


Особенности сезонной изменчивости концентрации хлорофилла *a* в различных регионах Южной Атлантики по спутниковым данным

Я. И. Бакуева , Е. А. Кубрякова, А. А. Кубряков

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 *yasya1egupova@gmail.com*

Поступила в редакцию 02.07.2022; одобрена после рецензирования 05.08.2022;
принята к публикации 08.11.2022.

Аннотация

Цель. На основе долговременных спутниковых оптических измерений исследована сезонная изменчивость концентрации хлорофилла *a* на морской поверхности в различных регионах Южной Атлантики, определены ее пространственные особенности, выделены районы максимальных значений концентрации хлорофилла *a* и проанализированы причины ее увеличения в этих регионах.

Методы и результаты. Используются данные о концентрации хлорофилла *a*, полученные по измерениям *MODIS-Aqua* за 2002–2019 гг. в районе 30°–80° ю. ш., 70° з. д. – 25° в. д. Исследована пространственная изменчивость поверхностной концентрации хлорофилла *a*, ее сезонная динамика и время наступления сезонного пика. Выделено четыре зоны локальных максимумов концентрации хлорофилла *a* (аргентинский шельф, острова Южная Георгия, район выноса вод от Антарктического полуострова и антарктический шельф к востоку от моря Уэдделла), в которых проведен детальный анализ особенностей сезонной изменчивости.

Выводы. Пик концентрации хлорофилла *a* и начало цветения в исследуемых регионах наблюдаются позже, чем в высоких широтах: в северной части в ноябре – декабре, а в южной – в январе – феврале. Исключение – достаточно обширные районы, расположенные к востоку от мощных источников биогенных элементов (островов, шельфовых вод), где время достижения пиковых значений концентрации хлорофилла *a* связано с влиянием адвекции и наступает с задержкой, необходимой для переноса примеси под влиянием течений. Главным фактором появления районов с повышенными концентрациями является влияние особенностей топографии на фронты Антарктического циркумполярного течения, а также таяние льдов в прикромочной зоне.


Ключевые слова: Южная Атлантика, концентрация хлорофилла *a*, *MODIS-Aqua*, фитопланктон, сезонная изменчивость, антарктический шельф, спутниковые данные, море Уэдделла, острова Южная Георгия, Антарктический полуостров, шельф

Благодарности: анализ сезонной изменчивости концентрации хлорофилла *a* и обработка данных выполнены при поддержке гранта РФФ 21-77-10059, обработка данных выполнена в рамках государственного задания FNNN-2021-0003, исследование особенностей пространственной изменчивости концентрации хлорофилла *a* выполнено в рамках государственного задания FNNN-2021-0010.

Для цитирования: Бакуева Я. И., Кубрякова Е. А., Кубряков А. А. Особенности сезонной изменчивости концентрации хлорофилла *a* в различных регионах Южной Атлантики по спутниковым данным // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 1. С. 31–51. EDN HSEQUN. doi:10.29039/0233-7584-2023-1-31-51

Features of Seasonal Variability of Chlorophyll *a* Concentration in Different Regions of the Southern Atlantic Based on Satellite Data

Ya. I. Bakueva , E. A. Kubryakova, A. A. Kubryakov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 yasyalegupova@gmail.com

Abstract

Purpose. Based on the long-term satellite optical measurements, the work is to study seasonal variability of the chlorophyll *a* concentration on the sea surface in different regions of the Southern Atlantic, determine its spatial features, identify the areas where the values of the chlorophyll *a* concentration are maximum, and to analyze the reasons for its increase in these regions.

Methods and Results. The data on the chlorophyll *a* concentration obtained from the MODIS-Aqua measurements for 2002–2019 in the region 30°–80° S, 70° W – 25° E were used. Spatial variability of the surface chlorophyll *a* concentration, its seasonal dynamics and the time of the seasonal peak occurrence were studied. Four zones of local maxima of the chlorophyll *a* concentration were identified (the Argentinean shelf, the islands of South Georgia, the area of water removal from the Antarctic Peninsula and the Antarctic shelf east of the Weddell Sea); for each of them the features of seasonal variability were analyzed in details.

Conclusions. In agreement with the previous papers, the peak chlorophyll *a* concentration and the beginning of bloom in the regions under study are observed later than in the high latitudes: in the northern part – in November – December, and in the southern one – in January – February. The exception consists in the quite extensive areas to the east of the nutrients powerful sources (islands, shelf waters), where the time of occurrence of the chlorophyll *a* concentration peak values is related to the advection impact, that results in its arising with a delay which is required for transferring the nutrients by the currents. The basic factors promoting appearance of the areas with the increased chlorophyll *a* concentrations are the interaction between the topography features and the Antarctic Circumpolar Current fronts, and ice melting in the marginal zone.

Keywords: Southern Atlantic, concentration of chlorophyll *a*, MODIS-Aqua, phytoplankton, seasonal variability, Antarctic shelf, satellite data, Weddell Sea, South Georgia Islands, Antarctic Peninsula, shelf

Acknowledgments: Analysis of seasonal variability of chlorophyll *a* concentration and data processing were supported by the Russian Science Foundation grant 21-77-10059, data processing was carried out within the framework of state assignment FNNN-2021-0003, and features of spatial variability of chlorophyll *a* concentration were studied within the framework of state assignment FNNN-2021-0010.

For citation: Bakueva, Ya.I., Kubryakova, E.A. and Kubryakov, A.A., 2023. Features of Seasonal Variability of Chlorophyll *a* Concentration in Different Regions of the Southern Atlantic Based on Satellite Data. *Physical Oceanography*, 30(1), pp. 27-46. doi:10.29039/1573-160X-2023-1-27-46

1. Введение

Исследование биопродуктивности Антарктического региона представляет большой практический и фундаментальный интерес в связи с высоким биоресурсным потенциалом этого региона. Экосистема Южного океана характеризуется рядом уникальных особенностей, основными из которых являются большое количество главных биогенных элементов (нитратов, фосфатов) и относительно низкая биомасса фитопланктона [1, 2]. Эти особенности обусловлены, как считается, недостатком железа, повышение концентрации которого приводит к резкому росту фитопланктона [3], малым уровнем освещенности

в зимний период, частой облачностью, наличием льда [4, 5] и процессами интенсивного ветрового воздействия, приводящими к формированию глубокого перемешанного слоя [6]. Содержание железа и освещенность являются главными лимитирующими факторами роста клеток фитопланктона [1, 2]. Основными источниками железа в регионе являются терригенные взвеси, которые в большом количестве попадают в океан вблизи островов, в прикромочной зоне льда и в зонах апвеллинга [2, 7, 8].

Интенсивная крупномасштабная и вихревая динамика способствует перераспределению биогенных элементов, приводя к значительной пространственной неоднородности распределения концентрации хлорофилла *a* (*Chl-a*) [7, 8]. Наиболее полная информация о пространственной неоднородности в поверхностном слое была получена по данным спутниковых оптических измерений [4, 7–11]. Эти данные позволили впервые определить особенности сезонного хода концентрации *Chl-a* на поверхности в различных районах Антарктики [4, 7, 11].

В работе [11] на основе спутниковых и контактных данных проведено районирование особенностей сезонного хода цветения *Chl-a* в различных зонах пролива Дрейка, обсуждена связь сезонного хода *Chl-a* с выхолаживанием и освещенностью. Отмечено смещение пиковых значений концентрации *Chl-a* с ноября по январь от севера к югу. В работах [4, 7] была продемонстрирована значительная изменчивость распределения концентрации *Chl-a* в высокопродуктивных зонах и океанических пустынях. Впервые на основе этих данных продемонстрировано, что зоны наибольшей продуктивности привязаны к топографическим особенностям, от которых они простираются на тысячи километров под влиянием адвекции [7, 8]. Авторы работы [8] связывают рост концентрации *Chl-a* с апвеллингом, возникающим при воздействии топографических неровностей на поток вод. Большие концентрации *Chl-a*, по различным данным, наблюдаются в период таяния льда в Антарктике [12], распределение прикромочных цветений также имеет сильную пространственную изменчивость [13, 14].

Одним из важных и наиболее продуктивных районов Антарктики является южная часть Атлантического океана [4], в которой в настоящее время сосредоточены экспедиционные исследования России [9, 11, 15–19]. Эта область характеризуется наиболее резкой изменчивостью гидродинамических и гидробиологических процессов, связанных с рядом особенностей: интенсификацией Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) в районе пролива Дрейка, столкновением Бразильского и Мальвинского течений, наличием ряда островов, являющихся источником терригенных биогенов, а также выдающимся в открытый океан Антарктическим п-овом. Интенсивная динамика значительно влияет на функционирование экосистемы этого района, важной характеристикой которой является *Chl-a*, выступающий индикатором биомассы фитопланктона. Именно распределение биомассы фитопланктона во многом определяет пространственную изменчивость его потребителя – зоопланктона, в том числе экономически важного – криля. Понимание особенностей сезонного хода концентрации *Chl-a* в различных регионах необходимо при подготовке и анализе данных российских антарктических экспедиций.

Цель настоящей работы – на основе долговременных спутниковых оптических измерений за 2002–2019 гг. исследовать сезонный ход поверхностной концентрации *Chl-a* в Южной Атлантике и его пространственные особенности, выделить районы максимальных значений концентрации *Chl-a* и провести анализ причин ее увеличения в этих регионах. В данной статье использованы материалы доклада, представленного на Всероссийской научной конференции «Моря России: вызовы отечественной науки»¹.

2. Данные и методы

Для исследования использовались данные о поверхностной концентрации *Chl-a*, полученные по данным спутникового сканера *MODIS-Aqua* за 2002–2019 гг. в Южной Атлантике в районе 30°–80° ю. ш., 70° з. д. – 25° в. д. Данные Level 3 были загружены из архива <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>. Концентрация *Chl-a* рассчитывалась по стандартной методике с использованием алгоритма *OC3M* для *MODIS* и *OC4* для *SeaWIFS* [20]. Пространственное разрешение используемых данных составляет 4 км.

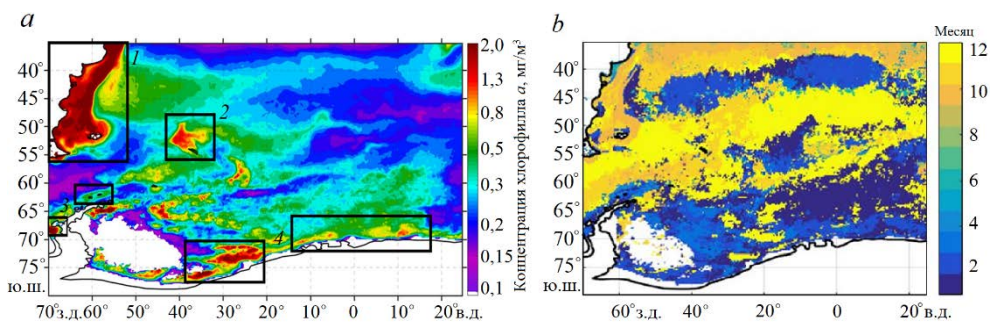
Отметим, что спутниковые методы восстановления концентрации *Chl-a* дают погрешность, оценка которой в среднем составляет около 30 % [20]. По данным [21], стандартный алгоритм *NASA OC4v4* приводит к занижению значения концентрации *Chl-a* в Атлантическом секторе Южного океана более чем на 0,2 мг/м³. Разработанные региональные алгоритмы приводят к незначительному уменьшению среднеквадратичного отклонения на 0,1 мг/м³ [22]. Однако, например, в работе [9] на основе сопоставления спутниковых и экспедиционных данных в Южной Атлантике было показано, что коэффициент корреляции между этими данными превышал 0,93, и сделан вывод, что они могут быть использованы для оценки содержания *Chl-a* в поверхностном слое в исследованных районах Антарктики. Настоящая статья в большей степени посвящена качественному описанию пространственно-временной изменчивости концентрации *Chl-a*, а также определению районов максимальных концентраций *Chl-a* на морской поверхности. При интерпретации результатов необходимо учитывать неизбежные неточности описываемых абсолютных значений концентрации *Chl-a*, связанные с использованием спутниковых данных.

3. Сезонная изменчивость концентрации *Chl-a*

Среднее пространственное распределение концентрации *Chl-a* на морской поверхности за 2002–2019 гг. для исследуемого района (рис. 1) демонстрирует значительную пространственную неоднородность ее значений. Зоны высоких концентраций со значениями 0,5–1 мг/м³ сосредоточены в основном восточнее пролива Дрейка, при этом в самом проливе концентрации *Chl-a* значительно ниже (0,1–0,2 мг/м³). На рис. 1 выделяются несколько районов, в которых средние значения концентрации *Chl-a* по спутниковым данным достигают достаточно высоких значений – более 1 мг/м³:

¹ Бакуева Я. И., Кубрякова Е. А., Кубряков А. А. Особенности сезонной изменчивости концентрации хлорофилла *a* в Атлантическом секторе Южного океана по спутниковым данным // Моря России: вызовы отечественной науки : тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Севастополь, 26–30 сентября 2022 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2022. С. 180–181.

- область 1 – восточное побережье Южной Америки, южнее залива Ла-Плата, в который впадает вторая по величине река Южной Америки – Парана. Отсюда воды с высокими значениями концентрации *Chl-a* транспортируются на восток вдоль субантарктического фронта;
- область 2 – район выноса глубинных вод полярным фронтом вблизи о-вов Южная Георгия;
- область 3 – район выноса вод от прикромочной зоны Антарктического п-ова;
- область 4 – антарктический шельф к востоку от моря Уэдделла.



Р и с. 1. Среднее пространственное распределение концентрации *Chl-a* (mg/m^3) (a) и максимальной концентрации *Chl-a* по месяцам (b) по данным спутниковых наблюдений *MODIS-Aqua* в исследуемом районе за 2002–2019 гг.

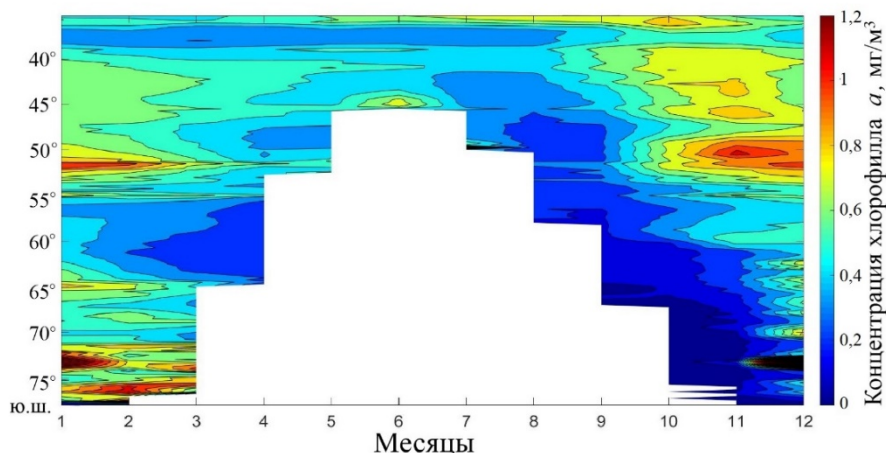
F i g. 1. Average spatial distribution of the *Chl-a* concentration (mg/m^3) (a) and maximum *Chl-a* concentration by months (b) based on the *MODIS-Aqua* satellite observations in the area under study for 2002–2019

Далее в работе будет проведен подробный анализ изменчивости концентрации *Chl-a* для каждой из этих отдельных областей.

Между областями 1 и 3 наблюдается зона низких концентраций *Chl-a*, связанная с адвекцией бедных тихоокеанских вод через пролив Дрейка. Язык этих вод меняет свое положение в зависимости от сезона и год от года, на рис. 1, a он наблюдается до 40° з. д., т. е. вплоть до области 2 – о-вов Южная Георгия.

Диаграмма среднего сезонного хода концентрации *Chl-a* (рис. 1, a) для исследуемого района на каждой широте демонстрирует, что в северной части района, выше 45° ю. ш., спутниковые данные о концентрации *Chl-a* получают круглый год. Южнее 45° ю. ш. на диаграмме заметна достаточно обширная зона, где данные полностью отсутствуют из-за полярной ночи, поэтому исследовать изменчивость концентрации *Chl-a* по спутниковым данным за весь год в этом районе не представляется возможным.

На диаграмме (рис. 2) хорошо видна выраженная особенность – с увеличением широты пик концентрации *Chl-a* и начало цветения наблюдаются позже. Такая особенность, отмеченная в работах [4, 9], связана с разными сроками начала интенсивного прогрева и появления устойчивой термической стратификации, которая вызывает начало цветения.



Р и с. 2. Сезонная диаграмма изменчивости концентрации *Chl-a*, осредненной по долготам, на разных широтах для исследуемой акватории за 2002–2019 гг.

F i g. 2. Seasonal diagram of the longitude-averaged *Chl-a* concentration variability at different latitudes for the area under study for 2002–2019

Концентрация *Chl-a* в северной части акватории (35°–45° ю. ш.) начинает увеличиваться, как правило, с сентября – октября ежегодно, достигая максимума средних значений к ноябрю. Значения выше средних наблюдаются с сентября по апрель. На широтах 45°–55° наблюдается сходная картина сезонной динамики концентрации *Chl-a*. Области с минимальной концентрацией *Chl-a* (около 0,2 мг/м³) фиксировались с августа по сентябрь, области с максимальной концентрацией *Chl-a* регистрировались с ноября по февраль с локальными максимумами в пределах 0,9–1,1 мг/м³. Отдельные широты выделяются очень высокими значениями концентрации *Chl-a*, что связано с расположением здесь определенных топографических особенностей: островов, шельфовых зон, которые рассмотрены более подробно в следующем разделе.

На широтах 55°–65° ю. ш. наблюдаются наименьшие амплитуды сезонного хода концентрации *Chl-a*. Минимум отмечается с августа по апрель, а повышенные значения – с октября по февраль. В этих широтах находится пролив Дрейка, а также глубоководные районы Южной Атлантики, где значения концентрации *Chl-a* минимальны.

С 65° ю. ш. по 75° ю. ш. процесс цветения, как правило, наблюдается с ноября, достигая максимума в декабре – январе (значения более 1,2 мг/м³) и продолжаясь до марта. В этих областях спутниковые наблюдения позволяют располагать данными от двух до четырех месяцев в году в зависимости от широты. Данный район наблюдения расположен в южной части акватории у антарктического шельфа. Предположительно, рост концентрации *Chl-a* здесь связан с таянием прикромочных льдов.

Для определения пространственной изменчивости времени достижения пиковых значений концентрации *Chl-a* ее сезонный ход был рассчитан в каждой точке массива. Далее определялся месяц, соответствующий ее максимуму (см. рис. 1, *b*). Время достижения пиковых концентраций *Chl-a* варьирует от октября по март в разных районах. Раньше всего пик фиксируется в октябре –

ноябре: в наиболее теплых водах над патагонским шельфом, в субтропических широтах (выше 40° ю. ш.). В это же время фиксируется пик в южной части пролива Дрейка. Причиной повышения концентрации *Chl-a* до пиковых значений в этой области является наличие источников биогенных элементов в мелководных областях шельфа вблизи Южных Шетландских островов. К декабрю пиковые значения смещаются в центральные части района на широту 45° ю. ш. В январе и феврале максимальный рост концентрации *Chl-a* регистрируется в южной части Атлантического сектора, в основном южнее 65° ю. ш., вплоть до антарктического шельфа. При этом в январе пик фиксируется только в морской восточной части моря Уэдделла и в море Скоша, которые в это время освобождаются ото льда.

На карте среднемесячных максимальных концентраций *Chl-a* (см. рис. 1, *b*) выделяются две области на севере, в которых пик также отмечается в январе – феврале: 1) на границе Полярного и Субантарктического фронтов, между 40° и 48° ю. ш.; 2) область восточнее о-вов Южная Георгия (10° – 20° в. д., 50° – 60° с. ш.). Причиной такого смещения пика в обеих областях, вероятно, является горизонтальная адвекция *Chl-a* и биогенов из районов их высокой концентрации. В первом случае источником питательных веществ являются воды аргентинского шельфа, во втором – о-ва Южная Георгия (см. рис. 1, *a*). Эти процессы более подробно будут рассмотрены далее.

Анализ сезонных карт (рис. 3) показывает, что повышение концентрации *Chl-a* начинается в сентябре вблизи берега Южной Америки в районе встречи Фолклендского и Бразильского течений. В сентябре область с высокой концентрацией *Chl-a* наблюдается на всем аргентинском шельфе вокруг южного берега архипелага Огненная Земля и до Фолклендских о-вов (от $0,7$ до более чем $2,0$ мг/м³). Это, вероятнее всего, связано с интенсификацией стока реки Парана в весенний период и его поступлением в шельфовую зону под влиянием адвекции Бразильского течения на данном участке.

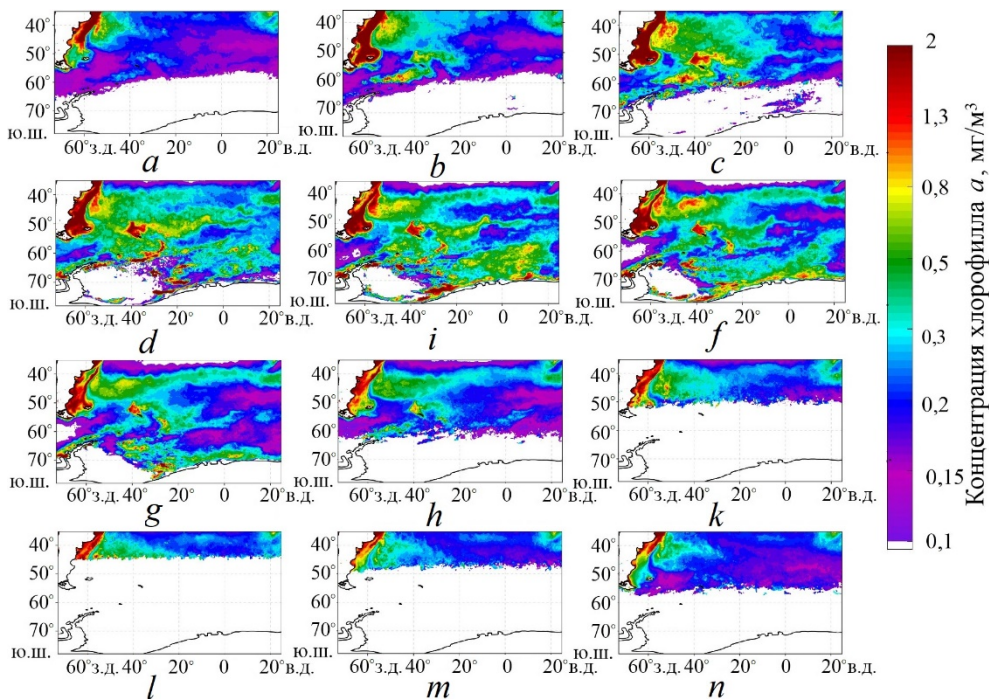
В октябре области с высокими значениями концентрации *Chl-a* (более $2,0$ мг/м³) распространяются над всем аргентинским шельфом и достигают крайней точки архипелага Огненная Земля – мыса Горн на юге и Фолклендских о-вов на востоке. Последующее повышение концентрации *Chl-a* приходится на позднюю антарктическую весну: середину – конец ноября. В это время наблюдается повсеместное увеличение зон с повышенными значениями концентрации *Chl-a* и появление области высоких концентраций на южной границе Полярного фронта вблизи о-вов Южная Георгия (50° – 60° ю. ш., 30° – 50° з. д.). Резкий рост концентрации *Chl-a* в этих районах связан [7, 8] в первую очередь с выносом терригенной взвеси и биогенных веществ от островов и окружающего их шельфа. Кроме этого, вероятно, важную роль играет апвеллинг, вызванный сдвигом скорости АЦТ при обтекании шельфа островов, приводящий к резкому поднятию питательных веществ из глубинных слоев [8].

Полосы высоких значений концентрации *Chl-a* от о-вов Южная Георгия вытягиваются далеко на восток вплоть до долготы 10° в. д. Такое расширение полосы связано с распространением биогенов от островов под действием адвекции АЦТ [8]. Остров Южная Георгия в этом случае выступает в роли постоянного источника питательных веществ, который непрерывно снабжает биогенами акваторию восточнее его. К декабрю полоса высоких значений

концентрации *Chl-a* распространяется на ~ 5000 км на восток. Действительно, по данным альтиметрии, скорость АЦТ составляет примерно 0,5 м/с, тогда за три месяца она сместится на ~ 4000 км. Этот перенос и объясняет смещение пика цветения в районе 2 (35°–45° в. д., 50°–60° ю. ш.) (рис. 3). В северной части исследуемого района область высоких значений, связанная с другим источником (река Парана), также значительно вытягивается на восток, достигая 10° з. д. и вызывая смещение пика цветения в этой зоне.

С начала декабря зоны с повышенной концентрацией *Chl-a* смещаются в более южные широты, вплоть до бровки континентального шельфа восточнее Антарктического п-ова, и к концу декабря распространяются вдоль антарктического шельфа. В данной области наиболее ярко выраженной является динамика концентрации *Chl-a* в январе, когда высокие значения достигают более 0,6 мг/м³ и концентрируются на бровке антарктического шельфа. Здесь они отмечаются до февраля, в марте показатели концентрации *Chl-a* значительно уменьшаются.

Далее начинается достаточно динамичное повсеместное снижение концентрации *Chl-a* до 0,1–0,5 мг/м³ к началу апреля, за исключением акватории вблизи стока рек Парана и Уругвай (рис. 3, *g, h*). Следует отметить, что данные о концентрации *Chl-a* с апреля по октябрь отсутствуют в связи с оптическими особенностями сканера и ледообразованием (рис. 3, *k – n*).



Р и с. 3. Среднее содержание *Chl-a* в выбранном районе (30°–80° ю. ш., 70° з. д. – 25° в. д.) по данным спутниковых наблюдений *MODIS-Aqua* в сентябре (*a*), октябре (*b*), ноябре (*c*), декабре (*d*), январе (*e*), феврале (*f*), марте (*g*), апреле (*h*), мае (*k*), июне (*l*), июле (*m*) и августе (*n*) за 2002–2019 гг.

F i g. 3. Average *Chl-a* content in the selected region (30°–80° S, 70° W–25° E) based on the *MODIS-Aqua* satellite observations in September (*a*), October (*b*), November (*c*), December (*d*), January (*e*), February (*f*), March (*g*), April (*h*), May (*k*), June (*l*), July (*m*) and August (*n*) for 2002–2019

Следует выделить как отдельный район пролив Дрейка, который отличается наиболее низкими значениями концентрации *Chl-a* [7, 8], связанными с адвекцией бедных тихоокеанских вод через пролив. В западной части пролива низкая концентрация *Chl-a* (менее 0,2 мг/м³) наблюдается во все сезоны. В восточной части в ноябре – декабре отмечается сезонный пик роста концентрации *Chl-a* до значений 0,3–0,5 мг/м³, связанный с распространением биогенов из районов с южной границы Полярного фронта. Положение и интенсивность залива тихоокеанских вод и минимума концентрации *Chl-a* имеют выраженную сезонную и межгодовую изменчивость, которая значительно влияет на пространственное распределение концентрации *Chl-a* в этом районе.

4. Региональные особенности изменчивости концентрации *Chl-a* в зонах ее локальных максимумов в Южной Атлантике

Для более детального понимания физических факторов роста концентрации *Chl-a* было проведено детальное исследование ее изменчивости в четырех выбранных районах (см. рис. 1).

4.1. Район 1 – аргентинский шельф

Область восточного побережья Южной Америки находится южнее залива Ла-Плата, между 22°–59° ю. ш. и 46°–75° з. д. Этот район характеризуется высокими значениями концентрации *Chl-a* в течение всего года, что связано с выносом речных вод от рек Парана и Уругвай (годовой сток рек в океан в общей сложности составляет 650 км³). Основной чертой пространственной изменчивости является область с концентрациями *Chl-a* более 1,3 мг/м³, которая совпадает с положением аргентинского шельфа. В августе такие воды наблюдаются до глубины 100 м, в сентябре до глубины 200 м, а в октябре – до 500 м.

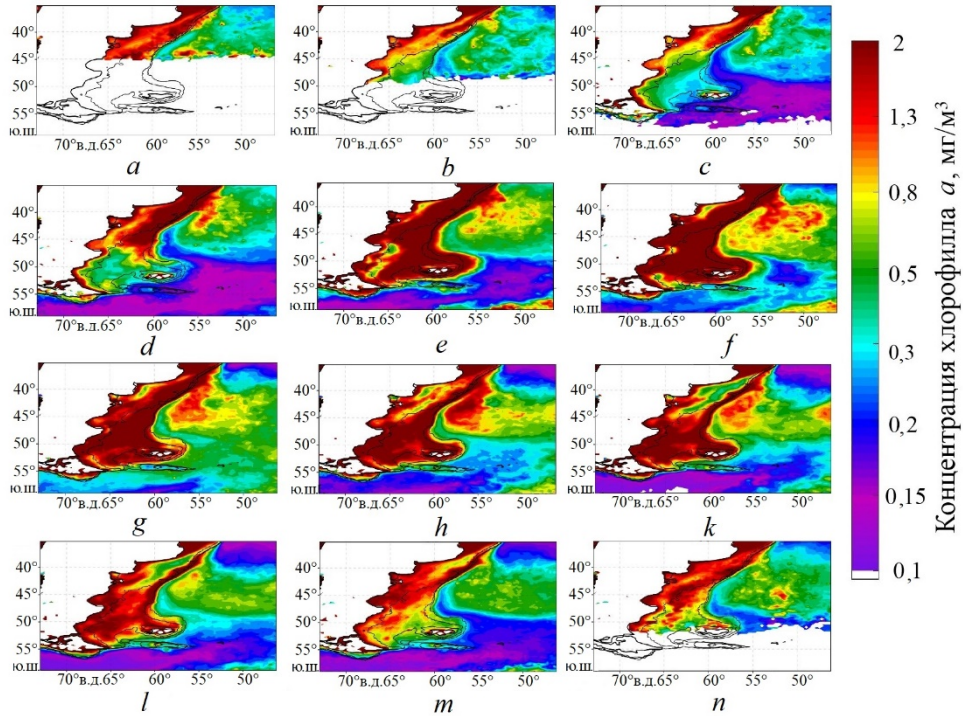
Снижение концентрации *Chl-a* в этом районе, особенно выраженное в центре шельфа, наблюдается в летний период. В июне ее высокие значения локализуются в прибрежной части района у устья реки Парана, а также на бровке аргентинского шельфа на глубинах 100–200 м (рис. 4, *a*). Такое же распределение концентраций наблюдается в течение июля и августа, когда высокие значения занимают еще меньшие области (рис. 4, *b*, *c*).

В сентябре концентрация *Chl-a* в этих районах начинает расти, особенно в северной части района, откуда богатые *Chl-a* воды увлекаются Бразильским течением и мезомасштабными вихрями на юго-восток (рис. 4, *d*).

К октябрю (рис. 4, *e*) значения концентрации *Chl-a* достигают максимума (более 5 мг/м³) и занимают почти весь аргентинский шельф до глубины 500 м, достигая Фолклендских о-вов. С октября по декабрь ее значения повышаются в южной части района и снижаются в северной. Распределение концентрации *Chl-a* очень неравномерно по пространству. На климатических картах отмечается ряд локальных максимумов и минимумов, которые, вероятно, связаны с гидрологическими особенностями – выраженными фронтальными зонами в районе сопряжения Бразильского и Фолклендского течений.

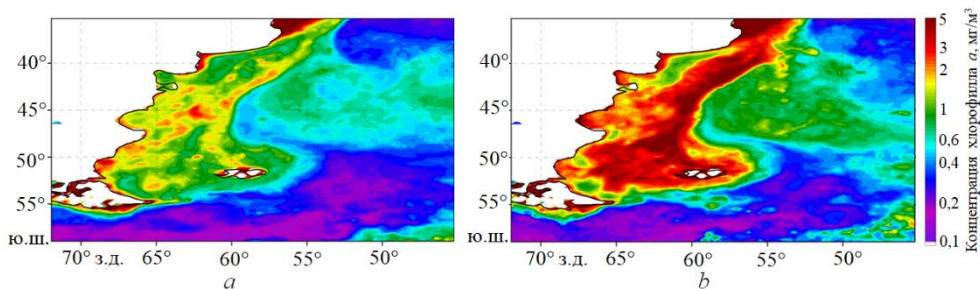
В северной части района отмечается зона выноса богатых высоким содержанием *Chl-a* вод на восток. Ширина выноса увеличивается по мере наступления антарктического лета (рис. 4, *f* – *k*), зона выноса сдвигается в южном направлении к февралю. Далее области распространения богатых *Chl-a* вод на восток сужаются, образуя к апрелю достаточно узкий коридор выноса

(рис. 4, *m*). Следует отметить мощное локальное цветение в мае над глубоководной частью акватории в восточной части района. Дальнейшее развитие этого цветения не удастся отследить в июне и июле из-за отсутствия данных в этих широтах (рис. 4, *a*, *b*).



Р и с. 4. Распределение среднемесячной концентрации *Chl-a* в июне (*a*), июле (*b*), августе (*c*), сентябре (*d*), октябре (*e*), ноябре (*f*), декабре (*g*), январе (*h*), феврале (*k*), марте (*l*), апреле (*m*) и мае (*n*) с 2002 по 2019 г. На карты нанесены изобаты 100, 200 и 500 м

F i g. 4. Distribution of the monthly-averaged *Chl-a* concentration in June (*a*), July (*b*), August (*c*), September (*d*), October (*e*), November (*f*), December (*g*), January (*h*), February (*k*), March (*l*), April (*m*) and May (*n*) in 2002–2019. The 100, 200 and 500 m isobaths are plotted on the maps



Р и с. 5. Распределение среднегодовых концентраций *Chl-a* в выбранной области за 2005 (*a*) и 2011 гг. (*b*)

F i g. 5. Distribution of the annual average *Chl-a* concentrations in the selected region for 2005 (*a*) and 2011 (*b*)

Изменчивость концентрации *Chl-a* характеризуется выраженными межгодовыми колебаниями, затрагивающими весь исследуемый район. На рис. 5 представлены карты среднегодовых концентраций *Chl-a* на поверхности по данным спутниковых наблюдений за 2005 и 2011 гг. В 2005 г. среднегодовое значение концентрации *Chl-a* было минимальным и области с высокими значениями занимали наименьшие площади. В 2011 г. (рис. 5, *b*) был зафиксирован пик концентрации *Chl-a* в данном районе за 2002–2019 гг. В это время концентрации на всем патагонском шельфе и в северо-восточной части района были в два раза выше, чем в 2005 г.

4.2. Район 2 – о-ва Южная Георгия

Следующая исследуемая область находится вблизи о-вов Южная Георгия между 48°–56° ю. ш. и 32°–45° з. д. Эта область вытянута в широтном направлении (см. рис. 1, *a*), что связано с переносом биогенов на восток АЦТ. Следует отметить, что в этом районе данные о концентрации *Chl-a* по спутниковым наблюдениям доступны почти круглый год с августа до апреля.

Анализ карт распределения среднемесячных концентраций *Chl-a* позволил определить пространственно-временные характеристики цветения в данном районе на примере среднемесячных карт за 2002 по 2019 г. На карты были нанесены изобаты 100, 200 и 500 м для лучшего определения границ областей повышенных концентраций *Chl-a*.

График временной и сезонной изменчивости (рис. 6, *a*) показывает, что ежегодное резкое повышение концентрации *Chl-a* в данном районе в среднем отмечается с сентября, а максимума ее значения достигают в декабре (в среднем около 0,87 мг/м³). Такие высокие средние концентрации *Chl-a* держатся довольно недолго, к январю значения опускаются ниже 0,7 мг/м³. В целом с начала года по август наблюдается заметное снижение концентраций (минимум в августе – около 0,2 мг/м³).

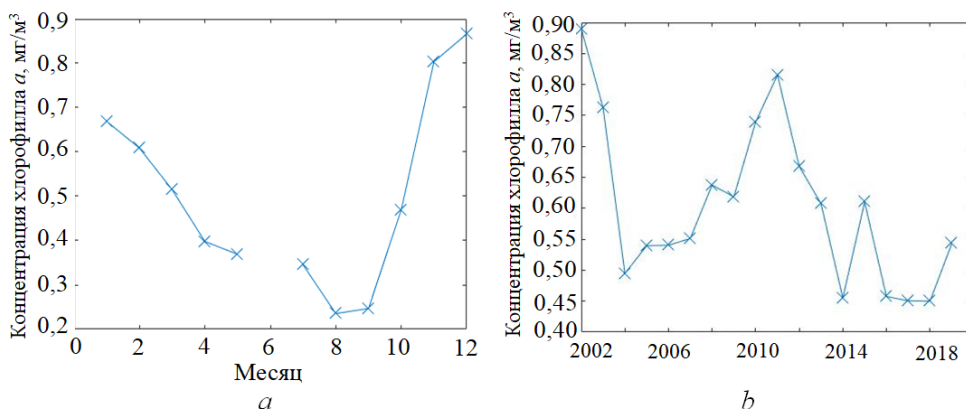
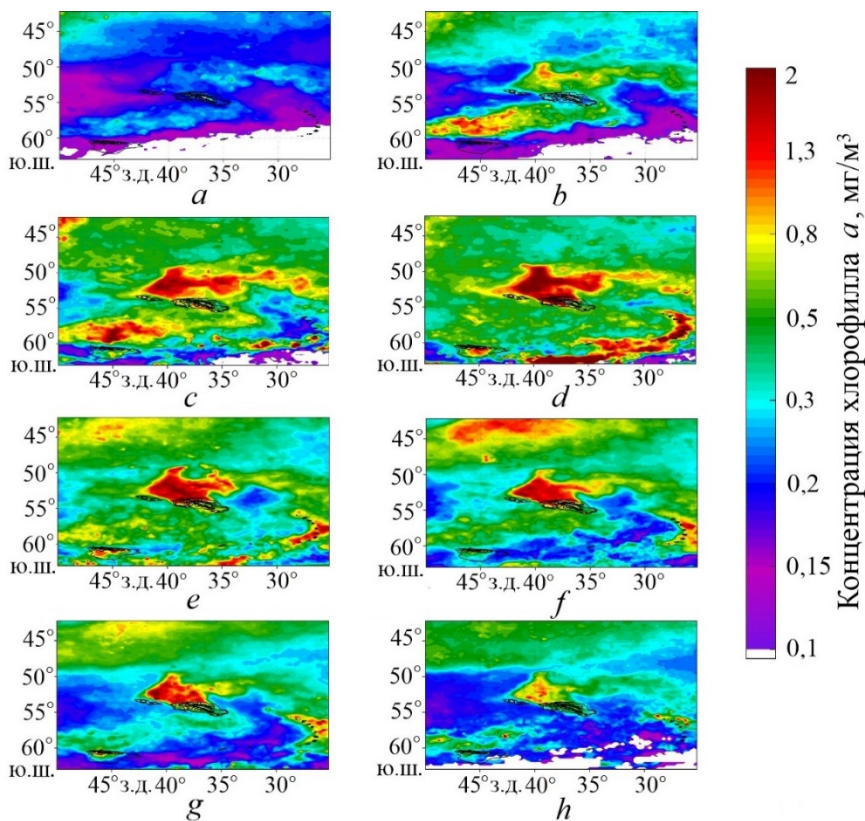


Рис. 6. Изменчивость средней концентрации *Chl-a* в исследуемой области за 2002–2019 гг.: *a*) сезонная; *b*) среднегодовая

Fig. 6. Variability of the *Chl-a* average concentration in the region under study in 2002–2019: *a*) seasonal and *b*) annual average ones

Анализ среднемесячных карт позволил детально исследовать пространственно-временную изменчивость исследуемого параметра. Незначительные локальные повышения концентраций *Chl-a* ежегодно начинаются с сентября и имеют ярко выраженную меридиональную направленность (рис. 7, *a*), связанную с переносом биогенов и фитопланктона потоком АЦТ. Далее следует резкое повышение концентрации в октябре, при этом зоны с высокими концентрациями расположены на подветренной стороне мелководных банок на глубинах более 500 м. Максимальные значения концентрации *Chl-a* фиксируются в восточной части мелководных банок, при этом языки выноса богатых *Chl-a* вод распространяются с запада на восток, достигая в ноябре 25° з. д. Область максимума имеет ромбовидную форму в области 33°–43° з. д., 49°–55° ю. ш. и характеризуется концентрациями выше 2 мг/м³.



Р и с. 7. Распределение среднемесячной концентрации *Chl-a* в сентябре (*a*), октябре (*b*), ноябре (*c*), декабре (*d*), январе (*e*), феврале (*f*), марте (*g*) и апреле (*h*). На карты нанесены изобаты 100, 200 и 500 м

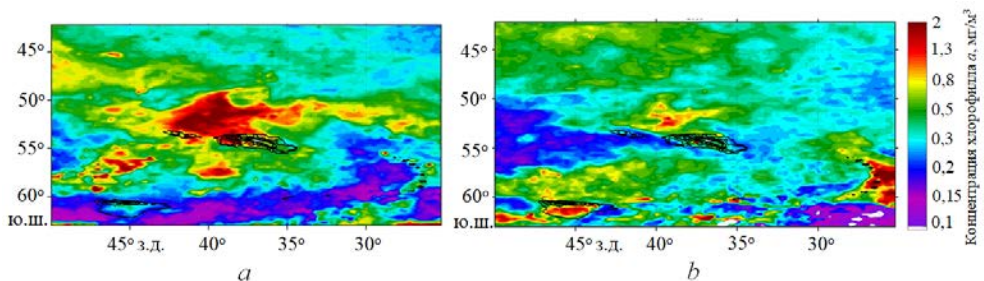
F i g. 7. Distribution of the monthly-averaged *Chl-a* concentrations in September (*a*), October (*b*), November (*c*), December (*d*), January (*e*), February (*f*), March (*g*), and April (*h*). The 100, 200 and 500 m isobaths are plotted on the maps

Наиболее ярко выражена данная особенность в декабре и январе (рис. 7, *d*, *e*), когда подобное расположение зоны цветения демонстрирует, насколько значительное воздействие особенности топографии оказывают на АЦТ и, как

следствие, на изменчивость концентрации *Chl-a*. Натекание потока на банки приводит к развитию синоптических вихрей и апвеллинга, что может являться одной из дополнительных причин увеличения потока биогенов в данном районе [23]. С февраля по апрель области высоких и средних концентраций *Chl-a* постепенно уменьшаются и смещаются в более низкие широты.

Следует отметить мощное цветение, наблюдаемое южнее о-вов Южная Георгия, которое особо ярко проявляется в декабре. Область цветения находится в прикромочной зоне льда на севере моря Уэдделла и ее расположение, по-видимому, связано с выносом биогенов при таянии льдов (рис. 7, *d*).

С 2002 по 2019 г. в данном регионе распределение средней концентрации *Chl-a* по поверхности неравномерно, в течение всего сезона прослеживаются как области с высокими значениями, так и области со стабильно низкими значениями. Средние показатели концентрации *Chl-a* равны $0,55 \text{ мг/м}^3$ (при этом максимальное и минимальное значения показателя достигали $3,64 \text{ мг/м}^3$ и $0,13 \text{ мг/м}^3$ соответственно). На рис. 6, *b* отображен график среднегодовой изменчивости *Chl-a* в выбранный период, на котором четко наблюдаются заметные различия в показателях концентрации в разные годы. Пример на рис. 8 демонстрирует среднегодовое распределение концентрации *Chl-a* в 2011 и в 2016 гг. В 2016 г. (рис. 8, *b*) ее среднегодовое значение было минимальным и области с высокими значениями занимали наименьшие площади. В 2011 г. (рис. 8, *a*) был зафиксирован пик концентрации *Chl-a* в данном районе за 2002–2019 гг. В это время средние концентрации в выбранной акватории достигали в два раза бóльших значений, чем в 2016 г.

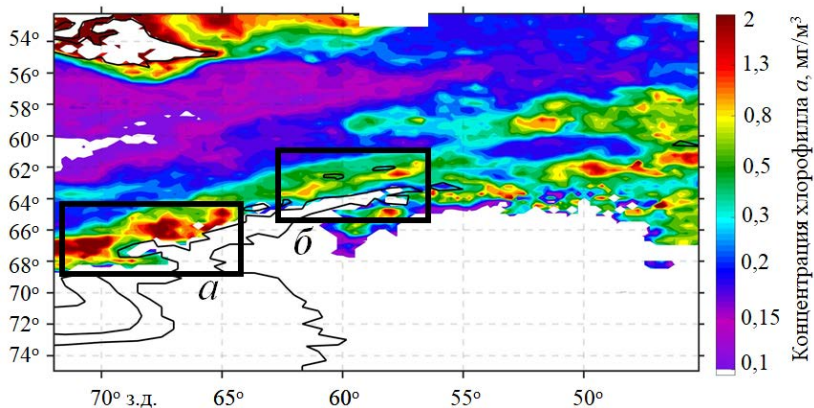


Р и с. 8. Распределение среднегодовых концентраций *Chl-a* в выбранной области за 2011 (*a*) и 2016 гг. (*b*)

Fig. 8. Distribution of the annual average *Chl-a* concentrations in the selected region for 2011 (*a*) and 2016 (*b*)

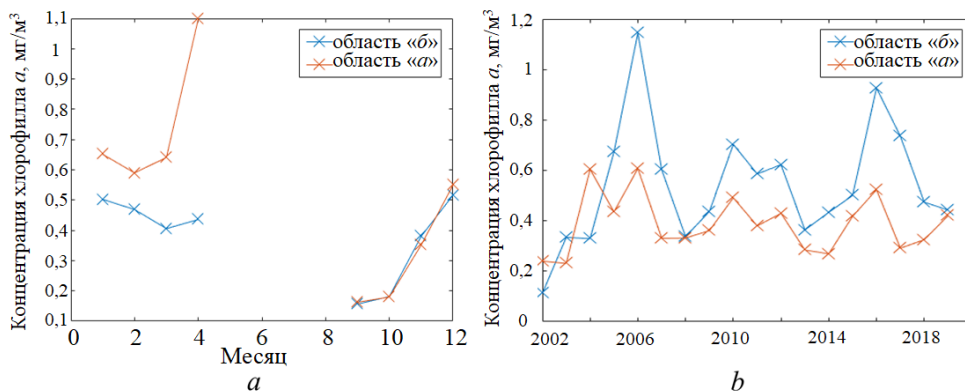
4.3. Район 3 – шельфовая зона Антарктического п-ова

На основе анализа пространственной изменчивости выделяется две основные области цветения вблизи Антарктического п-ова между 52° – 75° ю. ш. и 65° – 72° з. д. (рис. 9). Область «а» имеет прямоугольную форму, находится в западной прибрежной части Антарктического п-ова в северной части моря Беллинсгаузена в пределах 64° – 67° ю. ш. и 65° – 70° з. д., область «б» расположена вблизи Южных Шетландских о-вов в пределах 61° – 64° ю. ш. и 54° – 63° з. д. Обе исследуемые области находятся над континентальным шельфом с глубинами до 500 м.



Р и с. 9. Области повышенных концентраций *Chl-a* вблизи Антарктического п-ова по данным спутниковых наблюдений *MODIS-Aqua*
Fig. 9. Areas of the increased *Chl-a* concentrations near the Antarctic Peninsula based on the *MODIS-Aqua* satellite observations

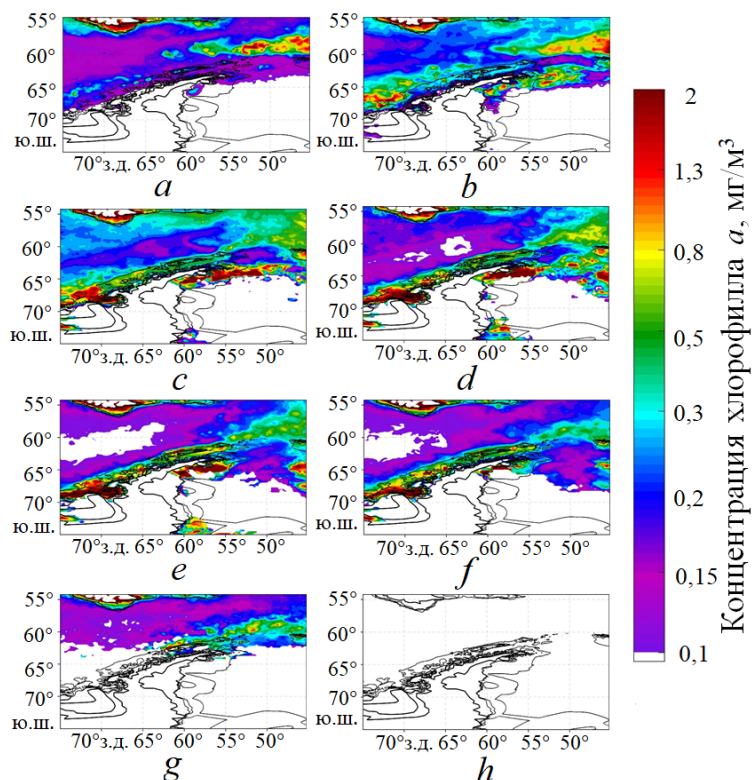
Сезонная изменчивость в обоих районах сходна (рис. 10). С сентября по декабрь концентрации повышаются, однако в области «а» показатели значительно выше (0,55 мг/м³ в области «а» против 0,35 мг/м³ в области «б»). Интересное наблюдение: в области «а» ежегодно повышаются концентрации *Chl-a* также с марта по апрель. С мая по август данные о концентрации *Chl-a* отсутствуют в обеих областях.



Р и с. 10. Изменчивость средней концентрации *Chl-a* в исследуемой области за 2002–2019 гг.: а) сезонная; б) среднегодовая
Fig. 10. Variability of the *Chl-a* average concentration in the region under study in 2002–2019: а) seasonal and б) annual average ones

Сезонная эволюция концентрации *Chl-a* (рис. 11) указывает на ежегодное локальное повышение концентрации, начинающееся с октября, вблизи шельфа Георга VI. Данное повышение к ноябрю распространяется вдоль южного фронта АЦТ вблизи шельфа Антарктического п-ова и, вероятнее всего, связано с выносом питательных терригенных веществ от прикомочных льдов, а также

с апвеллингом на фронте АЦТ (рис. 11, *a*). С декабря по март (рис. 11, *c – f*) в районе области «а» локализуется зона наибольшего цветения (более 2 мг/м³). Одной из важных причин такого процесса является прикромочное цветение, возникающее в результате попадания питательных веществ в воду при таянии льда. В результате этого процесса, а также выноса богатых вод южным фронтом АЦТ зона высоких значений концентрации *Chl-a* распространяется достаточно равномерно вдоль всего континентального шельфа Антарктического п-ова (рис. 11, *d – f*), принимая очертания течений, после чего выносятся в восточную часть бассейна под действием АЦТ.



Р и с. 11. Распределение среднемесячных концентраций *Chl-a* в выбранной области в октябре (*a*), ноябре (*b*), декабре (*c*), январе (*d*), феврале (*e*), марте (*f*), апреле (*g*) и мае (*h*) с 2002 по 2019 г. по данным спутниковых наблюдений. На карты нанесены изобаты 100, 200 и 500 м

F i g. 11. Distribution of the monthly-averaged *Chl-a* concentrations in the selected area in October (*a*), November (*b*), December (*c*), January (*d*), February (*e*), March (*f*), April (*g*) and May (*h*) in 2002–2019 based on satellite observations. The 100, 200 and 500 m isobaths are plotted on the maps

По мере уменьшения площади цветения в прикромочной ледовой зоне (область «а») уменьшается и язык выноса питательных вод на более северные широты (область «б»). Данное явление достаточно хорошо заметно в марте (рис. 11, *f*), когда высокие значения концентрации *Chl-a* наблюдаются только у юго-западной стороны Антарктического п-ова. Начиная с апреля дальнейшее распространение цветения определить по оптическим данным невозможно из-за отсутствия оптических данных (рис. 11, *g, h*).

4.4. Район 4 – антарктический шельф к востоку от моря Уэдделла

Последний выделенный регион локализуется в области южных широт: антарктический шельф и юго-восточная часть моря Уэдделла между 66°–78° ю. ш. и 10° з. д. – 50° в. д. Данный район вызывает интерес из-за процессов, вызывающих увеличение концентраций *Chl-a* при таянии льдов. Изменчивость цветения определяется не только прогревом поверхностного слоя, но и динамикой отступления границы ледового поля с эффектом цветения на кромке тающих льдов, так как по мере таяния льда, а также из шельфовых отложений в воду поступает достаточное количество железа.

Данный район достаточно сильно вытянут в широтном направлении и имеет два отличных друг от друга по пространству и времени наступления эпицентра повышенных значений концентрации *Chl-a*. В связи с этим весь район также был поделен на две меньшие области: область «а» имеет квадратную форму и находится в юго-восточной части моря Уэдделла в пределах 71°–77° ю. ш. и 20°–40° з. д., область «б» имеет вытянутую вдоль антарктического шельфа форму и располагается между 66°–70° ю. ш. и 10° з. д. – 20° в. д. (рис. 12).

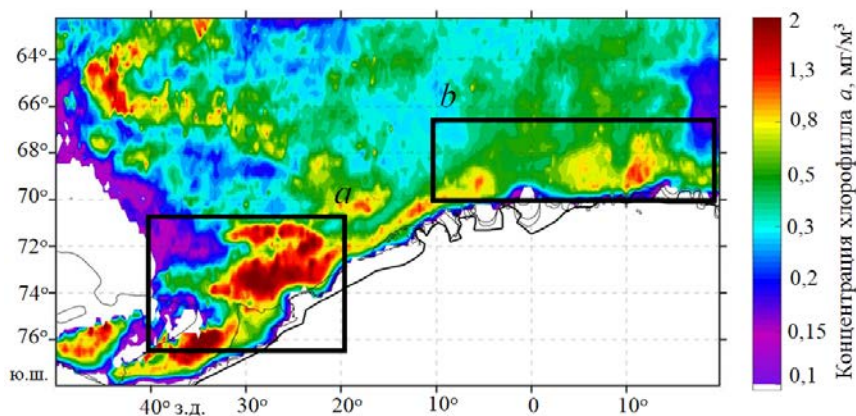
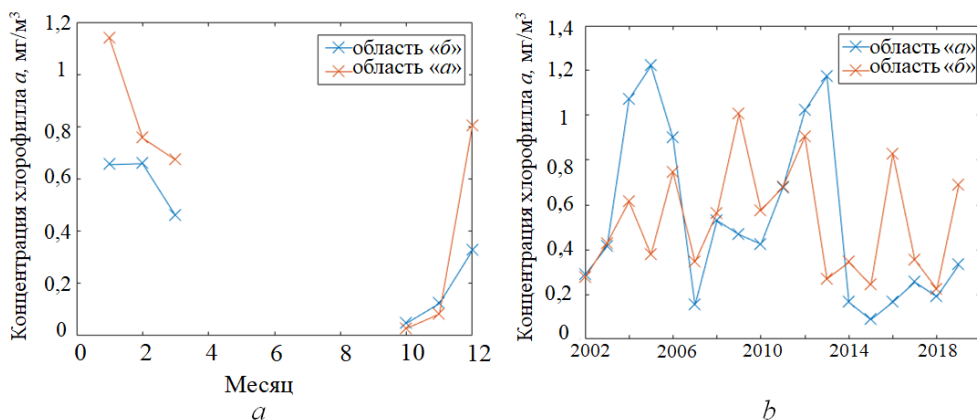


Рис. 12. Области повышенных концентраций *Chl-a* в районе 4 за 2002–2019 гг. по данным спутниковых наблюдений *MODIS-Aqua*

Fig. 12. Areas of the increased *Chl-a* concentrations in region 4 for 2002–2019 based on the *MODIS-Aqua* satellite observations

Несмотря на близость областей «а» и «б», среднегодовая изменчивость концентраций *Chl-a* в данном районе различна. Так, в области «а» его средняя концентрация за все время равна 0,39 мг/м³, максимальная и минимальная концентрации достигают 4,14 мг/м³ и 0,015 мг/м³ соответственно. В области «б» его средняя концентрация равна 0,34 мг/м³, максимальная концентрация достигает гораздо меньших показателей и равна 2,07 мг/м³, минимальная концентрация – 0,017 мг/м³. На рис. 13 отображены средние концентрации *Chl-a* в двух областях в различные годы. На графике (рис. 13, б) можно заметить различающиеся по годам пики концентраций *Chl-a*. Для области «а» наблюдаются два крупных пика концентраций (более 0,9 мг/м³ в 2004–2006 и 2012–2013 гг.), в остальные годы значения не превышают 0,6 мг/м³. Для области «б»

характерна бóльшая межгодовая изменчивость концентраций *Chl-a*, когда пики наблюдались каждые 1–2 года, но достигали меньших значений, чем в области «а». Следует также отметить отсутствие выраженной корреляции между показателями в областях: пиковые годы для области «а» не совпадают с пиковыми годами для области «б», и наоборот. Это свидетельствует о разных физических факторах, влияющих на повышение концентраций *Chl-a* в этих районах, в частности различиях в ледовом покрытии.



Р и с. 13. Временная изменчивость средней концентрации *Chl-a* в исследуемых областях за 2002–2019 гг.: а) сезонная; б) среднегодовая

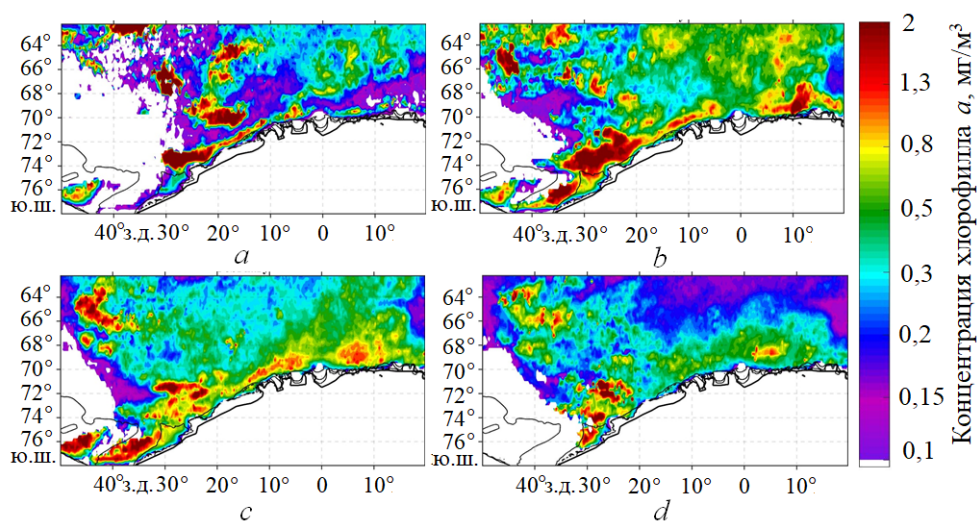
Fig. 13. Temporal variability of the average *Chl-a* concentration in the regions under study in 2002–2019: а) seasonal and б) annual average ones

Исходя из графиков сезонной изменчивости, показатели концентрации *Chl-a* характеризуются ежегодным повышением, начинающимся с октября. Цветения, как правило, имеют максимумы в январе (для области «а» среднемесячные показатели достигают 1,17 мг/м³, для области «б» значительно ниже – 0,65 мг/м³). После января концентрации резко снижаются, достигая наблюдаемых минимумов в марте. Как уже было сказано выше, с апреля по сентябрь данные об изменчивости концентраций *Chl-a* на поверхности полностью отсутствуют.

Сезонная эволюция распределения концентрации *Chl-a* описана на основании среднемесячных карт за 2002–2019 гг. На карты нанесены изобаты 100, 200 и 500 м для лучшего определения границ областей повышенных концентраций *Chl-a*. Следует отметить крайне короткий ежегодный период наблюдения с ноября по март, который связан с оптическими свойствами спутниковых наблюдений.

При анализе было отмечено ежегодное повышение значений показателя в декабре, в большинстве лет начинающееся на границе морей Уэдделла и Лазарева (рис. 14, а). Воды с высоким содержанием *Chl-a* выносятся с севера на юг и достигают континентального шельфа под действием круговорота Уэдделла (Weddell Cycle), что отчетливо видно на рис. 14, б, с. В целом цветение развивается с востока на запад вдоль прикромочной ледовой зоны и к январю

образует области очень высоких значений *Chl-a* (с показателями, иногда достигающими более 2 мг/м^3) в южной части моря Уэдделла (рис. 14, *b*), вблизи ледника Ронне и большей части акватории моря Рисер-Ларсена. Данные высокие значения сохраняются вплоть до февраля (рис. 14, *c*). В марте данные о концентрации *Chl-a* на морской поверхности в западной части области «а» в большинстве случаев отсутствуют на картах из-за ледовой обстановки, тогда как в области «б» концентрация характеризуется резким снижением значений от очень высоких до средних (рис. 14, *d*).



Р и с. 14. Распределение среднемесячной концентрации *Chl-a* в декабре (*a*), январе (*b*), феврале (*c*) и марте (*d*) с 2002 по 2019 г. На карты нанесены изобаты 100, 200 и 500 м

F i g. 14. Distribution of the monthly-averaged *Chl-a* concentration in December (*a*), January (*b*), February (*c*) and March (*d*) in 2002–2019. The 100, 200 and 500 m isobaths are plotted on the maps

5. Заключение

В данной работе на основе анализа спутниковых измерений *MODIS-Aqua* за 2002–2019 гг. впервые проведено исследование особенностей пространственно-временной изменчивости сезонного хода концентрации *Chl-a* в различных районах Южной Атлантики и Атлантическом секторе Южного океана. В целом над всей областью исследования наблюдается более позднее начало цветения с пиком концентрации *Chl-a* по мере увеличения широты. В северной части пик концентрации *Chl-a* наблюдается в ноябре – декабре, а в южной – в январе – феврале, что связано со временем начала сезонного прогрева и появления устойчивой термической стратификации. Однако в ряде районов эта зависимость нарушается. В этих районах, расположенных к востоку от мощных источников биогенных элементов (островов, шельфовых вод), время достижения пиковых значений концентрации *Chl-a* связано с влиянием адвекции фитопланктона и биогенных элементов и наступает с задержкой, необходимой для переноса примеси под влиянием АЦТ.

На основе результатов анализа в выбранном регионе было выделено четыре зоны локальных максимумов концентрации *Chl-a*, а именно: аргентинский шельф; о-ва Южная Георгия; область в районе выноса вод от Антарктического п-ова; антарктический шельф к востоку от моря Уэдделла. Проведен детальный анализ сезонной изменчивости концентрации *Chl-a* в обозначенных зонах. Как правило, сезонная изменчивость этого показателя связана с расположением определенных особенностей: островов, шельфовых и фронтальных зон, выноса терригенной взвеси из рек Парана и Уругвай, прикромочной ледовой зоны и выноса вод Полярным фронтом. Отметим важную роль вод аргентинского шельфа, которые переносятся под действием Бразильского течения и влияют на изменчивость концентрации *Chl-a* на широтах 40°–45° ю. ш. на всей акватории Южной Атлантики. Другими известными важными источниками биогенов являются о-ва Южная Георгия и антарктический шельф. Цветение прикромочной зоны Антарктики характеризуется выраженной неоднородностью с максимумами в юго-восточной части моря Уэдделла и в море Лазарева.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что главным фактором появления районов с повышенными концентрациями *Chl-a* является влияние особенностей топографии на фронты АЦТ, которое обуславливает как динамический баланс всего течения, так и поступление биогенов с терригенными взвесями, что во многом определяет биопродуктивность южной части Атлантики. В высоких широтах на изменчивость концентрации *Chl-a* также значительно влияет фактор таяния прикромочных льдов.

Анализ многолетних данных демонстрирует интенсивную межгодовую изменчивость концентрации *Chl-a*, амплитуды которой могут достигать очень высоких значений. Отметим, что спутниковые наблюдения дают возможность исследовать изменчивость *Chl-a* только в поверхностном слое. Вместе с тем распределение концентрации *Chl-a* в Южном океане характеризуется мощными глубинными максимумами, динамика которых может отличаться от динамики максимальных значений поверхностной концентрации *Chl-a*.

В наших следующих работах планируется исследовать особенности вертикального распределения концентрации *Chl-a* на основе нового доступного массива измерений буев Био-Арго и ее межгодовой изменчивости под влиянием различных физических факторов (выхолаживания, ледового покрова, режима течений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Banse K. Low seasonality of low concentrations of surface chlorophyll in the Subantarctic water ring: underwater irradiance, iron, or grazing? // Progress in Oceanography. 1996. Vol. 37, iss. 3–4. P. 241–291. doi:10.1016/S0079-6611(96)00006-7
2. Iron budgets for three distinct biogeochemical sites around the Kerguelen Archipelago (Southern Ocean) during the natural fertilisation study, KEOPS-2 / A. R. Bowie [et al.] // Biogeosciences. 2015. Vol. 12, iss. 14. P. 4421–4445. doi:10.5194/bg-12-4421-2015
3. Iron and light limitation of phytoplankton growth off East Antarctica / C. R. Vives [et al.] // Journal of Marine Systems. 2022. Vol. 234. 103774. doi:10.1016/j.jmarsys.2022.103774
4. Regional scale characteristics of the seasonal cycle of chlorophyll in the Southern Ocean / S. J. Thomalla [et al.] // Biogeosciences. 2011. Vol. 8, iss. 10. P. 2849–2866. doi:10.5194/bg-8-2849-2011

5. *Deppeler S. L., Davidson A. T.* Southern Ocean phytoplankton in a changing climate // *Frontiers in Marine Science*. 2017. Vol. 4. 40. doi:10.3389/fmars.2017.00040
6. Phytoplankton standing crops within an Antarctic ice edge assessed by satellite remote sensing / C. W. Sullivan [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1988. Vol. 93, iss. C10. P. 12487–12498. doi:10.1029/JC093iC10p12487
7. *Moore J. K., Abbott M. R.* Surface chlorophyll concentrations in relation to the Antarctic Polar Front: seasonal and spatial patterns from satellite observations // *Journal of Marine Systems*. 2002. Vol. 37, iss. 1–3. P. 69–86. doi:10.1016/S0924-7963(02)00196-3
8. *Sokolov S., Rintoul S. R.* On the relationship between fronts of the Antarctic Circumpolar Current and surface chlorophyll concentrations in the Southern Ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2007. Vol. 112, iss. C7. C07030. doi:10.1029/2006JC004072
9. *Демидов А. Б., Ведерников В. И., Шеберстов С. В.* Пространственно-временная изменчивость хлорофилла “а” в Атлантическом и Индийском секторах Южного океана в феврале–апреле 2000 г. по спутниковым и экспедиционным данным // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 4. С. 546–558. EDN HFUGHE.
10. Characterization of distinct bloom phenology regimes in the Southern Ocean / J.-B. Sallée [et al.] // *ICES Journal of Marine Science*. 2015. Vol. 72, iss. 6. P. 1985–1998. doi:10.1093/icesjms/fsv069
11. *Демидов А. Б., Гагарин В. И., Григорьев А. В.* Сезонная изменчивость хлорофилла «а» на поверхности в проливе Дрейка // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 3. С. 355–370. EDN MSQKWV.
12. *Arrigo K. R., van Dijken G. L.* Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C8. 3271. doi:10.1029/2002JC001739
13. *Arrigo K. R., van Dijken G. L., Bushinsky S.* Primary production in the Southern Ocean, 1997–2006 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008. Vol. 113, iss. C8. C08004. doi:10.1029/2007JC004551
14. Physical drivers of phytoplankton bloom initiation in the Southern Ocean's Scotia Sea / C. J. Prend [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. Vol. 124, iss. 8. P. 5811–5826. doi:10.1029/2019JC015162
15. *Демидов А. Б., Мошаров С. А., Гагарин В. И.* Меридиональная асимметричность первичного продуцирования в атлантическом секторе Южного океана весной и летом // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 5. С. 675–687.
16. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А.* Океанографические исследования Морского гидрофизического института в Южном океане // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6 (192). С. 63–73. doi:10.22449/0233-7584-2016-6-63-73
17. Термохалинная структура вод у берегов Антарктиды в марте – апреле 2019 г. по данным измерений в 64-й Российской антарктической экспедиции / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 2. С. 53–64. EDN XSUYDZ.
18. Исследования экосистемы Атлантического сектора Антарктики (79-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») / Е. Г. Морозов [и др.] // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 5. С. 823–825. EDN PNJEZI. doi:10.31857/S0030157420050172
19. *Vereshchaka A. L., Lunina A. A., Mikaelyan A. S.* Surface chlorophyll concentration as a mesoplankton biomass assessment tool in the Southern Ocean region // *Global Ecology and Biogeography*. 2022. Vol. 31, iss. 3. P. 405–424. doi:10.1111/geb.13435
20. *O'Reilly J. E., Werdell P. J.* Chlorophyll algorithms for ocean color sensors – OC4, OC5 & OC6 // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 229. P. 32–47. doi:10.1016/j.rse.2019.04.021
21. *Garcia C. A. E., Tavano Garcia V. M., McClain C. R.* Evaluation of SeaWiFS chlorophyll algorithms in the Southwestern Atlantic and Southern Oceans // *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 95, iss. 1. P. 125–137. doi:10.1016/J.RSE.2004.12.006
22. Regional ocean-colour chlorophyll algorithms for the Red Sea / R. J. Brewin [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 165. P. 64–85. doi:10.1016/j.rse.2015.04.024

23. Topographic modulation of the wind stress impact on eddy activity in the Southern Ocean / Y. Cai [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2022. Vol. 49, iss. 13. e2022GL097859. doi:10.1029/2022GL097859

Об авторах:

Кубряков Арсений Александрович, ведущий научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3561-5913**, arskubr@mhi-ras.ru

Кубрякова Елена Адилловна, старший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, лаборатория численного моделирования динамики физических и биогеохимических процессов в морских средах, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6071-1881**, elena.kubryakova@mhi-ras.ru

Бакуева Яна Игоревна, младший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследований, лаборатория морских полярных исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), ybakueva@mhi-ras.ru