

УДК 551.463.5

© О. Б. Кудинов^{1*}, В. В. Суслин¹, Р. И. Ли², Д. А. Рябоконт¹, 2023

¹Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

²Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, 299011, Севастополь, пр. Нахимова, д. 2

*kudinov_ob@mhi-ras.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРОФИЛЕЙ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ И ВИДОВОГО СОСТАВА ФИТОПЛАНКТОНА В ЧЁРНОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ В НАЧАЛЕ ОСЕНИ 2020 ГОДА

Статья поступила в редакцию 11.01.2023, после доработки 05.06.2023, принята в печать 19.07.2023

Аннотация

Цель работы состояла в изучении свойств вертикальных профилей интенсивности флуоресценции пигментов фитопланктона (хлорофилла-*a*, фикоцианина, фикоэритрина и бета-каротина) с привлечением данных о видовом составе фитопланктона, полученных в 114 рейсе НИС «Профессор Водяницкий». Проведённый анализ ковариационных матриц профилей ИФ пигментов фитопланктона в верхнем 50-метровом слое Чёрного моря указывает, что с глубиной происходит изменение пигментного состава фитопланктона, что может быть связано со сменой его видового состава. В то же время, изменчивость профилей ИФ пигментов фитопланктона на уровне 80 % в верхнем 20-метровом слое описывается первым собственным вектором, что хорошо согласуется с прямыми наблюдениями видового состава фитопланктона, свидетельствующие о доминировании одного отдела фитопланктона в 20-метровом слое. Кроме того, имеют место региональные особенности, в частности, средние значения ИФ пигментов фитопланктона в Азовском море существенно выше, чем в Чёрном море, что связано с более высокой концентрацией фитопланктона в Азовском море.

Ключевые слова: флуоресценция пигментов фитопланктона, видовой состав фитопланктона, зона фотосинтеза, Чёрное море, Азовское море

UDC 551.463.5

© О. Б. Кудинов^{1*}, В. В. Суслин¹, Р. И. Ли², Д. А. Рябоконт¹, 2023

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

²A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 299011, Pr. Nakhimova, 2, Sevastopol, Russia

*kudinov_ob@mhi-ras.ru

FEATURES OF FLUORESCENCE PROFILES AND SPECIES COMPOSITION OF PHYTOPLANKTON IN THE BLACK SEA AND THE SEA OF AZOV IN EARLY AUTUMN 2020

Received 11.01.2023, Revised 05.06.2023, Accepted 19.07.2023

Abstract

The aim of this work was to study the properties of vertical fluorescence intensity (FI) profiles of phytoplankton pigments (chlorophyll-*a*, phycocyanin, phycoerythrin, and beta-carotene) using data on the phytoplankton species composition obtained during the cruise 114 of the R/V 'Professor Vodyanitsky'. The analysis of covariance matrices of phytoplankton pigment FI profiles in the upper 50-meter layer of the Black Sea indicates that the pigment composition of phytoplankton changes with depth, which may be associated with changes in its species composition. At the same time, 80 % variability of phytoplankton pigment FI profiles in the upper 20-meter layer is described by the first eigenvector. It agrees well with direct observations of the phytoplankton species composition, indicating the dominance of one phytoplankton division in the 20-meter layer. In addition, there are regional peculiarities: for example, the average FI values of the phytoplankton pigments in the Sea of Azov are significantly higher than those in the Black Sea, which is associated with a higher concentration of phytoplankton in the Sea of Azov.

Keywords: phytoplankton pigment fluorescence, phytoplankton species composition, photosynthetic zone, the Black Sea, the Sea of Azov

Ссылка для цитирования: Кудинов О.Б., Суслин В.В., Ли Р.И., Рябоконт Д.А. Особенности профилей флуоресценции и видового состава фитопланктона в Черном и Азовском морях // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 4. С. 75–86. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-6

For citation: Kudinov O.B., Suslin V.V., Lee R.I., Ryabokon D.A. Features of Fluorescence Profiles and Species Composition of Phytoplankton in the Black Sea and the Sea of Azov. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 4, 75–86.

doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-6

1. Введение

Фитопланктон — живая, постоянно изменяющаяся субстанция, которая имеет разный набор пигментов, зависящий не только от видового состава фитопланктона, но и от внешних условий: температуры среды, концентрации минеральных веществ в морской воде, спектрального состава света и его интенсивности. Возможность определения вертикальных профилей концентрации различных отделов фитопланктона по синхронным измерениям интенсивности флуоресценции (ИФ) фитопланктона в различных спектральных каналах, а также по спектру выходящей из толщи воды яркости моря — по коэффициенту яркости моря (КЯМ), является актуальной и перспективной задачей для нескольких областей науки, таких как: физиология фитопланктона, оптика моря, дистанционное зондирование в видимом диапазоне спектра, экология морских экосистем и др. Получение данных КЯМ обеспечивается оптическими сканерами, установленными на спутниках дистанционного зондирования Земли. Эти данные используются для алгоритмов восстановления видового и размерного состава фитопланктона [1, 2], активно развивающихся в настоящее время. В работах [1, 3–13] на основе связи между спектральными характеристиками первичных гидрооптических характеристик, полученных по спутниковым данным, и различными отделами фитопланктона предпринята попытка идентификации видового состава фитопланктона. Однако КЯМ формируется только верхним слоем моря, который соответствует приблизительно первой оптической толщине, а следовательно, данные дистанционного зондирования характеризуют только этот слой. Поэтому совместный анализ вертикальных профилей спектров ИФ фитопланктона и его видового состава, а также в перспективе и спутникового продукта КЯМ является перспективной задачей, решение которой позволит восстановить трёхмерную структуру видового состава фитопланктона во всём слое фотосинтеза. Подход к восстановлению первичных гидрооптических характеристик Чёрного моря апробирован в работе [14].

Цель работы: выявление региональных особенностей вертикальных профилей ИФ пигментов фитопланктона — f -параметров: хлорофилла- a , возбуждаемого в синей f -Chl(blue) и в красной f -Chl(red) областях спектра, фикоцианина f -PC, фикоэритрина f -PE и бета-каротина f - β -carotene; в выполнении анализа соотношений этих данных между собой и с данными прямых измерений видового состава фитопланктона. Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие задачи.

Задача 1. Выполнить анализ вертикальных профилей всех f -параметров и концентрации клеток различных отделов фитопланктона, полученных на трёх горизонтах (0, 10 и 20 м) в Чёрном море.

Задача 2. Выполнить статистический и сравнительный анализ изменчивости вертикальных профилей всех f -параметров отдельно для Чёрного и Азовского морей в слое 0–50 и 0–10 м соответственно.

Задача 3. Выполнить совместный анализ всех вертикальных профилей f -параметров попарно на различных горизонтах для Чёрного моря, где в качестве опорного использовать вертикальный профиль f -Chl(blue).

2. Материалы и методы

Основу работы составили оптические и биологические измерения, полученные в 114 рейсе НИС «Профессор Водяницкий», который проходил с 15 сентября по 8 октября 2020 г. в Чёрном и Азовском морях в пределах территориальных вод исключительной экономической зоны Российской Федерации. В ходе рейса выполнены синхронные измерения вертикальных профилей пяти f -параметров, регистрация которых осуществлялась с использованием многоканального зондирующего измерителя флуоресценции (ФР-1), разработанного в отделе оптики и биофизики моря МГИ РАН [15]. Измерения f -параметров выполнены на 64-х станциях в зондирующем режиме до глубин 100 м в Чёрном море и до 10 м в Азовском море или до дна, когда глубина станции была менее 100 или 10 м соответственно.

Принцип работы флуориметра ФР-1 основан на запатентованном способе [16]. Регистрация ИФ различных пигментов фитопланктона (f -параметров) осуществляется квазисовместно с использованием одного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), перед входным окном которого расположен вращающийся диск со светофильтрами. Регистрируемое излучение флуоресценции, возбуждаемое на различных участках спектра, поступает на ФЭУ из одного измерительного объёма, где в каждый конкретный момент времени находится одна и та же композиция взвешенного вещества. Оцифрованные значения ИФ пересчитываются в относительные единицы, которые пропорциональны величине катодного тока ФЭУ. При пересчёте учитывается сигнал фоновой засветки (без использования возбуждающего излучения), спектральная чувствительность ФЭУ и зависимость коэффициента усиления ФЭУ от напряжения питания, благодаря чему полученные данные сопоставимы между собой. Частота регистрации данных: 2 Гц при скорости зондирования 0,2–0,25 м/с. Измерительный объём защищён от внешнего излучения световым ограждением. Параметры регистрации показаны в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Параметры регистрации *f*-параметров
Parameters for logging *f*-parameters

Пигмент	Сокращённое обозначение	Полуширина спектра возбуждения, нм	Диапазон регистрации сигнала флуоресценции, нм
Хлорофилл- <i>a</i> (синий)	<i>f</i> -Chl(blue)	450–470	672–800
Фикоцианин	<i>f</i> -PC	580–600	672–800
Хлорофилл- <i>a</i> (красный)	<i>f</i> -Chl(red)	610–630	672–800
Фикоэритрин	<i>f</i> -PE	525–550	600–800
β-каротин	<i>f</i> -β-carotene	450–470	490–560

Данный способ отличается от проточной цитометрии тем, что в процессе зондирования регистрируются сигналы интенсивности флуоресценции не от одиночных элементов дисперсной фазы, а интегральные сигналы флуоресценции композиции клеток фитопланктона в среде их обитания, «интегральная цитометрия». Таким образом для каждой станции синхронно были получены вертикальные профили пяти *f*-параметров.

На рис. 1 показано расположение станций для трёх вариантов выборки: станции, на которых выполнены оптические измерения вертикальных профилей ИФ фитопланктона; биологические станции, на которых был выполнен отбор проб воды для последующего определения видового состава фитопланктона; станции, на которых были выполнены биологические и оптические измерения.

Отбор проб воды для последующего качественного и количественного анализа фитопланктона производился с батометров зондирующего комплекса «OCEAN SEVEN320 PlusM», Idronaut. Горизонты, на которых отбирались пробы воды, были фиксированы: на 0, 10 и 20 м. Для определения видового и количественного состава фитопланктона пробы объёмом до 1,5 л концентрировали на воронке обратной фильтрации, оборудованной фильтром с диаметром ячеек 1 мкм до объёма 60 мл и фиксировали 2,5 мл нейтрализованного 40 % формалина [17, 18].

Подсчёт клеток, определение размерного и видового состава фитопланктона осуществлялся под световым микроскопом ЛОМО Микмед-2 с увеличением 40х–1500х крат. Расчёт объёма и биомассы клеток проводили по стандартным методикам [19].

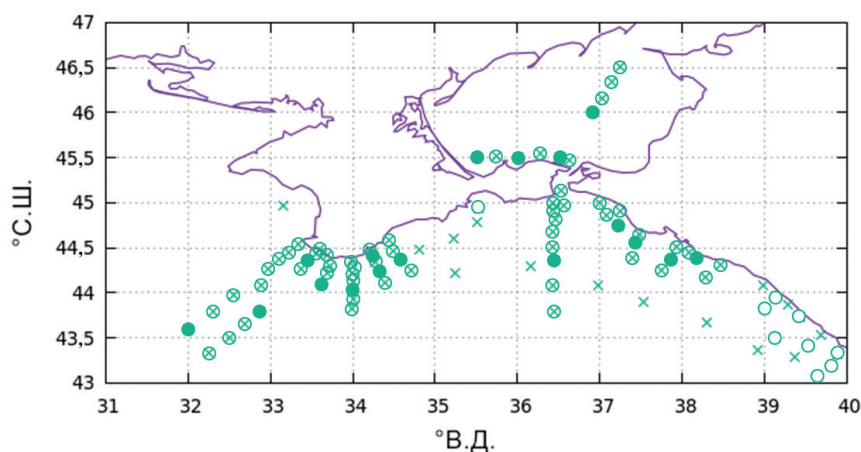


Рис. 1. Положение станций 114го рейса НИС «Профессор Водяницкий»:

- ⊗ станции, на которых выполнены измерения вертикальных профилей всех *f*-параметров;
- × станции, на которых был выполнен отбор проб на видовой состав фитопланктона;
- совместные станции, на которых выполнены измерения вертикальных профилей всех *f*-параметров и отбор проб на видовой состав фитопланктона

Fig. 1. Station positions for cruise 114 of the R/V “Professor Vodyanitsky”:

- ⊗ stations where vertical profiles of all *f*-parameters were measured;
- × stations where samples were taken to determine phytoplankton species composition;
- joint stations where the vertical profiles of all *f*-parameters were measured and samples were taken to determine phytoplankton species composition

Полученные данные использовались для решения задачи 2 и включали информацию о видовом и размерном составе фитопланктона, а также значение рассчитанной биомассы для каждого вида на трёх горизонтах Чёрного моря: 0, 10 и 20 м. В работе использованы статистические методы, которые включали анализ средних профилей флуоресценции, расчёт собственных векторов и собственных значений, как для отдельного параметра, так и совместный анализ для двух параметров на фиксированной глубине и пр. Для решения каждой из трёх вышеперечисленных задач применена своя отдельная методика. Ниже даны их описания.

Для решения **задачи 1** выбирались станции в Чёрном море, на которых выполнены синхронные наблюдения видового состава фитопланктона и *in situ* измерения пяти *f*-параметров. Анализ видового состава фитопланктона проводился на горизонтах 0, 10 и 20 м. Данные *in situ* измерений *f*-параметров выбирались в окрестности ± 1 м для каждого горизонта отбора проб и осреднялись. Такой подход обеспечивал от 3 до 30 значений каждого *f*-параметра на каждом горизонте. Для каждой *i*-станции сформирован вектор значений соответствующего *f*-параметра \vec{x}_i , состоящий из трёх компонент, каждая из которых соответствует среднему значению *f*-параметра на соответствующем горизонте, с учётом окрестности:

$$\vec{x}_i = \begin{pmatrix} d_{1,i} \\ d_{2,i} \\ d_{3,i} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Общее количество таких станций составило семнадцать, что позволило сформировать матрицу *M* для каждого *f*-параметра:

$$M = \vec{x}_1, \dots, \vec{x}_k, \quad (2)$$

где *k* — номер станции.

Вычисляем среднее значение по станциям для каждого из трёх горизонтов:

$$s_j = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k d_{j,i} \quad (3)$$

или

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Далее получаем матрицу отклонений от среднего:

$$A = \vec{x}_1 - \vec{s}, \dots, \vec{x}_k - \vec{s} \quad (5)$$

и как следствие, ковариационную матрицу *K* размером 3×3 : $K = A \cdot A^T$.

Анализ собственных значений λ_i и собственных векторов \vec{v}_i матрицы ковариации *K*: $K \cdot \vec{v}_i = \lambda_i \cdot \vec{v}_i$ и является нашей целью.

Пошаговая процедура обработки данных при выполнении **задачи 2** состояла из следующих этапов. Для Чёрного моря из данных измерений для выбранного *f*-параметра формировался вертикальный профиль по 10 горизонтам, начиная с 0 м с шагом 5 м. Для каждого горизонта в пределах $\pm 0,5$ м вычислялось среднее значение *f*-параметра $\bar{x} = x_i$, с последующим расчётом среднего профиля \bar{x} и матрицы ковариации $K = \bar{x} - \bar{x}$, где *i* — номер горизонта. На заключительном этапе находились собственные значения λ_i и собственные вектора \vec{v}_i матрицы ковариации *K*. Аналогичная процедура выполнена для измерений в Азовском море. Отличия заключались в выборе горизонтов и окрестности около них. Всего горизонтов восемь: 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10 м. Окрестность $\pm 0,1$ м.

Для решения **задачи 3** использовались вертикальные профили *f*-параметров только для Чёрного моря, состоящие из пар (*x_i*, *y_i*): *f*-Chl(blue) vs *f*-PE, *f*-Chl(blue) vs *f*-PC, *f*-Chl(blue) vs *f*-Chl(red) и *f*-Chl(blue) vs *f*-β-carotene для фиксированного горизонта. В качестве опорного использовался профиль *f*-Chl(blue). Всего было 10 горизонтов, начиная с 0 м с шагом 5 м. Для каждого горизонта в пределах ± 1 м вычислялось среднее значение *f*-параметра $\langle x \rangle$, $\langle y \rangle$ и проводился анализ на собственные значения ковариационной матрицы *K* размером 2×2 ($K \cdot \vec{v}_i = \lambda_i \cdot \vec{v}_i$) на отдельном горизонте, полученной из пар (*x_i* — $\langle x \rangle$, *y_i* — $\langle y \rangle$) для всех профилей. Чтобы определить разницу между дневными и ночными измерениями, формировались соответствующие выборки без утренних и вечерних измерений.

3. Результаты и обсуждение

Задача 1. Лабораторный анализ проб воды, суммарно для всех станций, показал наличие 113 видов фитопланктона и внутривидовых таксонов, принадлежащих к 7-ми отделам: Miozoa (Dinophyta), Bacillariophyta, Haptophyta, Ochrophyta, Euglenozoa, Cercozoa, Eukaryota unsigned phylum. Исследования видового и размерного состава фитопланктона с расчётом биомассы для черноморских станций представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, на всех трёх горизонтах в рассматриваемый период времени доминировал отдел микроводорослей Dinophyta с небольшим вкладом двух отделов Bacillariophyta и Haptophyta.

Анализ вклада первого собственного вектора в изменчивость пяти f -параметров в суммарную изменчивость на трёх горизонтах на черноморских станциях представлен в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Результаты анализа собственных чисел (α_i , $i = 1-3$) ковариационных матриц, составленных для пяти f -параметров на трёх фиксированных горизонтах 0, 10 и 20 м в окрестности ± 1 м в Чёрном море

The results of eigenvalues (α_i , $i = 1-3$) analysis for covariance matrices compiled for five f -parameters at three fixed horizons of 0, 10 and 20 m in the vicinity of ± 1 m in the Black Sea

Параметры расчёта*	f -параметр				
	Chl (blue)	Chl (red)	PC	PE	β -carotene
λ_1	0,106	0,373	0,00305	0,0798	2,34
λ_2	0,014	0,015	0,00087	0,0144	0,12
λ_3	0	0,002	0,00002	0,0004	0,01
$\varepsilon, \%$	88	96	77	84	95

*N = 17, N — количество станций.

Расчёты выполнялись по формуле

$$\varepsilon = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}. \quad (6)$$

Результат анализа показал, что 80 % и более изменчивости описывается первым собственным вектором. Результаты расчёта ε хорошо согласуются с данными измерений вклада в биомассу трёх доминирующих отделов фитопланктона (см. рис. 2 и табл. 2). Учитывая, что пигментный состав упомянутых выше микроводорослей близок друг другу [20], значения ε оказались ожидаемыми. Таким образом, в начале осени 2020 года в северной части центрального и восточного районов Чёрного моря 80 % вертикальной изменчивости пяти f -параметров на трёх фиксированных горизонтах объясняется первым собственным числом, что хорошо согласуется с доминированием одного отдела микроводорослей Dinophyta и его изменчивостью.

Задача 2. На рис. 3 и 4 показаны средние профили пяти f -параметров для Чёрного и Азовского морей соответственно. На рис. 3 построены профили для двух выборок: оптические станции (А-выборка), где производились зондирования флуориметром ФР-1 и станции, где одновременно производились оптические и биологические исследования (KL-выборка). Как видно средние профили с учётом среднеквадратичного отклонения (СКО) практически совпадают. Таким образом, в первом приближении выводы, полученные только для KL-выборки (а она более узкая по охвату станций) можно распространить на все черноморские станции. Средние профили пяти f -параметров в Азовском море с учётом СКО можно считать однородными.

Как видно из рис. 3, средняя величина сигнала флуоресценции для четырёх из пяти f -параметров приблизительно одна и та же. Величина флуоресценции фикоцианина на порядок меньше остальных. В целом профиль однородный. СКО составляют 10–20 % от среднего значения для всех глубин. Исключение

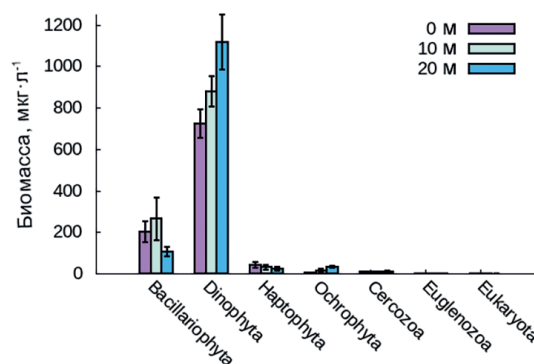


Рис. 2. Среднее значение биомассы и среднеквадратичное отклонение (мкг/л) на трёх горизонтах по всему массиву станций, выполненных в Чёрном море

Fig. 2. The average value of biomass and the standard deviation ($\mu\text{g/l}$) at three horizons for the entire array of stations in the Black Sea

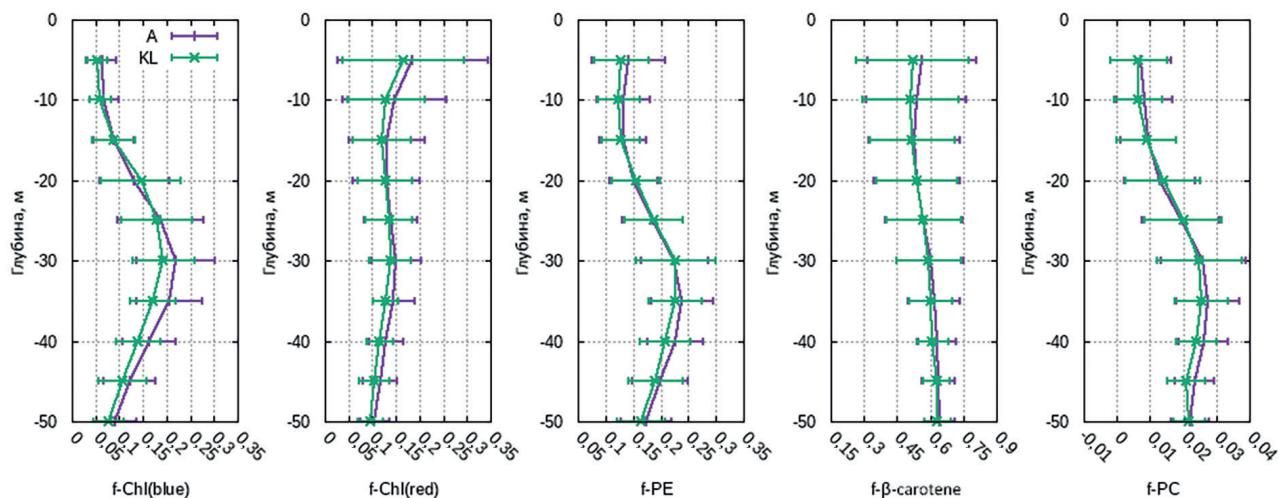


Рис. 3. Средние профили для пяти f -параметров (f -Chl(blue), f -Chl(red), f -PC, f -PE, f -β-carotene, слева на право) двух выборок: А — где проводились оптические измерения; KL — где одновременно производились оптические и биологические измерения. Легенда, которая приведена на левом рисунке, соответствует для всех f -параметров

Fig. 3. Average profiles for five f -parameters (f -Chl(blue), f -Chl(red), f -PC, f -PE, f -β-carotene, from left to right) of two samples: А — stations where optical measurements were performed; KL — stations where simultaneous optical and biological measurements were performed. The legend shown in the left figure is valid for all f -parameters

наблюдается для СКО f -β-carotene, которое заметно уменьшается с глубиной. Для Чёрного моря как минимум для трёх f -параметров (f -Chl(blue), f -PC, f -PE) СКО имеет абсолютный максимум, расположенный на глубинах 25–35 м. В Чёрном и Азовском морях СКО для профиля f -β-carotene уменьшается с глубиной.

Результаты анализа ковариационных матриц для каждого из пяти f -параметров представлены на рис. 5–7. На рис. 5 представлены расчёты вклада первого и первых двух собственных векторов соответственно в описание суммарной изменчивости каждого f -параметра как функции глубины для Чёрного и Азовского морей. Расчёты выполнены по формулам:

$$\varepsilon_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k} \text{ и } \varepsilon_2 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k},$$

где k — это число горизонтов.

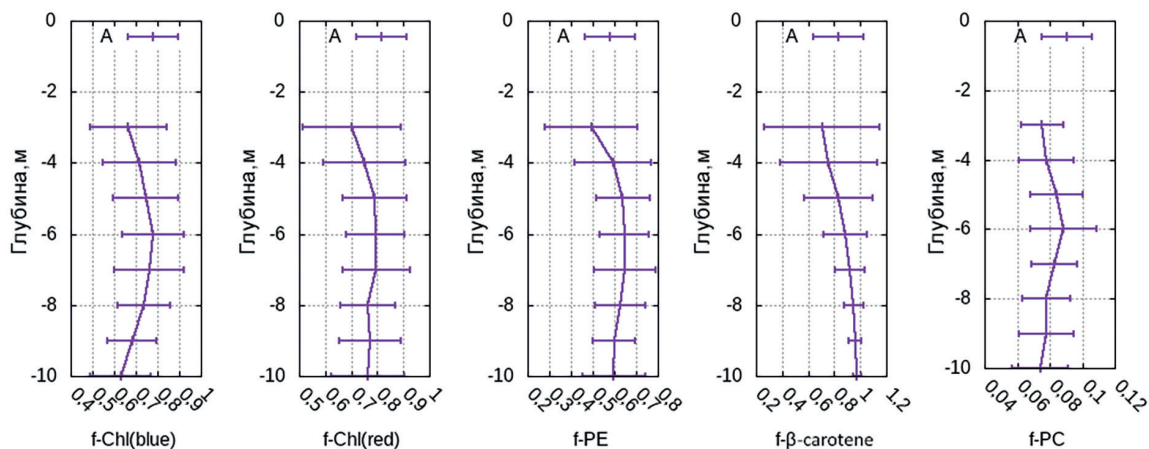


Рис. 4. Средние профили для пяти f -параметров в Азовском море по всем станциям для А-выборки, где были выполнены оптические измерения

Fig. 4. Average profiles for five f -parameters in the Sea of Azov for all stations for the A-sample where optical measurements were performed

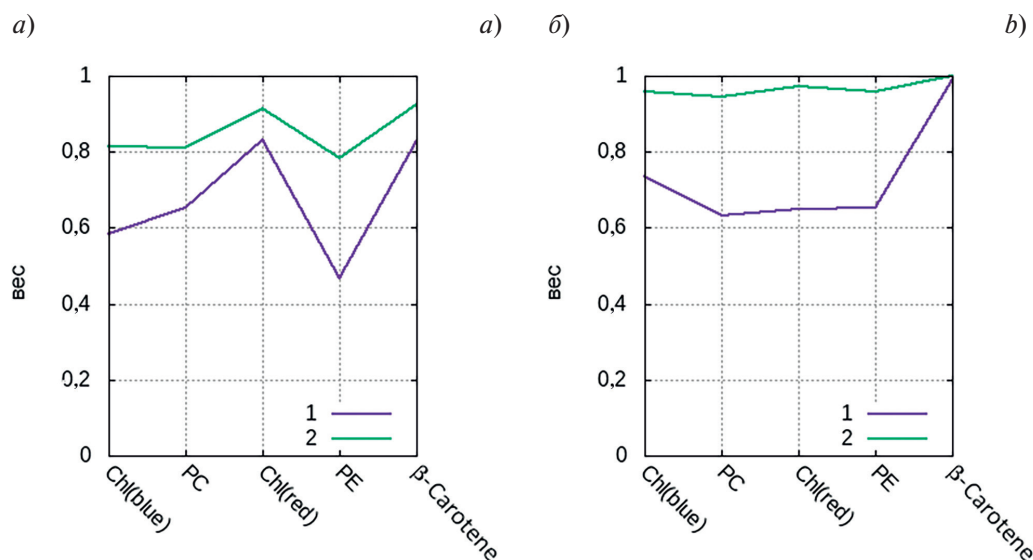


Рис. 5. Процент описания изменчивости профиля каждого из пяти f -параметров (1, ε_1) первым и (2, ε_2) двумя первыми собственными векторами в (а) Чёрном и (б) Азовском морях

Fig. 5. The percentage of profile variability description for each of the five f -parameters (1, ε_1) by the first eigenvector and (2, ε_2) by first two eigenvectors in (a) the Black Sea and (b) the Sea of Azov

Результаты анализа ковариационных матриц для каждого из пяти f -параметров подтверждают, что для описания изменчивости по глубине на уровне 75 % нужно использовать два первых собственных вектора для f -Chl(blue), f -PC, f -PE в Чёрном море и f -Chl(red), f -PC, f -PE в Азовском море. И только изменчивость f -β-carotene хорошо описывается первым собственным вектором. Минимальные вариации из рассматриваемого диапазона глубин (0–50 м) в Чёрном море для всех пяти f -параметров наблюдаются на 50 м. В Азовском море первый собственный вектор для всех пяти f -параметров не зависит от глубины (кроме f -β-carotene).

Резюмируя результаты, полученные для Чёрного моря, можно утверждать:

- для вертикальных профилей f -Chl(blue), f -PC, f -PE описание 80 % изменчивости обеспечивается минимум двумя первыми собственными векторами;
- для вертикальных профилей f -Chl(red) и f -β-carotene достаточно первого собственного вектора, чтобы обеспечить описание на таком же уровне изменчивости.

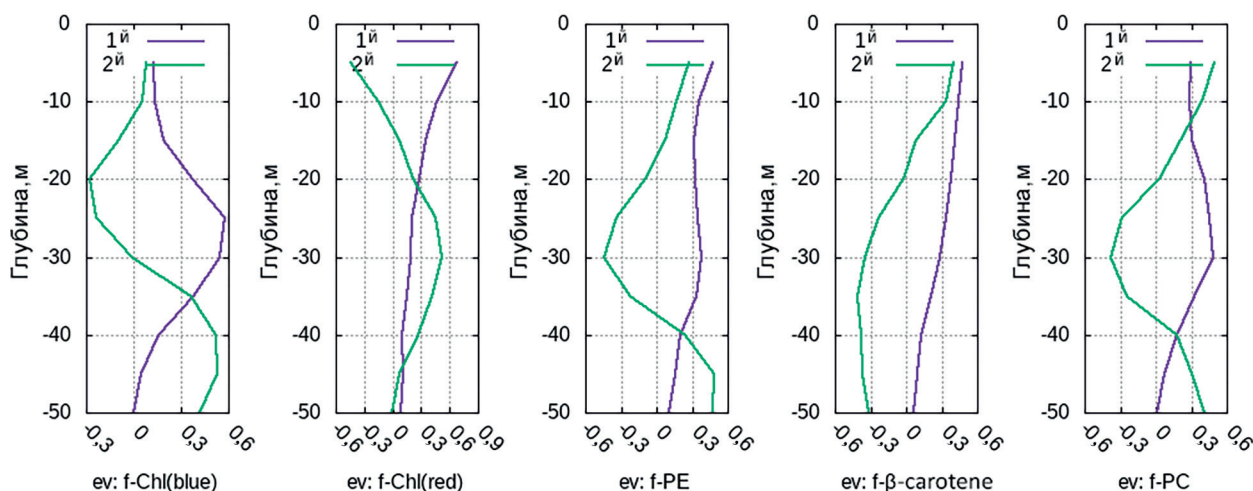


Рис. 6. Два первых собственных вектора для пяти профилей f -параметров в Чёрном море

Fig. 6. The first two eigenvectors for five f -parameter profiles in the Black Sea

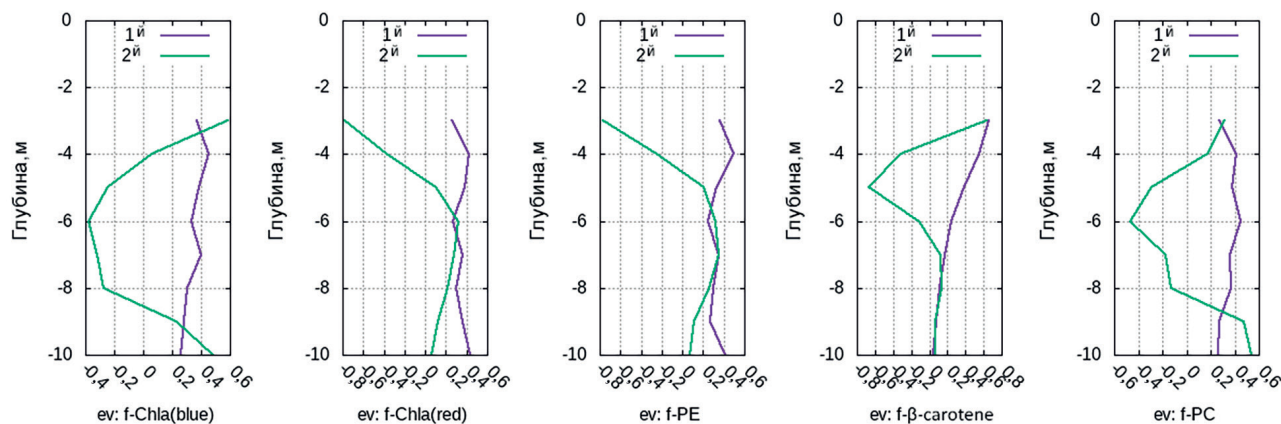


Рис. 7. Два первых собственных вектора для профилей f -параметров в Азовском море

Fig. 7. The first two eigenvectors for f -parameter profiles in the Sea of Azov

Исходя из выше сказанного, с учётом результатов, полученных при решении задачи 1, можно предположить, что изменчивость содержания пигментов в микроводорослях с глубиной ниже 20 м имеет более сложный характер. Поэтому анализ видового состава фитопланктона в рассматриваемый сезон необходимо делать до глубин нижней границы слоя фотосинтеза.

Для Азовского моря:

- первая гармоника однородна по глубине за исключением f - β -carotene, для последней она заметно уменьшается от поверхности до дна;

- на глубине 5–6 м наблюдается максимум изменчивости второй гармоники для всех пяти f -параметров.

Сравнение профилей ИФ пигментов фитопланктона в Чёрном (0–50 м) и Азовском (0–10 м) морях показывает, что средние значения всех f -параметров для Чёрного моря существенно меньше, чем для Азовского моря (рис. 3–4). Эта разница объясняется более высокой трофностью вод Азовского моря [21, 22]. Кроме того, 80 % уровень изменчивости профилей для трёх f -параметров в Чёрном море и четырёх в Азовском море описываются двумя первыми собственными векторами ковариационной матрицы, что, по-видимому, связано с изменением видового состава фитопланктона с глубиной.

Задача 3. На рис. 8 представлены две выборки черноморских профилей пяти f -параметров: в верхней части — профили, полученные в дневное время суток; в нижней — в ночное время суток. Период сумерек исключался. Для удобства сравнения профиль каждого фиксированного f -параметра выполнен в одних и тех же шкалах как для дневной выборки, так и для ночной. На первый взгляд, помимо увеличения ИФ пигментов фитопланктона в ночное время другие существенные отличия между ночными и дневными профилями не наблюдаются.

Чтобы выявить особенности (если они имеют место) между поведением профилей f -параметров для дневных и ночных выборок, проделана следующая процедура. На каждом горизонте сформирована ковариационная матрица, состоящая из двух f -параметров. В качестве опорного параметра при расчёте такой матрицы использовался f -Chl(blue) совместно с другим параметром, который менялся. Очевидно, что такие матрицы размером 2×2 имеют два собственных вектора. Анализ угла между первым собственным вектором и направлением, связанным с положительной изменчивостью f -Chl(blue) в конкретной выборке, как функции глубины и пары f -параметров представлены на рис. 9. Физический смысл данного параметра состоит в том, что величина угла характеризует коэффициент корреляции между двумя f -параметрами: если угол стремится к нулю, то коэффициент корреляции стремится к единице — связь сильная, и если он близок к 90° , то коэффициент корреляции стремится к нулю — связь отсутствует.

Анализ угла как функции глубины между первым собственным вектором ковариационной матрицы двух f -параметров и направлением, связанным с положительной изменчивостью f -Chl(blue) в конкретной выборке, продемонстрировал следующее:

- отсутствие различия между дневными и ночными выборками (за исключением пары f -Chl(blue) и f - β -carotene);
- усиление вклада f -Chl(blue) в первый собственный вектор с глубиной со всеми f -параметрами.

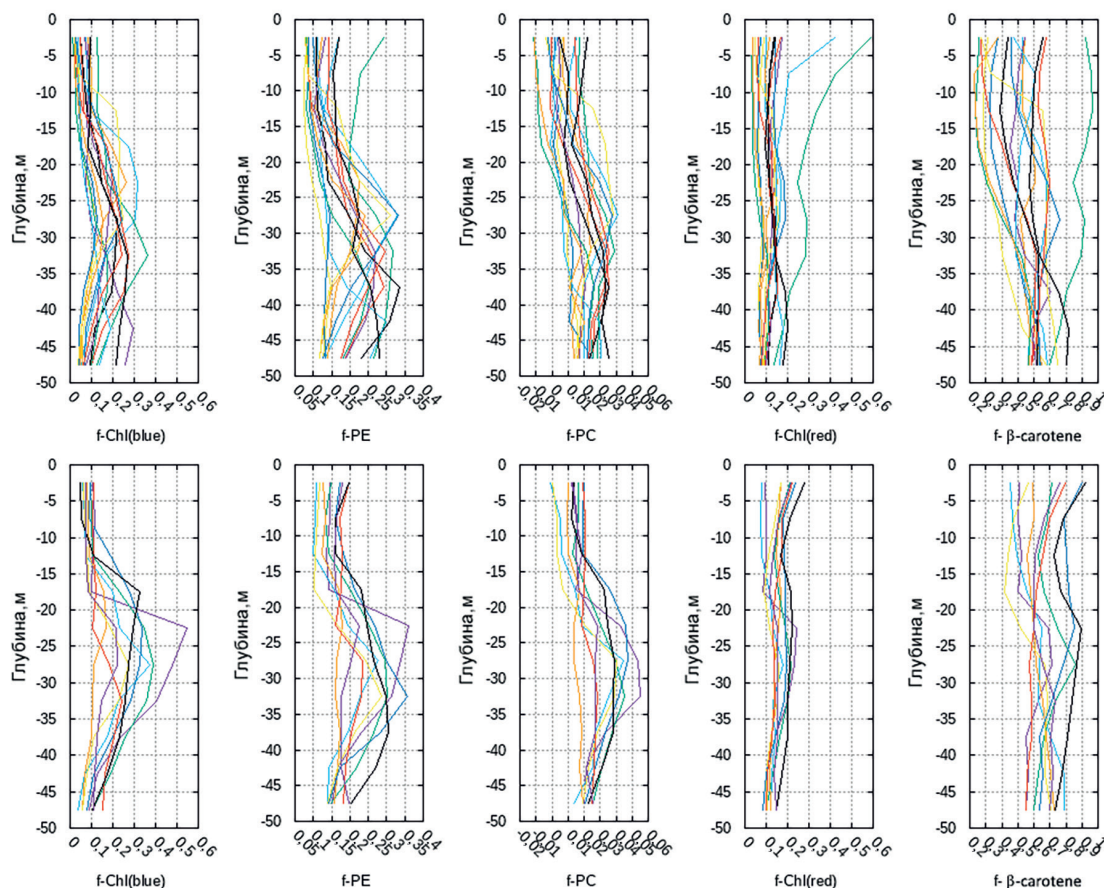


Рис. 8. Профили пяти f -параметров для дневных (верхний ряд) и ночных (нижний ряд) съёмок в Чёрном море

Fig. 8. Profiles of five f -parameters for daytime (top row) and nighttime (bottom row) studies in the Black Sea

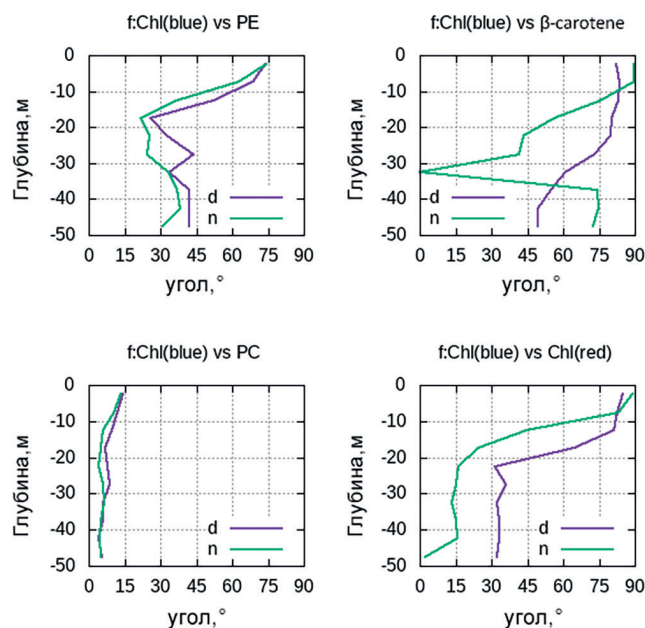


Рис. 9. Изменение угла между первым собственным вектором ковариационной матрицы двух f -параметров и направлением изменчивости f -Chl(blue) как функции от глубины в Чёрном море для дневных (d) и ночных (n) профилей

Fig. 9. The change in the angle between the first eigenvector of the covariance matrix for two f -parameters and the direction of f -Chl(blue) variability as a function of depth in the Black Sea for daytime (d) and nighttime (n) profiles

4. Заключение

Суммируя результаты решения всех трёх задач, имеем:

- вертикальная структура профилей ИФ пигментов фитопланктона имеет свои особенности и по-разному ведёт себя в Азовском и Чёрном морях;
- анализ ковариационных матриц профилей ИФ пигментов фитопланктона в верхнем 50-метровом слое Чёрного моря указывает, что с глубиной происходит изменение пигментного состава фитопланктона, что может быть связано со сменой его видового состава;
- в начале осени 2020 г. в северной части центрального и восточного районов Чёрного моря описание изменчивости вертикальных профилей f -Chl(blue), f -PC, f -PE на уровне 80 % обеспечивается минимум двумя первыми собственными векторами, а для вертикальных профилей f -Chl(red) и f - β -carotene достаточно первого собственного вектора, что хорошо согласуется с прямыми наблюдениями видового состава фитопланктона, свидетельствующие о доминировании одного отдела фитопланктона в 20-метровом слое;
- описание изменчивости профилей в верхнем 50-и метровом слое в Чёрном море и в 10-метровом слое Азовского моря на том же уровне необходимо использование уже двух первых собственных векторов, что может быть объяснено изменением видового состава фитопланктона с глубиной.
- для целого ряда обнаруженных свойств профилей f -параметров их объяснение остаётся затруднительным из-за отсутствия прямых измерений видового состава фитопланктона. Поэтому при проведении совместных биооптических измерений с учётом трудоёмкости биологических измерений расчёт видового состава фитопланктона желательно проводить до нижней границы слоя фотосинтеза с шагом 10 м в Чёрном море и с шагом 2 м — в Азовском море, особенно в тёплый сезон — в период сформировавшегося термоклина;
- полученные результаты показали, что разработанный в МГИ автономный зондирующий многоканальный измеритель флуоресценции ФР-1 является информативным и потенциально перспективным измерительным прибором для исследования видового состава фитопланктона *in situ*.

Развитие данного исследования видится в проведении серии лабораторных измерений сигналов интенсивности флуоресценции рассматриваемых в работе f -параметров для отдельно взятых монокультур фитопланктона, типичных для Чёрного моря, выращенных в контролируемых фиксированных условиях освещения, питания, температурного режима.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания:

по теме FNNN-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология», ФГБУН ФИЦ МГИ);

по теме FNNN-2021-0004 Центр коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» (ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ);

по теме № 121041400077-1 «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ).

Funding

The study was carried out within the framework of the state assignment of MHI RAS on themes No. FNNN-2021-0003 and IBSS No.FNNN-2021-0004, No.121041400077-1.

Литература

1. IOCCG. Phytoplankton Functional Types from Space. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, 2014. No. 15. IOCCG. Dartmouth, Canada.
2. Efimova T., Churilova T., Skorokhod E. et al. Effect of water trophic status on bio-optical properties and productive characteristics of phytoplankton of the Black Sea coastal waters near Sevastopol // Marine Biology Research. 2023. P. 1–11. doi:10.1080/17451000.2023.2203502.
3. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Пряхина С.Ф. Региональная методика восстановления первичных гидрооптических характеристик черного моря по данным цветового сканера SEAWIFS // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. № 26–2. С. 204–223.
4. Suslin V., Pryahina S., Churilova T., Slabakova V. The black sea IOPS based on SEAWIFS data // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2016. С. 1003531. doi:10.1117/12.2248332

5. Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П., Георгиева Л.В. Изменчивость биооптических характеристик фитопланктона в Черном море // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 2. С. 208–221.
6. Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П., Георгиева Л.В., Брянцева Ю.В. Биооптические характеристики фитопланктона Черного моря в период зимне-весеннего «цветения» // *Морской гидрофизический журнал*. 2001. № 5. С. 28–40.
7. Берсенева Г.П., Чурилова Т.Я. Хлорофилл и оптические характеристики фитопланктона в шельфовых водах Черного моря у побережья Крыма // *Морской гидрофизический журнал*. 2001. № 2. С. 44–58.
8. Салюк П.А., Степочкин И.Е., Букин О.А. и др. Определение концентрации хлорофилла-*a* спутниковыми радиометрами MODIS-Aqua и VIIRS в Восточной Арктике и Беринговом море // *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 1–2. С. 161–172. doi:10.7868/S0205961416010115
9. Салюк П.А., Степочкин И.Е. Проблема разделения вкладов фитопланктона и окрашенных растворенных органических веществ в спектральные величины яркости выходящего из воды излучения // *Труды X Юбилейной Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод»*. 2019. С. 49–54.
10. Karabashev G.S., Evdoshenko M.A. Narrowband shortwave minima in spectra of backscattered light from the sea obtained from ocean color scanners as a remote indication of algal blooms // *Oceanologia*. 2016. 58(4). P. 279–291. doi:10.1016/j.oceano.2016.05.001
11. Roy S., Sathyendranath S., Bouman H. et al. The global distribution of phytoplankton size spectrum and size classes from their light-absorption spectra derived from satellite data // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Т. 139. С. 185–197. doi:10.1016/j.rse.2013.08.004
12. Sathyendranath S., Gota G., Stuart V. et al. Remote sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches // *International Journal of Remote Sensing*. 2001. Т. 22, № 2–3. С. 249–273. doi:10.1080/014311601449925
13. Sathyendranath S., Stuart V., Platt T. et al. Remote sensing of ocean colour: Towards algorithms for retrieval of pigment composition // *Indian Journal of Marine Sciences*. 2005. Т. 34, № 4. С. 333–340.
14. Suslin V., Slabakova V., Churilova T. 4D structure of bio-optical characteristics of the upper 70 m layer of the Black Sea: Bio-Argo floats and ocean color scanners // *Total Environment Research Themes*. 2022. Vol. 3–4. P. 100006. doi:10.1016/j.totert.2022.100006
15. Кудинов О.Б., Мартынов О.В., Ли Р.И. Зондирующий спектральный измеритель флуоресценции и рассеяния, испытания в лабораторных и полевых условиях // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 2. С. 82–87. doi:10.7868/S2073667320020100
16. Патент № 2775809 С1 Российская Федерация, МПК G01N21/64. Способ определения концентрации фотопигментов фитопланктона, растворённого органического вещества и размерного состава взвеси в морской воде in situ: № 2021124358: заявл. 13.08.2021; опубл. 11.07.2022 / М.Е.Г. Ли, О.Б. Кудинов; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН».
17. Сорокин Ю.И. К методике концентрирования проб фитопланктона // *Гидробиологический журнал*. 1979. Т. 15. С. 71–76.
18. Суханова И.Н. Концентрирование фитопланктона в пробе // *Современные методы количественной оценки распределения морского планктона*. М.: Наука, 1983. С. 97–105.
19. Киселев И.А. Методы исследования планктона // *Жизнь пресных вод СССР*. Ленинград: АН СССР, 1956. Т. 4. С. 183–270.
20. Чурилова Т.Я., Финенко З.З., Акимов А.И. Пигменты микроводорослей // *Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования* / под ред. Ю.Н. Токарева, З.З. Финенко, Н.В. Шадрина. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 301–320.
21. Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Скороход Е.Ю. Спектральные показатели поглощения света взвешенным веществом и растворенным органическим веществом в Азовском море // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 73–83. doi:10.48612/fpg/exlp-9vtp-phu8
22. Churilova T., Suslin V., Krivenko O. et al. Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the Black Sea: Seasonality and parametrization // *Frontiers in Marine Science*. 2017. Т. 4. С. 90. doi:10.3389/fmars.2017.00090

References

1. IOCCG. Phytoplankton Functional Types from Space. Sathyendranath, S. (ed.), *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group*, 2014, 15. IOCCG. Dartmouth, Canada.
2. Efimova T., Churilova T., Skorokhod E. et al. Effect of water trophic status on bio-optical properties and productive characteristics of phytoplankton of the Black Sea coastal waters near Sevastopol. *Marine Biology Research*. 2023, 1–11. doi:10.1080/17451000.2023.2203502
3. Suslin V.V., Churilova T.Y., Pryakhina S.F. Regional methodology of restoration of the primary hydrooptical characteristics of the Black Sea from color data primary hydro-optical characteristics of the Black Sea based on the data of the color SEAWIFS scanner. *Ekologicheskaya Bezopasnost Pribrezhnoi i Shelfovoi Zon i Kompleksnoe Ispolzovanie Resursov Shelfa*. 2012, 26–2, 204–223 (in Russian).

4. Suslin V., Pryahina S., Churilova T., Slabakova V. The black sea IOPS based on SEAWIFS data. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. 2016, 1003531. doi:10.1117/12.2248332
5. Churilova T.Y., Berseneva G.P., Georgieva L.V. Variability of the biooptical characteristics of phytoplankton in the Black Sea. *Oceanology*. 2004, 44, 2, 192–204.
6. Churilova T.Y., Berseneva G.P., Georgieva L.V., Bryantseva Y.V. Bio-optical characteristics of phytoplankton of the Black Sea during the winter-spring “blooming” period. *Morskoi Gidrofizicheskii Zhurnal*. 2001, 5, 28–40 (in Russian).
7. Berseneva G.P., Churilova T.Y. Chlorophyll and optical characteristics of phytoplankton in shelf waters of the Black Sea off the coast of Crimea. *Morskoi Gidrofizicheskii Zhurnal*. 2001, 2, 44–58 (in Russian).
8. Salyuk P.A., Stepochkin I.E., Bukin O.A. et al. Definition chlorophyll-*a* concentration by MODIS-Aqua and VIIRS satellite radiometers at Eastern Arctic and Bering Sea. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2016, 1–2, 161–172. doi:10.7868/S0205961416010115 (in Russian).
9. Salyuk P.A., Stepochkin I.E. The problem of separation of phytoplankton and coloured dissolved organic matter contributions into remote sensed reflectance spectrum of seawater. *Proceedings of X Anniversary All-Russia Conference «Current problems in optics of natural waters» (ONW'2019)*. 2019. P. 49–54 (in Russian).
10. Karabashev G.S., Evdoshenko M.A. Narrowband shortwave minima in spectra of backscattered light from the sea obtained from ocean color scanners as a remote indication of algal blooms. *Oceanologia*. 2016, 58(4), 279–291. doi:10.1016/j.oceano.2016.05.001
11. Roy S., Sathyendranath S., Bouman H. et al. The global distribution of phytoplankton size spectrum and size classes from their light-absorption spectra derived from satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 2013, 139, 185–197. doi:10.1016/j.rse.2013.08.004
12. Sathyendranath S. et al. Remote sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches. *International Journal of Remote Sensing*. 2001, 22, 2–3, 249–273. doi:10.1080/014311601449925
13. Sathyendranath S. et al. Remote sensing of ocean colour: Towards algorithms for retrieval of pigment composition. *Indian Journal of Marine Sciences*. 2005, 34, 4, 333–340.
14. Suslin V., Slabakova V., Churilova T. 4D structure of bio-optical characteristics of the upper 70 m layer of the Black Sea: Bio-Argo floats and ocean color scanners. *Total Environment Research Themes*. 2022, 3–4, 100006. doi:10.1016/j.totert.2022.100006
15. Kudinov O.B., Martynov O.V., Lee R.I. Sounding spectral meter of fluorescence and light scattering: laboratory and field testing. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020, 13, 2, 82–87. doi:10.7868/S2073667320020100
16. Patent No. 2775809 C1 Russian Federation, MPC G01N21/64. Method for determination of phytoplankton photopigment concentration, dissolved organic matter and suspended sediment size composition in seawater in situ: No. 2021124358: заявл. 13.08.2021: opubl. 11.07.2022 / M.E.G. Li, O.B. Kudinov; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр “Морской гидрофизический институт РАН” (in Russian).
17. Sorokin Y.I. To the methodology of phytoplankton sample concentration. *Gidrobiologicheskii Zhurnal*. 1979, 15, 71–76 (in Russian).
18. Sukhanova I.N. Concentration of phytoplankton in the sample. *Sovremennye Metody Kolichestvennoi Otsenki Raspredele-niya Morskogo Planktona*. M., Nauka, 1983. 97–105 (in Russian).
19. Kiselev I.A. Methods of plankton research. *Zhizn Presnykh Vod SSSR*. Leningrad, AN SSSR, 1956, 4, 183–270 (in Russian).
20. Churilova T.Y., Finenko Z.Z., Akimov A.I. Microalgal pigments. Microalgae of the Black Sea: Problems of biodiversity conservation and biotechnological utilization / *NAN Ukrainy, Institut biologii yuzhnykh morei. Sevastopol, EKO-SI-Gidrofizika*, 2008, 301–320 (in Russian).
21. Churilova T.Y., Efimova T.V., Moiseeva N.A., Skorokhod E. Yu. Spectral indices of light absorption by suspended matter and dissolved organic matter in the Sea of Azov // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 3, 73–83. doi:10.48612/fpg/ex1p-9vtp-phu8 (in Russian).
22. Churilova T., Suslin V., Krivenko O. et al. Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the Black Sea: Seasonality and parametrization. *Frontiers in Marine Science*. 2017, 4, 90.

Об авторах

СУСЛИН Вячеслав Владимирович, кандидат физико-математических наук, РИНЦ AuthorID: 825673, ORCID: 0000-0002-8627-7603, Scopus AuthorID: 6602501867, WoS ResearcherID: B-4994-2017, slava.suslin@mhi-ras.ru

КУДИНОВ Олег Борисович, РИНЦ AuthorID: 861503, Scopus AuthorID: 57201072321, kudinov_ob@mhi-ras.ru

РЯБОКОНЬ Данил Андреевич, РИНЦ AuthorID: 1144660, akronis_white@mail.ru

ЛИ Раиса Игнатьевна, РИНЦ AuthorID: 937587, ORCID ID: 0000-0002-2482-0105, raisa-lee@yandex.ru