

УДК 551.464.797.9

© Е. А. Штрайхерт^{*1}, С. П. Захарков¹, П. А. Салюк¹, В. И. Пономарев¹, В. А. Артемьев², Д. И. Глуховец^{2,3},
А. А. Латушкин⁴, 2022

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, ул. Балтийская, д. 43, г. Владивосток, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, 141700, Институтский переулок, д. 9, г. Долгопрудный, Россия

⁴Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, Россия

*E-mail: straj@poi.dvo.ru

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА-А В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ В ДЕКАБРЕ 2019 Г. — ЯНВАРЕ 2020 Г. ПО ДАННЫМ СУДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Статья поступила в редакцию 10.03.2022, после доработки 10.08.2022, принята в печать 05.09.2022

Аннотация

Получены горизонтальные и вертикальные распределения концентрации хлорофилла-а (Кхл) по маршруту 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Атлантическом океане в декабре 2019—январе 2020 г. Анализ данных наблюдений проводился для биогеохимических провинций, определяемых различными гидрометеорологическими условиями, при которых развивались фитопланктонные сообщества.

Применялось три метода измерений Кхл: стандартный экстракционный метод на пробах морской воды, флуориметрические измерения в проточной системе на ходу судна на глубине 5 м и погружные флуориметрические *in-situ* измерения на станциях. Использовались измерения температуры и солёности морской воды в проточной системе, STD зондирования и буёв АРГО, а также данные измерений оптического зонда.

Наибольшие значения Кхл в приповерхностном слое океана наблюдаются в зонах дивергенции, в системах Канарского апвеллинга (CNRY) (1,3 мг/м³) и Фолклендского (Мальвинского) течения (4,8 мг/м³), а также в проливе Дрейка (1,2 мг/м³). Наименьшие значения Кхл (0,01–0,12 мг/м³) наблюдаются в тропических, экваториальных районах и в Южно-Атлантическом субтропическом антициклоническом круговороте (SASTG) по маршруту судна.

Обнаружены вертикальные профили Кхл с отсутствующим выраженным максимумом Кхл. В районе CNRY значение Кхл мало изменялось с глубиной во всей эвфотической зоне. А в районе Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка и в основной струе Фолклендского течения наблюдались квазиоднородные профили Кхл до глубины почти в 2 раза превышающей глубину эвфотической зоны.

В профилях с выраженным локальным максимумом Кхл наибольшее значение 3,5 мг/м³ наблюдается на глубине около 12 м в районе апвеллинга на Патагонском шельфе. В других районах глубина залегания максимума Кхл (0,2–0,9 мг/м³) варьируется в широких пределах от 25 до 120 м. В западной части района SASTG обнаружены абсолютные максимумы Кхл на глубине 120 м, что ниже эвфотической зоны до 100 м.

Ключевые слова: концентрация хлорофилла-а; температура; солёность; течения; вертикальная стратификация; эвфотическая зона; буи АРГО; климатические зоны; биогеохимические провинции; Атлантический океан

© Е. А. Shtraikhert^{*1}, S. P. Zakharkov¹, P. A. Salyuk¹, V. I. Ponomarev¹, V. A. Artemiev², D. I. Glukhovets^{2,3},
A. A. Latushkin⁴, 2022

¹VI. Ilichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, 690041, Baltiyskaya Str., 43, Vladivostok, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology RAS, 117997, Nahimovsky Pr., 36, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy Per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

⁴Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

*E-mail: straj@poi.dvo.ru

Ссылка для цитирования: Штрайхерт Е.А., Захарков С.П., Салюк П.А., Пономарев В.И., Артемьев В.А., Глуховец Д.И., Латушкин А.А. Распределение содержания хлорофилла-а в Атлантическом океане в декабре 2019 г — январе 2020 г. по данным судовых измерений при различных гидрометеорологических условиях // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 3. С. 97–113. doi:10.48612/fpg/9rxr-badt-2vde

For citation: Shtraikhert E.A., Zakharkov S.P., Salyuk P.A., Ponomarev V.I., Artemiev V.A., Glukhovets D.I., Latushkin A.A. The Chlorophyll-a Content Distribution in the Atlantic Ocean in December 2019 — January 2020 according to Ship Measurements at the Different Hydrometeorological Conditions. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 3, 97–113.

doi:10.48612/fpg/9rxr-badt-2vde

THE CHLOROPHYLL-*a* CONTENT DISTRIBUTION IN THE ATLANTIC OCEAN IN DECEMBER 2019 — JANUARY 2020 ACCORDING TO SHIP MEASUREMENTS AT THE DIFFERENT HYDROMETEOROLOGICAL CONDITIONS

Received 10.03.2022; Revised 10.08.2022; Accepted 05.09.2022

Abstract

The horizontal and vertical chlorophyll-*a* concentrations (*Chl*) distributions along the ship route of 79th cruise of R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in the Atlantic Ocean in December 2019—January 2020 were obtained. Analysis of the observations was conducted for the biogeochemical provinces which were determined by means of the different hydrometeorological conditions for the phytoplankton community functioning.

Three methods of *Chl* measurements were applied: standard extraction method of the seawater samples, the fluorometer underway measurements in the flow-through water system at the depth of 5 m and *in-situ* profiling fluorometer measurements at stations. Also, measurements of the seawater temperature and salinity in the flow-through water system, the CTD and optical profiling, and ARGO floats were used.

The maximum *Chl* values in the near-surface ocean layer are observed at zones of divergence in the Canary upwelling systems (CNRY) (1.3 mg/m³) and in the Falkland (Malvinas) Current system (4.8 mg/m³) and also in the Drake Strait (1.2 mg/m³). The least *Chl* values (0.01–0.12 mg/m³) are observed in the tropical, equatorial areas and in the South Atlantic Subtropical Anticyclonic Gyre (SASTG) at the ship route.

Vertical *Chl* profiles with absence of the significant *Chl* maximum were found. In the CNRY region the *Chl* values were not changed much within the euphotic zone. While in the region of the Antarctic Circumpolar Current in the Drake Strait and in the offshore stream of the Falkland Current the quasi-homogeneous *Chl* profiles were observed in the upper layer which is almost 2 times deeper than the euphotic zone.

In the profiles with the significant local *Chl* maximum the most *Chl* value of 3.5 mg/m³ is observed at the depth about 12 m in the upwelling region on the Patagonian Shelf. In other regions the depth of *Chl* maximum localization (0.2–0.9 mg/m³) varies widely from 25 to 120 m. In the western part of the SASTG region the absolute *Chl* maxima were found at the depth of 120 m, that is deeper, than the euphotic zone which is equal to 100 m.

Keywords: chlorophyll-*a* concentration, temperature, salinity, currents, vertical stratification, euphotic zone, ARGO floats, climatic zones, biogeochemical provinces, Atlantic Ocean

1. Введение

Концентрация хлорофилла-*a* (Кхл) служит одним из основных показателей первичной биопродуктивности морских экосистем. Между Кхл и первичной продукцией фитопланктона существует взаимосвязь [1]. Фитопланктон является первым звеном пищевой цепи. Развитие фитопланктонных сообществ в океане в основном зависит от наличия биогенных элементов, условий освещённости и особенностей гидродинамических процессов. Биогенные элементы вносятся в эвфотический слой океана материковым стоком, подъёмом вод с нижележащих слоёв и поступлением атмосферного аэрозоля на поверхность океана.

Известно, что для развития фитопланктонных сообществ важным является соотношение между глубиной верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и эвфотической зоной (ЭЗ — верхний слой воды, в котором производство кислорода за счет фотосинтеза превышает его затраты на дыхание водорослей, оценивается, как глубина, на которую поступает 1 % от падающей на поверхность моря фотосинтетически активной радиации (ФАР)) [2]. Этим соотношением определяется наличие двух основных компонентов — биогенных элементов и света, необходимых для развития фитопланктона. Положение нижней границы ЭЗ варьирует в зависимости от величины ФАР, падающей на поверхность моря, и прозрачности воды. ВКС зависит от многих факторов, основные из которых — изменение температуры и солёности, ветровое перемешивание [3]. От названных условий зависит изменчивость Кхл.

Вертикальные и горизонтальные движения вод оказывают большое влияние на распространение биогенных элементов и условия освещённости для клеток фитопланктона. Вертикальные движения вод возникают при конвективном и ветровом перемешивании, апвеллингах. Апвеллинги генерируются при сгонных ветрах, в зонах дивергенций, фронтальных зонах, вихревых образованиях [4]. В зоне умеренных широт в динамике развития фитопланктона проявляются весенний и осенний пики. Весеннее цветение фитопланктона начинается при прекращении вертикального перемешивания вод, уносящего его клетки за пределы зоны фотосинтеза. Осеннее цветение начинается при конвективном и ветровом перемешивании, разрушающем слой стратификации, и поэтому способствующем подтоку биогенных элементов из нижележащих слоёв. При приближении к высокоширотным районам весенний и осенний пики развития фитопланктона сливаются в один пик [5]. В тропической зоне океана сезонные колебания температуры почти

отсутствуют, и относительно устойчивая стратификация вод в пределах зоны фотосинтеза препятствует поступлению биогенных элементов из глубинных слоёв в верхние освещённые слои. Эта зона относится к самым малопродуктивным районам Мирового океана [6].

Распределение Кхл в Атлантическом океане исследовалось многими научными группами в районах Канарского апвеллинга, Патагонского шельфа, экваториальной дивергенции, антициклонических субтропических и циклонических тропических круговоротов, а также в различных течениях: экваториальных, Фолклендском (Мальвинское), Бразильском и др. [6–12]. В России можно отметить цикл работ Ведерникова В.И., Демидова А.Б. и Копелевича О.В. по трансатлантическим разрезам, выполненным в 2000-х гг., а за границей — программу Atlantic Meridional Transect (под руководством Aiken J.), по которой с 1995 г. проводятся практически ежегодные экспедиции в основном по маршруту от Великобритании до Фолклендских островов и обратно. Для изучения изменения развития фитопланктона используют разделение океана на биогеохимические районы [13–14]. Границы районов разделения изменяются в зависимости от гидрометеорологических условий на синоптическом, сезонном и межгодовом масштабах.

Несмотря на заметный вклад в изученность биопродукционных показателей Атлантического океана по данным предшествующих экспедиций, спутниковых измерений цвета океана и биооптических буёв АРГО, задача получения новой информации о функционировании фитопланктонных сообществ, в зависимости от изменения гидрометеорологических условий на разных временных масштабах, включая изменения климата, является актуальной.

Целью исследования является характеристика горизонтального и вертикального распределения Кхл по маршруту 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» с учётом гидрометеорологических условий в Атлантическом океане в декабре 2019 г. — январе 2020 г.

2. Данные и методы

Для достижения цели исследования использовались данные экспедиционных приповерхностных и вертикальных измерений Кхл, ослабления света, температуры и солёности воды, а также вертикальные профили температуры и солёности вод буёв АРГО.

2.2. Судовые измерения

Судовые измерения выполнены на ходу судна с помощью проточной системы [15] и на станциях с помощью погружаемых гидрологических зондов.

Пробы морской воды для определения Кхл отбирались разными способами: с использованием 1) проточной системы; 2) пластиковых 5 л батометров Нискина, как отдельно опускаемых, так и входящих в систему Carousel Water Sampler; 3) ныряющего батометра, представляющего из себя толстостенную бутылку из нержавеющей стали, закрываемую резиновой пробкой. Ныряющий батометр в условиях рейса позволял отбирать пробы воды на ходу судна при волнении до 5 баллов с глубины 0–1 м. Отбор глубоководных проб осуществлялся на гидрологических станциях, т. е. способом 2.

2.2.1. Определение концентрации хлорофилла-*a* экстрактным методом

Кхл в клетках фитопланктона определялась стандартным экстрактным спектрофотометрическим методом. Этот метод основан на анализе спектров поглощения экстракта хлорофилла-*a* в 90 % ацетоне [16]. Кхл определялась по оптическим плотностям экстракта хлорофилла, измеренным на трёх длинах волн на спектрофотометре Shimadzu UV-2600, по формуле Джеффри–Хамфри [17] и приведённой в ГОСТе [18]:

$$C_{\text{хл.}a} = (11,85 * D_{664} - 1,54 * D_{647} - 0,08 * D_{630}) * \frac{V_{\text{экстр}}}{V_{\phi}},$$

где $C_{\text{хл.}a}$ — концентрация хлорофилла-*a*; D_{664} , D_{647} , D_{630} — оптическая плотность экстракта в белых на длинах волн 664, 647, 630 нм; $V_{\text{экстр}}$ — объём экстракта, находящегося в измерительной кювете; V_{ϕ} — объём профильтрованной воды в пробе.

Точность этого метода зависит от абсолютной величины $K_{\text{хл}}$ [19]. Так, например, для значений $K_{\text{хл}}$, равных 1, 0,5 и 0,1 мг/м³ ошибка их определения составляет соответственно 7 %, 15 % и 35 % от значения $K_{\text{хл}}$. Результаты определений согласно ГОСТу [18] могут быть использованы для калибровки непрямых методов оценки содержания хлорофилла-*a*.

Для этого метода проба воды объемом 0,5–1 л пропусклась через фильтры ФМНЦ (фильтр мембранный нитрат целлюлозный) с диаметром пор 0,65 мкм. Фильтр подсушивался при комнатной температуре несколько часов. Затем одна половина фильтра экстрагировалась в течение суток в холодильнике при температуре 4–5 °С для экспресс-анализа на борту судна с помощью спектрофлуориметра Cary Varian

по аналогии с методикой, использовавшейся в работе [20]. А вторая половина фильтра замораживалась и хранилась при температуре -18°C для последующей обработки в лаборатории на берегу с помощью спектрофотометра с целью валидации флуориметрических измерений Cary Varian, выполненных на борту судна.

2.2.2. Проточная система

С помощью проточной системы на ходу судна были измерены интенсивности флуоресценции хлорофилла-*a* и окрашенного растворенного органического вещества в морской воде, температура и соленость морской воды с глубины 5 метров с интервалом 5–60 с. Подробно используемая проточная система описана в работе [15]. Значения интенсивности флуоресценции хлорофилла-*a* были переведены в Кхл по данным стандартных определений экстрактным методом ($R^2 = 0,77$; $N = 53$ точки).

2.2.3. Вертикальные профили и определение глубины эвфотического слоя

Вертикальные профили температуры, солености и Кхл измерены тремя приборами: 1) гидрологический зонд SBE-911 SeaBird (далее — CTD-P) с датчиком флуоресценции SeaPoint, прикрепленный к зонду “Розетт”; 2) универсальный малогабаритный прозрачномер ПУМ-200 (далее — ПУМ) [21] с миниатюрным флуориметром Chelsea Minitracka II и датчиком температуры; 3) гидробиофизический мультипараметрический комплекс «Кондор» (далее — CTD).

Все измерения, выполненные флуоресцентными датчиками, были откалиброваны на значения Кхл, определенные стандартным экстрактным методом ($R^2 = 0,76$; $N = 87$ точек для SeaPoint; $R^2 = 0,64$; $N = 60$ точек для Chelsea Minitracka II).

Прибор ПУМ позволял измерять коэффициенты ослабления света морской водой (ϵ_0) на длине волны 530 нм, из которых с помощью модельного соотношения $Z_{eu} = 102,7 * \exp(-2,407 * \epsilon_0(530)) + 29,1$ оценивалась глубина ЭЗ (Z_{eu}) [22].

2.3. Буи АРГО

Для дополнительной информации о вертикальной структуре температуры и солёности морской воды использовались данные буёв АРГО (<http://dataselection.euro-argo.eu>).

В табл. 1 приводится информация о зондированиях буёв АРГО (дата, координаты, номер буя АРГО), данные которых взяты для рассмотрения. Для их сопоставления с данными судовых зондирований в табл. 1 также приводится информация о ПУМ- и CTD-зондированиях.

Таблица 1

Table 1

Информация о буях АРГО, данные которых использованы совместно с данными судовых зондирований, для изучения гидрологических особенностей районов исследования

Information about the ARGO floats. Their data were used together with the data of ship CTD profiling to study the hydrological features of the investigation regions

Способ зондирования	Номер буя АРГО	Дата	Широта	Долгота
Район CNRY				
Зондирование на судовой станции 13 (ПУМ, CTD-P)	—	16.12.2019	22,74°с.ш.	20,47°з.д.
Зондирование на судовой станции 15 (ПУМ, CTD-P)	—	17.12.2019	20,17°с.ш.	21,17°з.д.
АРГО	3901972	18.12.2019	24,11°с.ш.	21,37°з.д.
Район ЕС и TRA				
Зондирование на судовой станции 35 (ПУМ, CTD)	—	23.12.2019	0,0	25,97°з.д.
Зондирование на судовой станции 37 (ПУМ, CTD)	—	23.12.2019	0,8°ю.ш.	25,97°з.д.
АРГО	7900508	24.12.2019	1,54°ю.ш.	24,05°з.д.
Район SASTG				
Зондирование на судовой станции 51 (ПУМ, CTD-P)	—	01.01.2020	28,5°ю.ш.	37,58°з.д.
Зондирование на судовой станции 52 (ПУМ, CTD-P)	—	03.01.2020	30,57°ю.ш.	38,87°з.д.
АРГО	1902061	31.12.2019	29,87°ю.ш.	38,69°з.д.
Район ANTA				
Зондирование на судовой станции 63 (CTD-P)	—	17.01.2020	56,85°ю.ш.	67,14°з.д.
Зондирование на судовой станции 65 (ПУМ, CTD-P)	—	17.01.2020	58,67°ю.ш.	65,98°з.д.
АРГО	5903672	18.01.2020	56,96°ю.ш.	59,88°з.д.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Район исследований

Исследования, представленные в работе, выполнены по данным 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» после выхода из пролива Ла-Манш и до пролива Дрейка до 60° ю.ш. На рис. 1 показан район исследования и гидробиологические станции, которые были выполнены в период с 07.12.2019 по 17.01.2020 как на ходу судна, так и на гидрологических станциях.

Маршрут судна с экспедиционными исследованиями в Атлантике проходил через районы системы Канарского апвеллинга, Северо-Атлантического циклонического тропического круговорота и экваториальной области, Южно-Атлантического антициклонического субтропического круговорота, Фолклендского течения и зоны его взаимодействия с Бразильским течением, Патагонского шельфа и пролива Дрейка.

Для анализа распределения содержания хлорофилла-а вдоль маршрута судна эта область была разделена на биогеохимические провинции в соответствии с [13] (рис. 1). Подобное разделение на такие районы используется различными исследователями с небольшими модификациями [7, 8, 14, 23], поскольку границы провинций не являются фиксированными и меняются в зависимости от гидрометеорологических условий. В наших исследованиях отдельные границы изменены в соответствии с результатами работ [24, 25], в которых водные массы разделены по фронтальным разделам, а также на основе наших результатов измерений Кхл и гидрологических характеристик.

В табл. 2 приведен список анализируемых биогеохимических провинций, перечень гидробиологических станций, значения Кхл и гидрологических характеристик, а также даны особенности вертикальных профилей и глубина ЭЗ.

Рис. 1. Расположение гидробиологических станций по маршруту 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в биогеохимических провинциях: NASTG — Северо-Атлантический субтропический антициклонический круговорот; CNRY — система Канарского апвеллинга; NATRE — восточная часть Северо-Атлантического тропического циклонического круговорота; CNZ — зона между CNRY и NATRE; TRA — тропическая область Атлантики; EC — экваториальное течение; SASTG — Южно-Атлантический субтропический антициклонический круговорот; FBC — зона взаимодействия Фолклендского (Мальвинского) и Бразильского течений; FKLD — система Фолклендского течения и Патагонского шельфа; SSTC — южная субтропическая зона конвергенции; SANT и ANTA — субантарктические и антарктические воды. Красным подчеркнуты номера станций, на которых измерены вертикальные профили биооптических и гидрологических характеристик

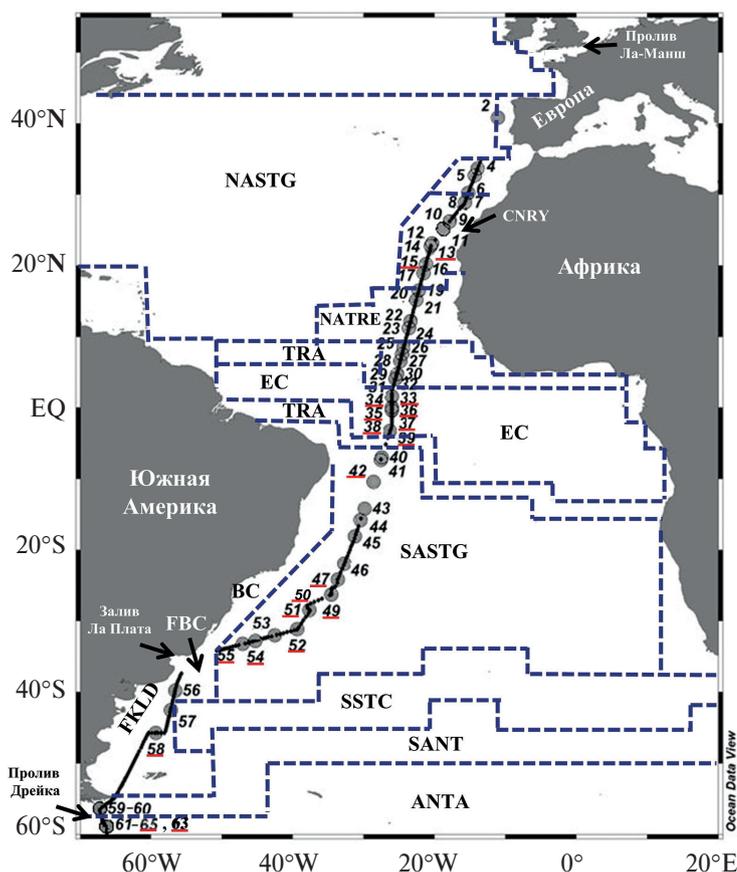


Fig. 1. Location of hydrobiological stations at the ship route of 79th cruise of R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in biogeochemical provinces: NASTG — the North Atlantic Subtropical Anticyclonic Gyre; CNRY — system of the Canary upwelling; NATRE — eastern part of the North Atlantic Tropical Cyclonic Gyre; CNZ — the zone between CNRY and NATRE; TRA — the tropical Atlantic area; EC — the Equatorial Current; SASTG — the South Atlantic Subtropical Anticyclonic Gyre; FBC — zone of interaction between the Falkland (Malvinas) and the Brazil Currents; FKLD — the Falkland Current and the Patagonian Shelf system; SSTC — the South Subtropical zone of convergence; SANT and ANTA — the Sub-Antarctic and Antarctic waters. The stations numbers where the vertical profiles were measured are underlined by red color

Таблица 2

Table 2

Биогеохимические провинции по маршруту 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», измеренные Кхл, гидрологические характеристики и особенности вертикального распределения Кхл. Знак «—» означает отсутствие измерений

Biogeochemical provinces at the ship route of 79th cruise of R/V “Akademik Mstislav Keldysh” and the measured chlorophyll-*a* concentrations (*Chl*), hydrological characteristics and *Chl* vertical distribution features

Биогеохимические провинции	Границы района по широте и номера станций	Характеристики приповерхностного слоя (Кхл, температура, солёность)	Особенности вертикального распределения Кхл и значения максимума Кхл	Глубина залегания максимума Кхл и глубина эвфотической зоны (ЭЗ)
CNRY и восточная периферия NASTG	43–18°с.ш.; 2–17 ст.	0,1–1,2 мг/м ³ 20–22 °С 35,7–36,5 ‰	квазиоднородный профиль до 60 м с Кхл 0,3 и 0,4 мг/м ³	нет выраженного максимума Кхл / ЭЗ 70–90м
CNZ	18–16°с.ш.; 19–20 ст.	1,7 мг/м ³ 22–25 °С 35–35,7 ‰	—	—
NATRE	16–10°с.ш.; 21–24 ст.	0,1–0,5 мг/м ³ 26,4–28,2 °С 35,2–36,2 ‰	—	—
TRA	9–1,5°с.ш., 1,5–5°ю.ш. 25–32 ст, 39 ст.	0,04–0,09 мг/м ³ 28,5–27,9 °С 35,2–36,2 ‰	—	—
EC	1,5°с.ш.- 1,5°ю.ш.; 33–38 ст.	0,03–0,12 мг/м ³ 27,9 °С 36,2 ‰	0,5–0,7 мг/м ³	45–75м / ЭЗ 90м
SASTG	7–34°ю.ш.; 40–55 ст.	0,01–0,08 мг/м ³ 22–28,5 °С 36–37,2 ‰	1) 0,2 мг/м ³ 2) 0,3–0,6 мг/м ³	1) 115–120м / ЭЗ 95–100м 2) 85–95м / ЭЗ 92м
FBC	34–39° ю. ш.	0,1–0,9 мг/м ³ 18–25 °С 29,5–36,9 ‰	—	—
FKLD	39–54°ю.ш.; 56–58 ст.	0,2–4,8 5–18 °С 33–34 ‰	1) квазиоднородный профиль до 100 м с Кхл ~0,6 мг/м ³ 2) 0,9 мг/м ³ 3) 3,5 мг/м ³	1) нет выраженного максимума Кхл / ЭЗ 60м 2) 25м / ЭЗ 50м 3) 12м / ЭЗ 30м
SANT	55–56,6°ю.ш.; 59–60 ст.	0,5–1,1 мг/м ³ 1–7 °С 33,9–34,1 ‰	—	—
ANTA	56,6–59°ю.ш.; 61–65 ст.	0,2–1,2 мг/м ³ 1–3 °С 34–34,3 ‰	квазиоднородный профиль со значением около 0,5 мг/м ³ до 125 м	нет выраженного максимума Кхл / ЭЗ 75м

3.2. Распределение концентрации хлорофилла-а в приповерхностном слое

На рис. 2 приводятся результаты лабораторных измерений Кхл в приповерхностном слое и измерения Кхл, температуры, солёности вод вдоль маршрута судна, выполненные в проточной системе на глубине 5 м, усредненные в интервалах 10 мин. Также на нём показано разделение на области в соответствии с выделенными биогеохимическими провинциями.

Наибольшие Кхл в приповерхностном слое для каждого из районов составляли следующие значения: в районах системы Канарского апвеллинга (CNRY) и в восточной периферии Северо-Атлантического субтропического антициклонического круговорота (NASTG) — 1,3 мг/м³, в области CNZ между восточной частью Северо-Атлантического тропического циклонического круговорота (NATRE) и CNRY — 1,7 мг/м³, в районе NATRE — 0,5 мг/м³, в тропической Атлантике (TRA) — 0,09 мг/м³, в окрестности экваториального течения (EC) — 0,12 мг/м³, в западной части Южно-Атлантического субтропического антициклонического круговорота (SASTG) — 0,08 мг/м³, в зоне взаимодействия Фолклендского и Бразильского течений (FBC) —

0,9 мг/м³, в районе системы Фолклендского течения и Патагонского шельфа (FKLD) — 4,8 мг/м³, в субантарктических водах (SANT) — 1,1 мг/м³, и антарктических водах (ANTA) — 1,2 мг/м³. Среди них наибольшие значения приходились на район FKLD. Для дальнейшего анализа отдельно рассмотрим районы с высокими Кхл (от 0,9 мг/м³) и низкими Кхл (до 0,5 мг/м³).

3.2.1. Районы с высокими значениями концентрации хлорофилла-*a*

В районе CNRY в период исследований в декабре 2019 г. маршрут судна проходил вне зоны прибрежно-Канарского апвеллинга, но периодически пересекал зоны локальных апвеллингов [11] в общей системе района CNRY. Район CNRY характеризовался температурами вод 20–22 °С и относительно высокой их солёностью 35,7–36,5 ‰.

Относительно высокое значение Кхл в области CNZ между районами CNRY и NATRE, по-видимому, являлось следствием взаимодействия Северно-Атлантического экваториального течения и Мавританского течения [23]. В области CNZ диапазон температур 22–25 °С был выше, чем в районе CNRY, а солёность 35–35,7 ‰ ниже.

В зоне FBC помимо взаимодействия Бразильского и Фолклендского течений происходит выход распреснённых вод из залива Ла-Плата [26]. В этом районе диапазон температур находился в пределах 18–25 °С, а минимальное значение диапазона солёности 29,5–36,9 ‰ было заметно снижено.

Динамика вод района FKLD характеризуется чередованием зон дивергенции (расходимость векторов системы Фолклендского течения) и конвергенции (сходимость векторов течения), соответствующих зонам апвеллинга и даунвеллинга [27], а также пересечением районов высокой биопродуктивности на Патагонском шельфе.

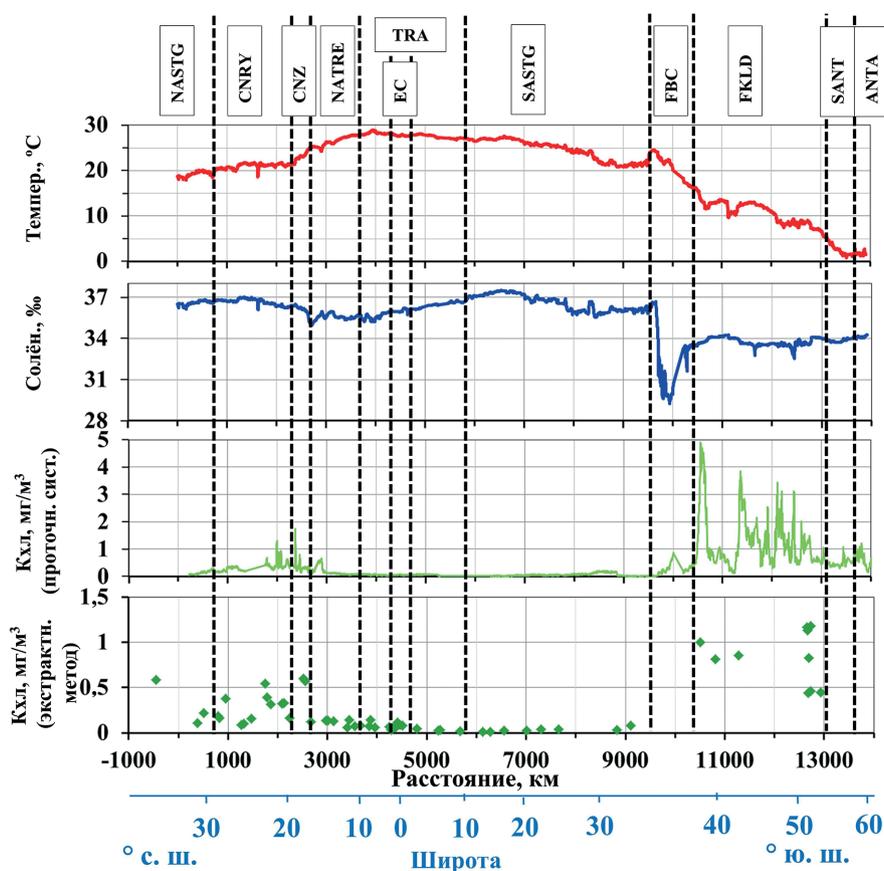


Рис. 2. Пространственное распределение Кхл (данные проточной системы — зелёная линия, данные экстрактивного метода — тёмно-зелёные ромбики), температуры (красная линия), солёности (синяя линия) в приповерхностном слое вод вдоль маршрута 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». Пунктирные линии показывают разграничение данных по биогеохимическим провинциям, обозначение которых приведено в верхнем ряду, а расшифровка названий в подписи к рис. 1.

Fig. 2. The spatial distribution of water temperature (red line), salinity (blue line), *Chl* (data of the flow-through water system are shown by the green line, data of extractive method — the dark green rhombuses) at the near-surface water layer at the ship route of 79th cruise of R/V “Akademik Mstislav Keldysh”. Dotted lines show the borders between data of biogeochemical provinces. Indications for these biogeochemical provinces are given in upper row and their explanation — in the title to fig. 1.

Субантарктический и антарктический районы (SANT и ANTA) подвержены влиянию Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), состоящего из нескольких струй [28], изменчивость положения которых может приводить к образованию зон дивергенции. Диапазон температур и солёностей в этих районах находился в пределах 1–7 °С; 33,9–34,1 ‰ и 1–3 °С; 34–34,3 ‰.

3.2.2. Районы с низкими значениями концентрации хлорофилла-а

Низкие значения Кхл в приповерхностном слое вод были выявлены в районах NATRE, TRA, ЕС, а также в SASTG (табл. 2). В экваториальном районе значения Кхл составляют 0,03 мг/м³ у границ области ЕС (1,5°с.ш. и 1,5°ю.ш.) и увеличиваются к экватору до 0,12 мг/м³ (ст. 35) за счёт дивергенции течений в этом районе [29]. Наиболее низкие значения Кхл наблюдались в районе SASTG (0,01–0,08 мг/м³).

Экваториальная и тропическая области характеризовались высокими значениями температуры и солёности вод, соответственно, около 27,9–28,5 °С и 35,2–36,9 ‰. Тёплая менее плотная вода на поверхности препятствовала обменным процессам верхних слоёв с глубинными водами, обогащёнными питательными веществами. Поэтому Кхл у поверхности в этих районах имеют низкие значения. Район SASTG также характеризовался относительно высокой солёностью вод около 36–37,2 ‰. Но температура вод при удалении от экватора постепенно снижалась, от 28,5 до 22 °С. Низкие значения Кхл в SASTG объяснимы опусканием питательных веществ и клеток фитопланктона в глубинные слои воды в результате даунвеллинга [10].

3.3. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла-а

В районе CNRY на вертикальных профилях температуры, солёности вод (судовых и АРГО), а также показателя ослабления света и Кхл верхний квазиоднородный перемешанный слой океана достигает глубины 75 м. Оптические характеристики на представленных профилях мало меняются по вертикали со средним значением Кхл 0,4 мг/м³ на ст. 13 и 0,3 мг/м³ на ст. 15 до глубины 70 м в пределах эвфотической зоны. Ниже они плавно уменьшаются до нулевых значений на глубинах около 90 м вследствие лимитации в освещённости (рис. 3).

В области ЕС в пределах ±1° по широте (ст. 33–37) на глубинах 45–75 м наблюдался максимум Кхл, достигающий значений 0,5–0,7 мг/м³. Он находится в окрестности верхней границы подповерхностного холодного противотечения Ломоносова, движущегося на восток, примерно на глубине 50–200 м [30]. Причём в районе 0,5–1°с.ш. (ст. 33, 34) этот пик располагался на глубине около 50 м, а на 0,5–1,5° ю.ш. на глубине 70–75 м.

На станции 39, расположенной по широте на 3,3°, максимум Кхл наблюдался на глубине 70 м. Он был с заметно более низким значением (около 0,2 мг/м³), чем на ст. 36 и 37, расположенных в пределах 1°ю.ш. На экваторе (ст. 35) максимум Кхл был расположен на глубине около 60 м, составляя значение около 0,5 мг/м³. Профили Кхл и показателя ослабления света практически совпадали. Это указывает на то, что причиной ослабления света водой был в основном фитопланктон.

Эти глубины залегания максимума Кхл соответствовали глубине термоклина в районах 0,5–1°с.ш. (ст. 33, 34) и 0,5–1,5°ю.ш. (ст. 36, 37, профиль буя АРГО) (рис. 3, табл. 2). Солёность вод на поверхности в области экватора по данным вертикальных профилей составляла около 35,9 ‰, увеличиваясь к 75 м до 36,3–36,6 ‰ (ст. 35, 37, АРГО) и до 36 ‰ на ст. 33. Глубже 75 м она уменьшалась и составляла на глубине 120 м 35,4 ‰ для всех рассмотренных профилей.

Вдоль экватора солнечное излучение не является ограничивающим фактором, Кхл отражает воздействие потока питательных веществ в перемешанном слое за счёт экваториального апвеллинга [31]. Он возникает под влиянием пассатных ветров и имеет сезонное проявление. Первичное цветение фитопланктона в экваториальной области отмечается в июле-августе, а вторичное — в декабре-январе, что совпадает с периодом проведения 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». Причём, как правило, вторичное цветение фитопланктона в 2 раза менее интенсивное по сравнению с первичным [32].

Вертикальные распределения Кхл в районе SASTG отличались от распределений в районе экватора заглублением максимума Кхл до глубин 85–120 м (рис. 3). Причём на станциях на западной периферии круговорота глубинный максимум Кхл (ГМХ) располагался выше (85–95 м, ст. 52, 53, 54), чем на станциях, смещённых в северо-восточном направлении (115–120 м, ст. 42, 51). Значения Кхл в максимуме периферийных станций также были выше (около 0,25–0,4 мг/м³) по сравнению со станциями (ст. 42, 51), где максимум Кхл не превышал 0,2 мг/м³. Похожие результаты получены в работе [10]. Как и для рассмотренных уже районов CNRY, ЕС профили Кхл и показателя ослабления света были схожи. Поэтому ослабление света водой определялось в основном фитопланктоном.

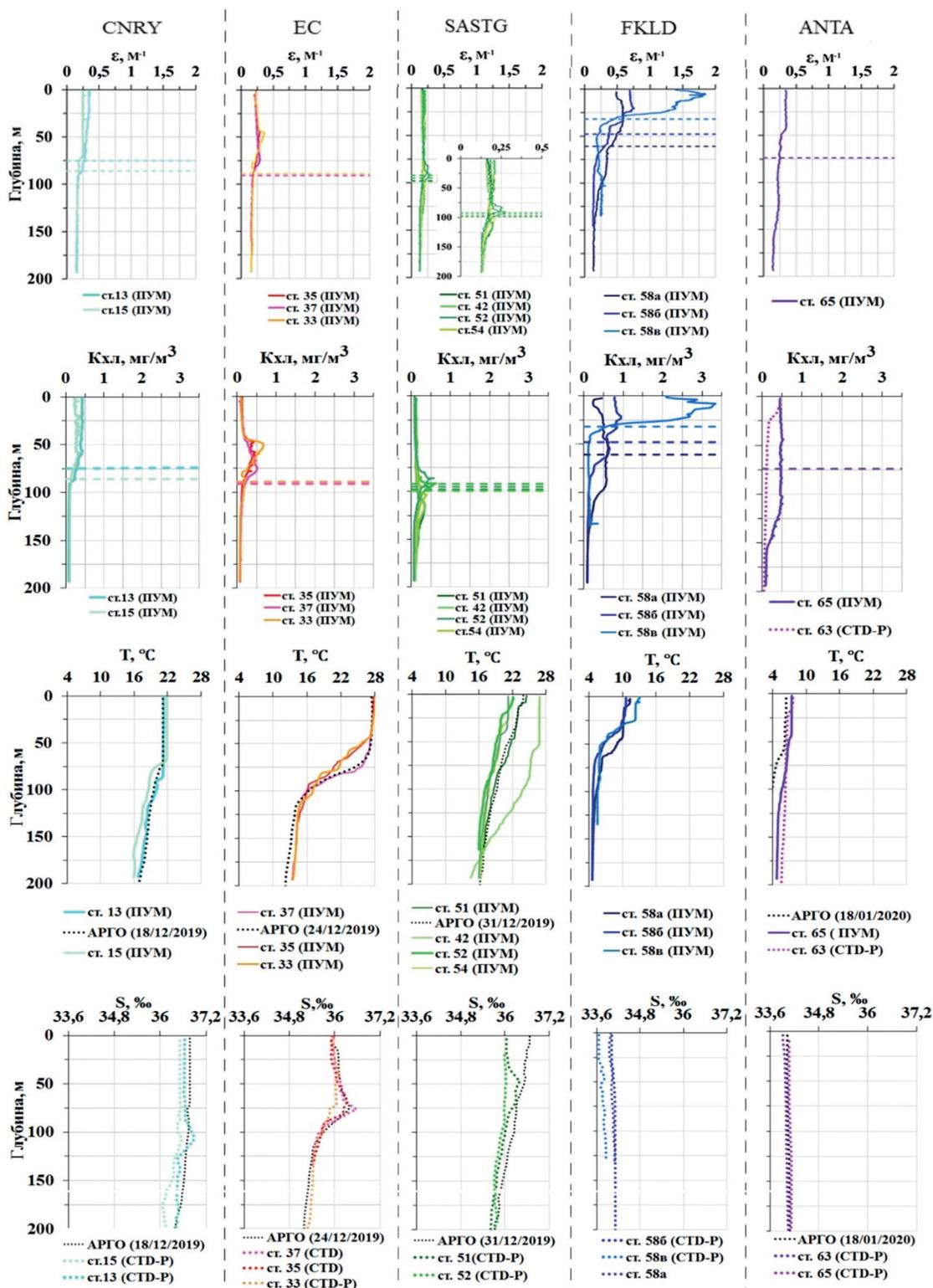


Рис. 3. Вертикальное распределение показателя ослабления света морской водой (ϵ), Кхл, температуры, солёности вод в биогеохимических провинциях Атлантического океана CNRY, EC, SASTG, FKLD, ANTA, через которые проходил маршрут 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». Названия этих провинций приведены в подписи к рис. 1. К каждой серии представленных вертикальных профилей снизу указывается источник данных зондирования (АРГО или судовой прибор, см. табл. 1)

Fig. 3. Vertical profiles of the water *Chl*, temperature, salinity in biogeochemical provinces of the Atlantic Ocean (CNRY, EC, SASTG, FKLD, ANTA), which were crossed by the route of 79th cruise of R/V “Akademik Mstislav Keldysh”. Indications for these provinces are given in the title to fig. 1. The information about profile data source (ARGO or ship device, see table 1) is given under each figure

Температура и солёность воды в этом районе, как правило, уменьшались с глубиной: температура с 21–27 °С на поверхности до 15–16 °С на 175 м, а солёность с 36–36,6 ‰ на поверхности до примерно 35,7 ‰ на 175 м. На ст. 51 структура профиля солёности вод была подобна профилю в экваториальной области, т. е. солёность увеличивалась к глубине 50 м после чего уменьшалась (рис. 3). В распределениях температуры на некоторых станциях наблюдались небольшие скачки на глубине 8–50 м. Однако их наличие никак не связывалось с Кхл, которая оставалась близкой к нулю.

Обращает на себя внимание тот факт, что на ст. 42 и 51 максимум Кхл (на глубинах 115–120 м) находится ниже глубины ЭЗ (около 100 м). При этом в более высоких слоях на глубинах около 60 м есть выраженный сезонный термоклин, где теоретически мог бы задерживаться и развиваться фитопланктон. Наблюдаемое распределение Кхл связано с низким содержанием биогенных элементов в приповерхностном слое в районе SASTG [10]. Кроме того, поскольку измерения проведены в Южном полушарии примерно на 28° ю.ш. летом, то абсолютные значения ФАР являются достаточными для нормального функционирования фитопланктона даже на таких больших глубинах за счёт высоких значений падающего ФАР на морскую поверхность, и за счёт прозрачности морской воды, которая позволяет свету глубоко распространяться.

В районе FKLD вертикальные профили Кхл, температуры и солёности вод получены в зоне действия основной струи Фолклендского течения (ст. 58а в центре струи и ст. 58б в западной части струи) и в зоне апвеллинга (ст. 58в), возникающем за счёт дивергенции в районе взаимодействия прибрежной струи Фолклендского течения с водами Патагонского шельфа [26, 33]. В первом случае высокие значения Кхл наблюдаются до глубин примерно 100 м и 60 м, что связано с чередованием зон дивергенции и конвергенции в системе Фолклендского течения. Во втором случае основное содержание клеток фитопланктона сосредоточено в верхних 30 м в ЭЗ с максимумом Кхл около 3,5 мг/м³, что связано с их развитием в зоне апвеллинга, где происходит поднятие пикноклина и поступление биогенных веществ из нижележащих слоев. Профили Кхл и показателя ослабления света на ст. 58б, 58в были идентичны между собой, а на ст. 58а ослабление света от 60 м глубины к поверхности увеличивалось, Кхл при этом уменьшалась. Это свидетельствует о заметном вкладе в ослабление света помимо фитопланктона других оптически активных компонентов (взвешенных частиц, органического вещества). Опускание вод прослеживалось также по профилю температуры. Температура и солёность на шельфе на поверхности были около 12 °С и 33,6 ‰. Квазиоднородный профиль температуры вод около 10 °С до 45 м наблюдался по центру Фолклендского течения. Ниже 45 м температура вод резко уменьшалась до примерно 6 °С на глубине 65 м. При этом солёность вод медленно увеличивалась с глубиной с примерно 33,97 ‰ на поверхности к 34,1 ‰ на 65 м.

В проливе Дрейка (в пределах районов SANT и ANTA) измерения вертикальных профилей выполнены в зоне струйных течений АЦТ, положение которых изменяется во времени [28]. Такая изменчивость струй может приводить к образованию мощных зон дивергенции и конвергенции, и соответствующим поднятиям, и опусканиям водных масс. По-видимому, такой эффект наблюдается на представленных профилях на рис. 3, где на ст. 63 максимум Кхл составляет около 0,5 мг/м³ в приповерхностном слое и далее он уменьшается в пределах 25 м. А на ст. 65 такое же приповерхностное значение Кхл около 0,5 мг/м³ не меняется с глубиной до горизонта 125 м, что значительно ниже глубины ЭЗ, которая составила 75 м. Немного повышенное над однородным профилем значение показателя ослабления света до 50 м (область термоклина), по-видимому, вызвано влиянием взвеси, удерживаемой в этом слое при стратификации вод после небольшого их прогрева.

Таким образом, с высокой вероятностью вертикальное распределение Кхл на ст. 65 определяется гидродинамическими процессами, а не физиологическими закономерностями развития фитопланктонных сообществ. Похожий тип распределения, имеющий повышенные Кхл с заглублением вод, наблюдается на ст. 58а в центре основной струи Фолклендского течения.

3.4. Сопоставление результатов о распределении концентрации хлорофилла-а

В данном разделе проводится сопоставление особенностей распределения Кхл, полученных в нашем исследовании (табл. 2), и ранее научными группами в других рейсах (табл. 3).

Ниже приведём характеристику Кхл, полученную в нашем исследовании.

В приповерхностном слое океана максимальные значения Кхл (1–5 мг/м³) обнаружены в районах дивергенции вод, в системах Канарского апвеллинга и Фолклендского течения. Минимальные значения Кхл (0,01–0,08 мг/м³) зарегистрированы в западной части Южно-Атлантического субтропического антициклонического круговорота, что вероятно обусловлено процессами прогрева верхнего слоя океана и даунвеллингом вод, которые препятствуют поступлению питательных веществ из нижележащих слоёв.

Распределение содержания хлорофилла-а в Атлантическом океане в декабре 2019 г. — январе 2020 г...
The chlorophyll-a content distribution in the Atlantic Ocean in December 2019 — January 2020...

Таблица 3

Table 3

Информация о Кхл из литературных источников в биогеохимических провинциях по маршруту 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». Знак «—» означает отсутствие сведений

From the literary sources the information about the chlorophyll-a concentration (Chl) in the biogeochemical provinces along the ship route of 79th cruise of R/V "Akademik Mstislav Keldysh". Symbol «—» means the absence of information

Биогеохимические провинции	Источник информации	Год, месяц получения данных	Кхл приповерхностного слоя	Особенности вертикального распределения Кхл и значения максимума Кхл	Глубина залегания максимума Кхл и глубина эвфотической зоны (ЭЗ)
CNRУ и восточная периферия NASTG; CNZ	Демидов и др., 2008 [8]	октябрь-ноябрь, 2004	0,55–4,31 мг/м ³	—	—
	Gibb et al., 2000 [12]	апрель-май, 1996; 1997 сентябрь-октябрь, 1996; 1997	0,1–1 мг/м ³	—	—
NATRE	Ведерников и др., 2007 [7]	октябрь-ноябрь, 2002	0,07–0,42 мг/м ³	0,28 мг/м ³	100м / ЭЗ 130 м
		сентябрь-октябрь, 1996	0,18 мг/м ³	—	—
	Демидов и др., 2008 [8]	октябрь-ноябрь, 2004	0,13–0,14 мг/м ³	—	—
		октябрь-ноябрь, 2001	0,03–0,16 мг/м ³	—	—
		октябрь, 2003	0,05–0,17 мг/м ³	—	—
TRA	Ведерников и др., 2007 [7]	октябрь-ноябрь, 2002	0,14–0,17 мг/м ³	0,25 мг/м ³	50м / ЭЗ 80м
		сентябрь-октябрь, 1996	0,13 мг/м ³	—	—
	Демидов и др., 2008 [8]	октябрь-ноябрь, 2004	0,13–0,25 мг/м ³	—	—
		октябрь-ноябрь, 2001	0,05–0,27 мг/м ³	—	—
		октябрь, 2003	0,05–0,16 мг/м ³	—	—
	Aiken et al., 2017 [10]	май, 2004	0,15–0,2 мг/м ³	0,5 мг/м ³	60м / ЭЗ —
		октябрь-ноябрь, 2005	0,1–0,15 мг/м ³	0,5–0,6 мг/м ³	65–90м / ЭЗ —
Мордасова, 2014 [6]	январь-март, 1985	0,1 мг/м ³	0,17 мг/м ³	100 м / ЭЗ —	
ЕС	Aiken et al., 2017 [10]	май, 2004	0,15 мг/м ³	0,5 мг/м ³	50м / ЭЗ —
		октябрь-ноябрь, 2005	0,1 мг/м ³	0,55 мг/м ³	80 м / ЭЗ —
	Мордасова, 2014 [6]	январь-март, 1985	0,11 мг/м ³	0,15 мг/м ³	77м / ЭЗ —
SASTG (1 — центральная часть; 2 — юго-западный район)	Копелевич и др., 2008 [9]	октябрь, 2001–2004	<0,15 мг/м ³	—	—
	Ведерников и др., 2007 [7]	октябрь-ноябрь, 2002	1) 0,02–0,08 мг/м ³ 2) 0,11–0,23 мг/м ³	1) 0,23–0,31 мг/м ³ 2) 0,39 мг/м ³	1) 100–175м / ЭЗ 101–135м 2) 100м / ЭЗ 100 м
		сентябрь-октябрь, 1996	0,19 мг/м ³	—	—
SASTG (1 — центральная часть; 2 — юго-западный район)	Демидов и др., 2008 [8]	октябрь-ноябрь, 2004	0,11–0,29 мг/м ³	—	—
		ноябрь-декабрь, 2004	0,18–0,24 мг/м ³	—	—
		октябрь-декабрь, 2004	0,22 мг/м ³	0,37 мг/м ³	50м / ЭЗ 60 м
		октябрь-ноябрь, 2001	0,03–0,08 мг/м ³	—	—
		октябрь, 2003	0,03–1,44 мг/м ³	—	—
	Aiken et al., 2017 [10]	май, 2004	0,01 мг/м ³	0,25 мг/м ³	110 м / ЭЗ —
		октябрь-ноябрь, 2005	0,01 мг/м ³	0,35 мг/м ³	160 м / ЭЗ —
Мордасова, 2014 [6]	январь-март, 1985	0,12 мг/м ³	0,23 мг/м ³	94м / ЭЗ —	
FBC	Копелевич и др., 2008 [9]	октябрь, 2001–2004	0,15–0,5 мг/м ³	—	—
		апрель-май, 1996; 1997	0,2–1,2 мг/м ³	—	—
FKLD	Gibb et al., 2000 [12]	сентябрь-октябрь, 1996; 1997	0,3–5 мг/м ³	—	—

Окончание табл. 3
 Fin table 3

Биогеохимические провинции	Источник информации	Год, месяц получения данных	Кхл приповерхностного слоя	Особенности вертикального распределения Кхл и значения максимума Кхл	Глубина залегания максимума Кхл и глубина эвфотической зоны (ЭЗ)
SANT	Демидов и др., 2008 [8]	октябрь-декабрь, 2004	0,23–0,57 мг/м ³	–	–
			0,31 мг/м ³	два пика Кхл около 0,3 мг/м ³ до 50 м	нет выраженного максимума Кхл / ЭЗ 70 м
	Мордасова, 2014 [6]	январь-март, 1985	0,34 мг/м ³	0,54 мг/м ³ 0,54 мг/м ³ –	26м / ЭЗ –
ANTA	Демидов и др., 2008 [8]	октябрь-декабрь, 2004	0,4–0,94 мг/м ³	–	–
			0,43 мг/м ³	четыре пика Кхл в диапазоне 0,36–0,43 мг/м ³ до 125 м	нет выраженного максимума Кхл / ЭЗ 75 м
	Мордасова, 2014 [6]	январь-март, 1985	0,31–0,82 мг/м ³	0,37–1,1 мг/м ³	14–58 м / ЭЗ – 14–58м

Во всем полученном в экспедиции множестве вертикальных профилей Кхл достигает максимального значения 3,5 мг/м³ на глубине около 10–15 м в районе апвеллинга на Патагонском шельфе в зоне взаимодействия прибрежной струи Фолклендского течения с шельфовыми водами, где происходит подъем биогенных элементов с придонных слоев шельфа.

Можно выделить следующие особенности вертикальных распределений Кхл:

- 1) выявлена асимметрия меридионального распределения Кхл над экваториальным противотечением Ломоносова (максимум Кхл составил 0,6 мг/м³ на горизонте 50 м над северной частью течения и 0,5 мг/м³ на горизонте 70 м над южной частью течения);
- 2) в западной части Южно-Атлантического субтропического антициклонического круговорота максимум Кхл (120 м) располагался ниже глубины ЭЗ (100 м);
- 3) в районе АЦТ в проливе Дрейка и в основной струе Фолклендского течения наблюдались квазиоднородные профили Кхл до глубины почти в 2 раза превышающей глубину ЭЗ.

В целом можно отметить совпадение диапазонов значений Кхл, полученных в конкретных биогеохимических провинциях. Небольшие их отклонения, возможно, связаны с пространственно-временными изменениями отбора проб воды в рейсах и с межгодовыми изменениями гидрометеорологических условий и развития фитопланктонных сообществ.

В приэкваториальном распределении Кхл по маршруту судна, проходящему примерно по меридиану 26°з.д., мы обнаружили асимметрию. Помимо полученного нами распределения она также прослеживалась на рисунках статьи [10] в которой исследуются Северо-Атлантический и Южно-Атлантический субтропические антициклонические круговороты. По рисункам указанной выше статьи, на которых приводятся распределения нитратов, Кхл, температуры и солёности вод в 14-м и 17-м рейсах программы Atlantic Meridional Transect, выполненных соответственно в мае 2004 г. и октябре-ноябре 2005 г., нами отмечены сезонные изменения приэкваториальной асимметрии меридионального распределения Кхл. Возможно, такие изменения вызваны «световым эффектом», заключающемся в опускании ГМХ на большие глубины при увеличении освещённости и усилении стратификации вод в летние месяцы и уменьшении значений Кхл на поверхности по сравнению с зимними месяцами как это было описано для субтропических антициклонических круговоротов авторами работы [10]. Также, возможно, влияние вертикальной миграции положения подповерхностного холодного течения Ломоносова. Течение Ломоносова расположено под тонким слоем Южного Пассатного течения, направленного на запад. Его вертикальные миграции иногда с выходом к поверхности зависят от ослабления пассатных ветров [34].

В Южно-Атлантическом субтропическом антициклоническом круговороте ГМХ были наблюдаемы ранее на глубинах 50–175 м, составляя значения Кхл в диапазоне 0,23–0,39 мг/м³ (табл. 3). Авторы отмечали, что на большинстве станций глубинные максимумы Кхл наблюдались на глубинах ниже общеизвестного 1%-го светового уровня нижней границы ЭЗ и результаты, полученные ими, дают возможность считать, что его значение для субтропических вод Атлантики может быть на порядок выше реальных величин [7].

Случаи вертикальных профилей с относительно высокими величинами Кхл ниже слоя фотосинтеза в районах Антарктического полярного фронта и Антарктической зоны на разрезе, расположенном в юго-западном направлении от Африканского континента (в диапазоне долготы примерно 0–5° в.д.), наблюдались авторами работы [8]. Они отмечали, что такие профили указывают на процессы интенсивного опускания поверхностных вод в исследованных районах.

4. Заключение

Таким образом, нами получены новые данные по Кхл в Атлантическом океане — по маршруту 79-го рейса «Академик Мстислав Келдыш» в декабре 2019 г. — январе 2020 г., и охарактеризовано распределение этого биопродукционного параметра. В целом оно сопоставимо с результатами, полученными ранее другими авторами. Это указывает на качество полученных нами данных. Поэтому возможно их использование в различных океанографических базах данных. Новизна наших исследований состоит не только в получении новых данных, но и выделении и характеристике некоторых особенностей распределения Кхл — приэкваториальной асимметрии меридионального распределения Кхл, квазиоднородных профилей Кхл до глубины почти в 2 раза превышающей глубину ЭЗ в районе АЦТ в проливе Дрейка и в основной струе Фолклендского течения.

Результаты измерений Кхл по рейсу необходимы в дальнейшей работе для проверки и уточнения алгоритмов ее определения по спутниковым данным сканеров цвета. Характеристика распределения Кхл с учётом гидрометеорологических условий районов важна при анализе изменения расхождения между спутниковыми и судовыми оценками Кхл и их взаимосвязей, что необходимо при уточнении алгоритмов оценки этого параметра.

Благодарности

Авторы хотят отметить большой вклад Олега Викторовича Копелевича в подготовку научной программы по биооптическим работам в 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», многолетнее проведение конференций «Современные проблемы оптики естественных вод», поддержку и содействие развитию многочисленных научно-исследовательских работ по оптике океана в России, применению результатов исследований по оптике океана в развитии методов оценки биопродукционных показателей вод, включая спутниковые измерения цвета океана.

Финансирование

Исследования субантарктических и антарктических районов Атлантического океана выполнены в рамках государственной темы № 0211-2019-0005 (ТОИ ДВО РАН), анализ распределений содержания хлорофилла-*a* по теме № 0211-2021-0005 (ТОИ ДВО РАН), обработка и анализ флуоресцентных измерений по темам № 0211-2021-0007 (ТОИ ДВО РАН), № 0555-2019-0003 (МГИ РАН), определение глубины эвфотической зоны по теме № 0128-2021-0001 (ИО РАН). Обработка данных буев АРГО осуществлена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-10059). Грант предоставлен через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Funding

Studies of Subantarctic and Antarctic Regions of the Atlantic Ocean were carried out within the framework of the state budget theme No. 0211-2019-0005 (POI FEB RAS), analysis of the distribution of the content of chlorophyll-*a* — theme No. 0211-2021-0005 (POI FEB RAS), processing and analysis of fluorescence measurements — theme No. 0211-2021-0007 (POI FEB RAS), No. 0555-2019-0003 (MHI RAS), determination of the euphotic zone on theme No. 0128-2021-0001 (IO RAS). Data processing of ARGO buoys was supported by a grant of Russian Science Foundation (project No. 21-77-10059). The grant was provided through the Shirshov Institute of Oceanology RAS.

Литература

1. Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И. Продукция морских сообществ // Первичная продукция. Биология океана. Т. 2. Биологическая продуктивность океана. М.: Наука, 1977. С. 183–209.
2. Семина Г.И. Фитопланктон Тихого океана. М.: Наука, 1974. 239 с.

3. Lim S., Jang C. et al. Climatology of the mixed layer depth in the East Sea/Japan Sea // Journal of Marine Systems. 2012. Vol. 96–97. P. 1–14. doi:10.1016/j.jmarsys.2012.01.003
4. Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 328 с.
5. Yoder J.A., McClain C.R., Feldman G.C., Esaias W.E. Annual cycles of phytoplankton chlorophyll concentrations in global ocean: A satellite view // Global Biogeochemical Cycles. 1993. № 7. P. 181–193. doi:10.1029/93GB02358
6. Мордасова Н.В. Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 41–56.
7. Ведерников В.И., Гагарин В.И. и др. Распределение первичной продукции и хлорофилла в субтропических и тропических водах Атлантического океана осенью 2002 г. // Океанология. 2007. Т. 47, № 3. С. 418–431.
8. Демидов А.Б., Ведерников В.И. и др. Продукционные характеристики фитопланктона в восточных районах Атлантики и Атлантическом секторе Южного океана в октябре–ноябре 2004 г. // Океанология. 2008. Т. 48, № 3. С. 396–410.
9. Копелевич О.В., Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Шеберстов С.В. Оптический мониторинг Атлантического океана по данным спутниковых и судовых исследований // Комплексные исследования Мирового океана: Проект «Меридиан». Ч. 1. Атлантический океан. М.: Наука, 2008. С. 150–164.
10. Aiken J., Brewin R.J. et al. A synthesis of the environmental response of the North and South Atlantic Sub-Tropical Gyres during two decades of AMT // Progress in Oceanography. 2017. Vol. 158, N 1. P. 236–254. doi:10.1016/j.pocean.2016.08.004
11. Glukhovets D.I., Salyuk P.A. et al. Variability of bio-optical Characteristics of Surface Water Layer during Transatlantic Transect in 2019–2020 // Oceanology. 2021. Vol. 61. P. 872–880. doi:10.1134/S0001437021060229
12. Gibb S.W., Barlow R.G. et al. Surface phytoplankton pigment distributions in the Atlantic Ocean: an assesment of basin scale variability between 50°N and 50°S // Progress in Oceanography. 2000. Vol. 45. P. 339–368. doi:10.1016/S0079–6611(00)00007–0
13. Longhurst A. Ecological geography of the sea (2nd Edition). Amsterdam: Elsevier, 2006. 543 p.
14. Smyth T., Quartly G. et al. Determining Atlantic Ocean province contrasts and variations // Progress in Oceanography. 2017. Vol. 158. P. 19–40. doi:10.1016/j.pocean.2016.12.004
15. Нагорный И.Г., Салюк П.А. и др. Мобильный комплекс для оперативного исследования водных акваторий и приводной атмосферы // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 1. С. 103–106.
16. Кобленц-Мишке О.И. Экстрактный и безэкстрактный методы определения фотосинтетических пигментов в пробе // Современные методы количественной оценки распределения морского планктона / Под ред. М.Е. Виноградова. М.: Наука, 1983. С. 114–125.
17. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemie und Physiologie der Pflanzen. 1975. Vol. 167, N 2. P. 191–194.
18. ГОСТ 17.1.04.02–91. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла-а. Государственный стандарт союза ССР. Изд-во стандартов. 1991. М.: Изд-во стандартов, 1991. 14 с.
19. Ведерников В.И., Коновалов Б.В., Кобленц — Мишке О.И. Результаты применения спектрофотометрического метода определения феофитина-а в пробах морской воды // Труды ИОАН СССР. М., 1973. Т. 95. С. 138–146.
20. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study Protocols (JGOFS). Core Meas, Manual Guides. 1994. P. 119–122.
21. Артемьев В.А., Таскаев В.П., Григорьев А.В. Автономный прозрачномер ПУМ-200 // Материалы 17-й международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований». М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2021. С. 95–99.
22. Salyuk P.A., Artemiev V.A. et al. Bio-optical models for estimating euphotic zone depth in the western Atlantic sector of the Southern Ocean in the Antarctic summer // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean, Advances in Polar Ecology, Vol. 6. / Edited by E.G. Morozov et al. Switzerland AG: Springer Nature, 2021. P. 241–250. doi:10.1007/978-3-030-78927-5_18
23. Partition of the ocean into ecological provinces: Role of ocean-colour radiometry // Reports of International Ocean-Colour Coordinating Group. № 9 / Edited by Dowell M., Platt T. Dartmouth, Canada, 2009. 99 p.
24. Aristegui J., Barton E.D. et al. Subregional ecosystem variability in the Canary Current upwelling // Progress in Oceanography. 2009. Vol. 83. P. 33–48. doi:10.1016/j.pocean.2009.07.031
25. Barton E.D., Aristegui J. et al. The transition zone of the Canary Current upwelling region // Progress in Oceanography. 1998. Vol. 41. P. 455–504. doi:10.1016/S0079–6611(98)00023–8
26. Buss de Souza R., Mata M.M. et al. Multi-sensor satellite and in situ measurements of a warm core ocean eddy south of the Brazil–Malvinas Confluence region // Remote Sensing of Environment. 2006. Vol. 100. P. 52–66. doi:10.1016/j.rse.2005.09.018

27. Салюк П.А., Глуховец Д.И. и др. Изменчивость биооптических характеристик морской поверхности в районе Фолклендского течения и Патагонского шельфа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 6. С. 200–213. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-200-213
28. Frey D.I., Krechik V.A. et al. Direct measurements of the Malvinas Current velocity structure // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2021. Vol. 126, N 4. Art. No. e2020JC016727. doi:10.1029/2020JC016727
29. Weingartner T.J., Weisberg R.H. On the annual cycle of equatorial upwelling in the central Atlantic Ocean // Journal of Physical Oceanography. 1991. Vol. 21, N 1. P. 68–82. doi:10.1175/1520-0485(1991)021<0068:OTACOE>2.0.CO;2
30. Latushkin A.A., Artemiev V.A. et al. Distribution of bio-optical parameters in the Lomonosov equatorial undercurrent in December 2019 // Proceedings of SPIE, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2020. Vol. 11560, N 1156041. doi:10.1117/12.2575466
31. Longhurst A. Seasonal cooling and blooming in the tropical oceans // Deep Sea Research, Part I. 1993. N 40. P. 2145–2165. doi:10.1016/0967-0637(93)90095-K
32. Grodsky S.A., Carton J.A., McClain C.R. Variability of upwelling and chlorophyll in the equatorial Atlantic // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35, N L03610. doi:10.1029/2007GL032466
33. Matano R.P., Palma E.D. On the upwelling of downwelling currents // Journal of Physical Oceanography. 2008. Vol. 38. P. 2482–2500. doi:10.1175/2008JPO3783.1
34. Демидова Т.А., Морозов Е.Г., Нейман В.Г. Экваториальное подповерхностное течение Ломоносова по данным измерений бортовым профилографом в 2014–2017 гг. // Доклады Академии наук. Т. 482, № 3. 2018. С. 323–326. doi:10.31857/S086956520003113-7

References

1. Koblenz-Mishke O.I., Vedernikov V.I. Production of marine communities. *Primary production. Biology of ocean*. Vol. 2. *Biological productivity of ocean*. М., Nauka, 1977, 183–209 (In Russian).
2. Semina G.I. Pacific phytoplankton. М., Nauka, 1974. 239 p. (in Russian).
3. Lim S., Jang C. et al. Climatology of the mixed layer depth in the East Sea/Japan Sea. *Journal of Marine Systems*. 2012, 96–97, 1–14. doi:10.1016/j.jmarsys.2012.01.003
4. Bound K. Physical oceanography of coastal water. М., Mir, 1988. 328 p. (In Russian).
5. Yoder J.A., McClain C.R., Feldman G.C., Esaias W.E. Annual cycles of phytoplankton chlorophyll concentrations in global ocean: A satellite view. *Global Biogeochemical Cycles*. 1993, 7, 181–193. doi:10.1029/93GB02358
6. Mordasova N.V. Indirect estimation of water productivity by the chlorophyll content. *Proceedings VNIRO*. 2014, 152, 41–56 (In Russian).
7. Vedernikov V.I., Gagarin V.I. et al. Primary production and chlorophyll distributions in subtropical and tropical waters of the Atlantic Ocean in the autumn of 2002. *Oceanology*. 2007, 47, 3, 386–399. doi:10.1134/S0001437007030113
8. Demidov A.B., Vedernikov V.I., Gagarin V.I., Burenkov V.I. Phytoplankton production characteristics in the Eastern Atlantic and Atlantic sector of the Southern Ocean in October–November 2004. *Oceanology*. 2008, 48, 3, 364–377. doi:10.1134/S0001437008030089
9. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Gol'din Yu.A., Sheberstov S.V. Optical monitoring of the Atlantic Ocean based on satellite and ship survey data. *Comprehensive Studies of the World Ocean: Meridian Project, Part 1: Atlantic Ocean*. Moscow, Nauka, 2008, 150–164 (In Russian).
10. Aiken J., Brewin R.J. et al. A synthesis of the environmental response of the North and South Atlantic Sub-Tropical Gyres during two decades of AMT. *Progress in Oceanography*. 2017, 158, 1, 236–254. doi:10.1016/j.pocean.2016.08.004
11. Glukhovets D.I., Salyuk P.A. et al. Variability of bio-optical characteristics of surface water layer during transatlantic transect in 2019–2020. *Oceanology*. 2021, 61, 872–880. doi:10.1134/S0001437021060229
12. Gibb S.W., Barlow R.G. et al. Surface phytoplankton pigment distributions in the Atlantic Ocean: an assesment of basin scale variability between 50°N and 50°S. *Progress in Oceanography*. 2000, 45, 339–368. doi:10.1016/S0079-6611(00)00007-0
13. Longhurst A. Ecological geography of the sea (2nd Edition). *Amsterdam, Elsevier*, 2006. 543 p.
14. Smyth T., Quarty G. et al. Determining Atlantic Ocean province contrasts and variations. *Progress in Oceanography*. 2017, 158, 19–40. doi:10.1016/j.pocean.2016.12.004
15. Nagornyi I.G., Salyuk P.A. et al. A mobile complex for on-line studying water areas and surface atmosphere. *Instruments and Experimental Techniques*. 2014, 57, 1, 68–71. doi:10.1134/S0020441214010175
16. Koblenz-Mischke O.I. Extract and nonextract methods for determining photosynthesis pigments in a sample. *Modern Methods for Estimation of Marine Plankton Distribution* / Ed. Vinogradov M.E. М., Nauka, 1983, 114–125 (In Russian).

17. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*. 1975, 167, 2, 191–194.
18. GOST 17.1.04.02–91. Water. A method for the spectrophotometric determination of chlorophyll-a. *State standard of USSR. M., Izdatelstvo Standartov*, 1991. 14 p. (In Russian).
19. Vedernikov V.I., Kononov B.V., Koblenz-Mischke O.I. Results of the application of the spectrophotometric method for the determination of pheophytin-a in sea water samples. *Proceedings of IOAN USSR. M.*, 1973, 95, 138–146 (In Russian).
20. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study Protocols (JGOFS). Core Meas, Manual Guides. 1994. P. 119–122.
21. Artemev V.A., Taskaev V.R., Grigorev A.V. Autonomous transparency meter PUM-200. Proceedings of XVII international scientific and practical conference “*Modern methods and means of oceanological research (MSOI-2021)*”. P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS. 2021. P. 95–99.
22. Salyuk P.A., Artemiev V.A. et al. Bio-optical models for estimating euphotic zone depth in the western Atlantic sector of the Southern Ocean in the Antarctic summer. *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean, Advances in Polar Ecology*, Vol. 6 / Edited by E.G. Morozov et al. *Switzerland AG: Springer Nature*, 2021, 241–250. doi:10.1007/978-3-030-78927-5_18
23. Partition of the ocean into ecological provinces: Role of ocean-colour radiometry. *Reports of International Ocean-Colour Coordinating Group. № 9* / Edited by Dowell M., Platt T. *Dartmouth, Canada*, 2009. 99 p.
24. Arístegui J., Barton E.D. et al. Subregional ecosystem variability in the Canary Current upwelling. *Progress in Oceanography*. 2009, 83, 33–48. doi:10.1016/j.pocean.2009.07.031
25. Barton E.D., Arístegui J. et al. The transition zone of the Canary Current upwelling region. *Progress in Oceanography*. 1998, 41, 455–504. doi:10.1016/S0079-6611(98)00023-8
26. Buss de Souza R., Mata M.M. et al. Multi-sensor satellite and in situ measurements of a warm core ocean eddy south of the Brazil–Malvinas Confluence region. *Remote Sensing of Environment*. 2006, 100, 52–66. doi:10.1016/j.rse.2005.09.018
27. Salyuk P.A., Glukhovets D.I. et al. Variability of the sea surface bio-optical characteristics in the region of Falkland Current and Patagonian shelf. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2021, 18, 6, 200–213 (In Russian). doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-200-213
28. Frey D.I., Krechik V.A. et al. Direct measurements of the Malvinas current velocity structure. *Journal Geophysical Research: Oceans*. 2021, 126, 4. Art. No. e2020JC016727. doi:10.1029/2020JC016727
29. Weingartner T.J., Weisberg R.H. On the annual cycle of equatorial upwelling in the central Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography*. 1991, 21, 1, 68–82. doi:10.1175/1520-0485(1991)021<0068: OTACOE>2.0.CO;2
30. Latushkin A.A., Artemiev V.A. et al. Distribution of bio-optical parameters in the Lomonosov equatorial undercurrent in December 2019. *Proceedings of SPIE, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*. 2020, 11560, 1156041. doi:10.1117/12.2575466
31. Longhurst A. Seasonal cooling and blooming in the tropical oceans. *Deep Sea Research, Part I*, 1993, 40, 2145–2165. doi:10.1016/0967-0637(93)90095-K
32. Grodsky S.A., Carton J.A., McClain C.R. Variability of upwelling and chlorophyll in the equatorial Atlantic. *Geophysical Research Letters*. 2008, 35, L03610. doi:10.1029/2007GL032466
33. Matano R.P., Palma E.D. On the upwelling of downwelling currents. *Journal of Physical Oceanography*. 2008, 38, 2482–2500. doi:10.1175/2008JPO3783.1
34. Demidova T.A., Morozov E.G., Neiman V.G. The Lomonosov Equatorial undercurrent according to data measured with a shipborne profiler, 2014–2017. *Doklady Earth Sciences*. 2018, 482(1), 1229–1233. doi:10.1134/S1028334X18090222

Об авторах

ШТРАЙХЕРТ Елена Аркадьевна

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, ул. Балтийская, д. 43, г. Владивосток, Россия), ROR 05qc18f66

ORCID ID: 0000-0001-5989-8300,
elibrary AuthorID: 182571,
e-mail: straj@poi.dvo.ru

ЗАХАРКОВ Сергей Петрович

Кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, ул. Балтийская, д. 43, г. Владивосток, Россия), ROR 05qc18f66

ORCID ID: 0000-0002-3425-4813,
elibrary AuthorID: 59154,
e-mail: zakharkov@poi.dvo.ru

Распределение содержания хлорофилла-*a* в Атлантическом океане в декабре 2019 г. — январе 2020 г...
The chlorophyll-*a* content distribution in the Atlantic Ocean in December 2019 — January 2020...

САЛЮК Павел Анатольевич	Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, ул. Балтийская, д. 43, г. Владивосток, Россия), ROR 05qc18f66	ORCID ID: 0000-0002-3224-710X, elibrary AuthorID: 155615, e-mail: pavel.salyuk@gmail.com
ПОНОМАРЕВ Владимир Иванович	Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, ул. Балтийская, д. 43, г. Владивосток, Россия), ROR 05qc18f66	ORCID ID: 0000-0002-0501-460X, elibrary AuthorID: 15842, e-mail: pvi711@yandex.ru
АРТЕМЬЕВ Владимир Александрович	Старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), ROR 00n1e1p60	elibrary AuthorID: 611644, e-mail: artemiev195@yandex.ru
ГЛУХОВЕЦ Дмитрий Ильич	Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), ROR 00n1e1p60	ORCID ID: 0000-0001-5641-4227, elibrary AuthorID: 924346, e-mail: glukhovets@ocean.ru
ЛАТУШКИН Александр Александрович	Младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 05961na22	ORCID ID: 0000-0002-3412-7339, elibrary AuthorID: 854632, e-mail: sevsalat@gmail.com