenzio F., and Boss E. Processing BGC-Argo chlorophyll-A concentration at the DAC level. Argo data management. Ver. 1.0, France: IFREMER, 2015, 12 p.
10. Finenko Z.Z., Churilova T.Ja., and Li R.I. Vertikal'noe raspredelenie hlorofilla i fluorescencii v Chjornom more (Vertical distribution of chlorophyll and fluorescence in the Black Sea). *Morskij jekologicheskij zhurnal*, 2005, Vol. 4, No. 1, pp. 15–46.
11. Babin M. Phytoplankton fluorescence: theory, current literature and *in situ* measurement / Real-time Coastal Observing Systems for Marine Ecosystem Dynamics and Harmful Algal Blooms: Theory, Instrumentation and Modelling, Paris: UNESCO Publishing, 2008, pp. 237–280.
12. Bricaud A., Babin M., Morel A., and Claustre H. Variability in the chlorophyll- specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, Vol. 100, Issue C7, pp. 13321–13332.
13. Morel A. and Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1981, Vol. 28, Issue 11, pp. 1375–1395.
14. Falkowski P. and Kiefer D.A. Chlorophyll *a* fluorescence in phytoplankton: relationship to photosynthesis and biomass. *Journal of Plankton Research*, 1985, Vol. 7, Issue 5, pp. 715–731.
15. Babin M., Morel A., Claustre H., Bricaud A., Kolber Z., and Falkowski P.G. Nitrogen-and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1996, 43(8), pp. 1241–1272.