https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-328-347 УДК 551.464(99)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АТЛАНТИЧЕСКОГО И ИНДООКЕАНСКОГО СЕКТОРОВ ЮЖНОГО ОКЕАНА

K.B. $APTAMOHOBA^{1*}$, U.A. $\Gamma AH\Gamma HYC^2$, J.A. $J\!UXOBA^1$, B.B. $MACJEHHUKOB^1$, H.A. $J\!ABUHEH^3$

- 1 Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия
- ² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
- ³ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*ksusha.vniro@gmail.com

Резюме

Многие гидрохимические характеристики и в первую очередь основные биогенные элементы (фосфор, азот, кремний) могут служить хорошими индикаторами для выделения различных типов водных масс и положения основных фронтов Южного океана. Сезонная и межгодовая изменчивость этих характеристик отражает также и характер протекания биологических процессов в поверхностном слое океана, что важно для оценки биологической продуктивности. Целью данного исследования было провести анализ основных особенностей пространственного распределения гидрохимических характеристик в поверхностном слое атлантического и индоокеанского секторов Южного океана между Субантарктическим фронтом и берегами Антарктиды, а также оценить их сезонную (весна-осень) и межгодовую изменчивость за период наблюдений с 2008 по 2020 г. Установлено, что межгодовая изменчивость биогенных элементов определялась пространственным смещением основных фронтов Антарктического циркумполярного течения, а также интенсивностью крупномасштабного круговорота Уэдделла. Сезонная динамика биогенных элементов на большей части исследуемой акватории была выражена достаточно слабо. Исключение составляют районы высокоширотных «оазисов» (шельфовые воды морей Содружества и Дейвиса), где наблюдалась максимальная сезонная изменчивость гидрохимических характеристик. Результаты многолетнего мониторинга гидрохимических условий в море Содружества позволили выделить условно «теплые» годы с ранней вегетацией (в конце декабря) и интенсивным потреблением фитопланктоном биогенных элементов и «холодные» годы, когда формирование летних «оазисов» в декабре-январе не наблюдалось.

Ключевые слова: атлантический сектор, биогенные элементы, гидрохимическая структура, индоокеанский сектор, поверхностные воды, растворенный кислород, сезонная и межгодовая изменчивость, температура воды, Южный океан.

Для цитированя: *Артамонова К.В., Гангнус И.А., Духова Л.А., Масленников В.В., Лавинен Н.А.* Пространственная гидрохимическая структура поверхностного слоя атлантического и индоокеанского секторов Южного океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 328–347. https://doi. org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-328-347.

Поступила 11.09.2021

После переработки 26.11.2021

Принята 29.11.2021

SPATIAL HYDROCHEMICAL STRUCTURE IN SURFACE WATERS OF THE SOUTHERN OCEAN BETWEEN AFRICA AND ANTARCTICA

KSENIYA V. ARTAMONOVA*¹, IVAN A. GANGNUS², LIUDMILA A. DUKHOVA¹, VYACHESLAV V. MASLENNIKOV¹, NATALIYA A. LAVINEN³

- Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russia
- ²—Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
- 3 State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*ksusha.vniro@gmail.com

Summary

Some hydrochemical characteristics and, first of all, the main nutrients (phosphorus, nitrogen, silicon) can be used as markers for distinguishing different types of water masses and positions of the main fronts of the Southern Ocean. The seasonal and interannual variability of these characteristics also reflects the character of biological processes in the surface layer of the ocean, which is important for assessing biological productivity. The aim of this study was to analyze the main features of the spatial distribution of hydrochemical characteristics in the surface layer in the Atlantic and Indian Ocean sectors of the Southern Ocean between the Subantarctic Front and the shores of Antarctica and assess their seasonal (spring-autumn) and interannual variability for the observation period from 2008 to 2020. We describe the surface nutrient concentrations between Africa and Antarctica along the transects that cross the Subantarctic Front (SAF) in the north, the Polar Frontal Zone (PFS), Polar Front (PF) and Antarctic Zone water in the south. The findings revealed an increase in dissolved oxygen and nutrients towards the south. Nitrates changed values within the SAF from 15 µM to 24 µM, whereas values from 1.2 µM to 1.7 μM were observed for phosphates. Silicate increased considerably within the Polar Front, from 6.6 μM to 20.8 µM. An analysis was carried out of the seasonal and interannual variability of the hydrochemical conditions in the surface layer of the Southern Ocean. The interannual variability of the nutrients was determined by the spatial variability of the main fronts of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) and the intensity of the largescale Weddell Gyre (WG). Since 2017, there has been an increase in the meridional transfer of waters: in the Antarctic Summer 2017-2018, there was a spreading of high-nutrient WG waters toward the north, and in the Summer 2019–2020, the low-nutrient waters anomaly was transferred far to the south (up to 60°S).

According to the data obtained, the seasonal dynamics of the nutrients in the surface layer of the Southern Ocean was rather weakly expressed. An exception is the high-latitude waters of the Cooperation and Davis Seas, where maximum seasonal variability of the hydrochemical characteristics was observed. The highest rate of nutrient consumption was observed in the coastal area of the Cooperation Sea near the fast ice edge from mid–December to early January and reached 3.2 μM per day for silicate, 1.8 μM per day for nitrates, and 0.12 μM per day for mineral phosphorus. The results of the long-term monitoring of the hydrochemical conditions in the Cooperation Sea made it possible to distinguish conditionally "warm" years with early vegetation (at the end of December) and intensive consumption of nutrients by phytoplankton, and "cold" years, when the formation of high-latitude "oases" in December–January was not observed.

Keywords: Antarctic fronts, Atlantic sector, dissolved oxygen, Indian sector, nitrate, nutrients, phosphate, seasonal and interannual variability, silicate, surface waters, temperature, the Southern Ocean.

For Citation: Artamonova K.V., Gangnus I.A., Dukhova L.A., Maslennikov V.V., Lavinen N.A. Spatial hydrochemical structure in surface waters of the Southern ocean between Africa and Antarctica. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (4): 328–347. [In Russian]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-328-347.

Received 11.09.2021 Revised 26.11.2021 Accepted 29.11.2021

ВВЕДЕНИЕ

Гидрохимические условия поверхностных вод Южного океана формируются под влиянием сложной динамики вод этого региона: положения фронтов основных струй Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), подъема глубинных вод, богатых биогенными веществами, в циклонических круговоротах и выноса их на север в районе круговорота Уэдделла. Существенное влияние на распределение гидрохимических характеристик оказывают биохимические процессы синтеза и разложения органического вещества [1–3]. В сумме физические и биохимические факторы формируют уникальные особенности гидрохимических условий Южного океана, заключающиеся в том, что верхний поверхностный слой антарктических вод является богатейшим по запасу биогенных элементов по сравнению с другими районами Мирового океана [3–6].

В Южном океане на севере выделяют теплые, соленые с минимальными концентрациями биогенных элементов субтропические воды, южной границей которых служит Субтропический фронт, характеризующийся резким градиентом температуры и солености [7]. Южнее расположены две основные климатические зоны Южного океана: более бедная по содержанию растворенного кислорода и биогенных элементов Субантарктическая и Антарктическая с высокими концентрациями растворенного кислорода и биогенных веществ, разделенные четко выраженным гидрохимическим фронтом [5-6, 8]. Взаимодействие субантарктических и антарктических вод происходит в Южной полярной фронтальной зоне (ЮПФЗ), границами которой являются Субантарктический фронт (САФ) и Южный полярный фронт (ЮПФ). Внутри Антарктической зоны выделяется менее контрастный Южный фронт Антарктического циркумполярного течения (ЮФАЦТ) [9], или Вторичная фронтальная зона Антарктики [6, 10–12]. Этот фронт формируется между двумя структурными модификациями антарктического типа вод и разделяет воды южной периферии АЦТ и воды высокоширотной модификации (ВВ), приуроченные к приматериковым циклоническим круговоротам [6]. В районе ЮФАЦТ наблюдается резкий градиент в концентрации растворенного кремния, который является поверхностным критерием для выделения этого фронта [4–5, 13]. Широтное положение ЮФАЦТ в водах Антарктики сильно варьирует, что приводит к резким различиям в поверхностном распределении биогенных элементов в разных секторах Южного океана. При этом характер распределения кремния определяется главным образом крупномасштабными циркуляционными особенностями, в то время как для распределения минерального фосфора и нитратного азота свойственна некоторая мозаичность, связанная с интенсивностью фотосинтеза [5].

На большей части акватории Мирового океана при протекании продукционно-деструкционных процессов биогенные элементы извлекаются из морской воды и возвращаются обратно в соответствии со стехиометрическими соотношениями [14]. По мнению многих исследователей [7, 15–16 и др.], содержание биогенных элементов в Антарктике не лимитирует первичную продукцию, их концентрации в поверхностном слое антарктических вод постоянно недорасходуются фитопланктоном. При этом реальная первичная продукция в большинстве случаев оказывается меньше, чем потенциально возможная при полном использовании фитопланктоном запаса биогенных элементов. В связи с этим некоторые ученые высказывают мнение о лимитирующей роли микроэлементов [7, 16–23], например железа. Проведенные в Южном океане эксперименты не подтвердили эту гипотезу [14, 24–27]. Однако в некоторых высокоширотных районах Антарктики наблюдается практически полное потребление биогенных элементов до нулевых значений. Такие ситуации достаточно редки для вод Южного океана, локальны и кратковременны. Они связаны с сильными вспышками цветения фитопланктона в так называемых «оазисах», высокоширотных участках вблизи отступающей кромки льда, где при формирования тонкого поверхностного слоя распресненной воды в сочетании с большим количеством солнечной радиации и маловетреной погоды могут создаваться благоприятные условия для такого явления [5–6, 28].

Целью данного исследования было провести анализ основных особенностей пространственного распределения гидрохимических характеристик в поверхностном слое Южного океана (в районе между Африкой и Антарктидой) и оценить их сезонную (весна–осень) и межгодовую изменчивость за период наблюдений с 2008 по 2020 г.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В работе использовались данные, полученные коллективом ФГБНУ «ВНИРО» в период с 2008 по 2020 г. в составе Российской антарктической экспедиции (РАЭ) на научно-экспедиционных судах (НЭС) «Академик Федоров» и «Академик Трёшников» (табл. 1). Гидрохимические исследования проводились по ходу движения судна при пересечении всего пояса антарктических вод от Субантарктического фронта (САФ) на севере до берегов Антарктиды на юге (рис. 1). Отбор проб воды проводился с поверхностного горизонта (0–1 м) через каждые 20–35 миль. В период работ 53, 57, 59 и 64–65-й РАЭ гидрохимические данные были получены в течение весенне-летнего (декабрь—февраль) и раннеосеннего (март—апрель) антарктического периода, что позволило выявить сезонную изменчивость гидрохимических условий в антарктических водах (см. табл. 1). Массив данных содержал значения температуры воды, концентрации растворенного кислорода, растворенного кремния, минерального фосфора, аммонийного и нитратного азота, а также органических форм азота и фосфора в поверхностном слое Южного океана.

Таблица 1

Информация о гидрохимических данных, полученных с 2008 по 2020 г.

Table 1

Hydrochemical data obtained from 2008 to 2020

Экспедиция	Судно	Период выполнения работ		
53-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	18.01.2008–25.01.2008		
		28.02.2008-02.03.2008		
54-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	21.12.2008-05.02.2009		
55-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	07.12.2009–16.02.2010		
57-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	13.12.2011–13.02.2012		
	_	03.03.2012-07.04.2012		
58-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	07.12.2012–22.01.2013		
59-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	07.12.2013–17.03.2014		
	НЭС «Академик Трёшников»	09.03.2014–30.04.2014		
60-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	14.12.2014–14.01.2015		
61-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	20.12.2015–11.01.2016		
62-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	22.12.2016–14.01.2017		
63-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	02.12.2017–09.01.2018		
64-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	16.12.2018–20.02.2019		
		23.03.2019–24.04.2019		
65-я РАЭ	НЭС «Академик Федоров»	19.02.2020–26.02.2020		
		25.04.2020–30.04.2020		

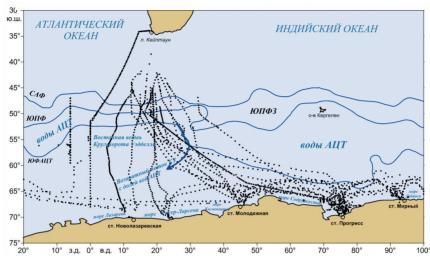


Рис. 1. Схема станций, выполненных в период с 2008 по 2020 г. в составе Российской антарктической экспедиции (РАЭ). Структура вод приводится по [9]

Fig. 1. Locations of stations established from 2008 to 2020 within the Russian Antarctic Expedition (RAE). The water structure is indicated according to [9]

Для анализа полученного массива гидрохимических данных были построены карты пространственного распределения исследуемых характеристик, осредненные за весь период наблюдения (декабрь–апрель) с использованием программы Ocean Data View методом Weight-average gridding.

Гидрохимический анализ проводился в судовой лаборатории непосредственно после отбора по стандартным методикам [29]. Пробы воды предварительно не фильтровались, определялось все доступное для фитопланктона содержание биогенных элементов [30–31]. В районах с более высокой потенциальной продуктивностью вводилась поправка на мутность в соответствии с методическими рекомендациями [29].

Растворенный в морской воде кислород определялся по методу Винклера в модификации А.М. Черняковой титрованием пробы 0,02 н раствором тиосульфата натрия. Содержание растворенной кремнекислоты при концентрациях более 50 µМ определялось по желтому, при концентрациях менее 50 µМ — по голубому кремнемолибденовому комплексу. Минеральный фосфор, растворенный в морской воде, определялся методом Морфи-Райли. Определение аммонийного азота проводили по методу Сэйджи-Солорзано с гипохлоритом натрия и фенолом с образованием интенсивно окрашенного голубого комплекса. Нитратный азот определялся методом, основанным на восстановлении нитратов до нитритов. В качестве восстановителя применялся омедненный кадмий. Дальнейшее определение проводилось по методике Бендшнайдера и Робинсона для нитритного азота. В основе этого метода лежит его реакция с сульфаниламидом и N-1-нафтилэтилендиамином, с последующим образованием окрашенных диазосоединений.

Кроме непосредственно измеряемых характеристик для анализа вод использовалось соотношение Si/P, предложенное H.B. Аржановой в качестве критерия выделения вод разной модификации [1, 6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственная гидрохимическая структура поверхностного слоя и фронты Южного океана

Результаты исследований, выполненных с 2008 по 2020 г. на меридиональных разрезах от САФ на севере до берегов Антарктиды на юге, отражали сложную пространственную структуру вод этого региона (см. рис. 1). По поверхностному распределению гидрохимических показателей выделялись относительно однородные участки и более резкие градиенты концентраций биогенных элементов, указывающие на присутствие фронтальных разделов. В районе ЮПФЗ происходило резкое увеличение всех гидрохимических показателей в южном направлении, при этом на северной ее границе, в районе САФ, наряду с резким падением температуры воды поверхностного слоя в среднем более чем на 2 °С, возрастали концентрации растворенного кислорода до 7,1 мл/л, минерального фосфора до 1,6 μ M (рис. 2a, рис. 3a) и нитратного азота до 22 μ M (табл. 2) (рис. 26, см. рис. 3a).

Содержание растворенного кремния в САФ менялось от 0,4 до 4,3 μ M (см. рис. 3a), при этом в некоторые годы концентрация кремния оставалась постоянной или незначительно уменьшалась. В то же время в районе ЮПФ (южная граница ЮПФ3) наблюдался поверхностный градиент растворенного кремния, концентрация которого в районе ЮПФ резко возрастала с 6,6 до 20,8 μ M (см. табл. 2) (рис. 2a, см. рис. 3a).

Известно, что если Южный океан в целом можно отнести к малопродуктивным районам Мирового океана с высокими концентрациями биогенных элементов и низким содержанием хлорофилла, то ЮПФЗ считается одним из уникальных районов Южного океана с высокими величинами первичной продукции и биомассы фитопланктона [7, 32]. По полученным данным внутри ЮПФЗ непосредственно перед ЮПФ отмечался локальный максимум аммонийного азота (от 1,0 до 2,7 µМ), при этом на большей части исследуемой акватории его содержание, как правило, не

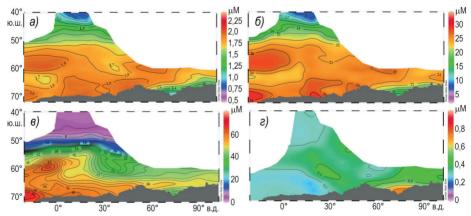


Рис. 2. Пространственное распределение фосфатов, μ М (a), нитратов, μ М (δ), растворенного кремния, μ М (ϵ) и органического фосфора, μ М (ϵ) в поверхностных водах Южного океана между Африкой и Антарктидой (осредненные данные с 2008 по 2020 г.)

Fig. 2. Spatial distribution of phosphates, μ M (a), nitrates, μ M (δ), dissolved silicon, μ M (a), organic forms of phosphorus, μ M (a) in the surface waters of the Southern Ocean between Africa and Antarctica (averaged data from 2008 to 2020)

Таблица 2

Table 2

Диапазоны изменчивости температуры воды и гидрохимических показателей в поверхностном слое Южного океана за период с 2008 по 2020 г.

Ranges of variability of water temperature and hydrochemical parameters in the surface layer of the Southern Ocean for the period from 2008 to 2020

	Воды ЮПФЗ				Высоко-	TB	BB
Параметр	САФ	ЮПФ	Воды АЦТ	ЮФАЦТ	широтные воды КУ	возвратного потока КУ	приматери- ковых морей
T, °C	8,5-5,0	4,5–2,5	3,2-1,7	2,5-0,73	-0,6-1,9	0,8-2,2	-1,9-3,2
О, мл/л	6,5–7,1	7,0–7,5	7,0-7,8	7,0–8,1			7,2–9,4
Si, μM	0,4-4,3	6,6–20,8	20,4–30,6	30,0-50,0	45,7-80,0	35–55	5,0-81,0
PO ₄ , μM	1,2-1,6	1,6–1,73	1,5–1,8	1,7–1,9	1,70-2,1	1,5–1,7	0,2-2,1
NO ₃ , μM	15,0-22,0	21,9–23,5	21,7–26,2	24,2–27,0	23,6-30,5	20,0-24,0	0,4-31,4
Si/P	2,0-3,1	4,1-11,8	11,5–15,0	15–25	25–35	15,9–25,4	20–46
N/P	13,4–13,6	13,7–14,6	14,6–15,3	13,7–14,6	14,0-16,0	14,0–16,0	6–20

превышало 0,5 μ М. Концентрации органических форм азота и фосфора в ЮПФЗ менялись не столь значительно, в некоторые годы отмечалось их увеличение во фронтальной зоне до 25–30 μ М и до 0,4–0,5 μ М соответственно.

Южнее ЮПФ простирался пояс вод АЦТ, характеризующийся более высокими концентрациями растворенного кислорода (до 7,8 мл/л), фосфатов (до 1,8 μ M) и нитратов (до 26,2 μ M) (см. табл. 2). Содержание кремния в водах АЦТ изменялось от 20,4 до 30,6 μ M. В районе Южного фронта АЦТ (ЮФАЦТ) наблюдался резкий градиент растворенного кремния в поверхностных водах, где его концентрации возрастали от 30 до 50 μ M (см. табл. 2) (см. рис. 3*a*). Градиент концентрации кремния служит надежным индикатором поверхностного положения фронта ЮФАЦТ.

Воды высокоширотной модификации, представленные массивом вод восточной периферии круговорота Уэдделла (КУ), характеризовались высокими концентрациями растворенного кремния (45,7–80 μ M), фосфатов (1,7–2,1 μ M) и нитратов (23,6–30,5 μ M) в поверхностном слое воды (см. табл. 2) (см. рис. 2). Южнее простирался пояс трансформированных вод (ТВ), сформированных возвратным потоком КУ с долей вод АЦТ, который выделялся по более низкому содержанию биогенных элементов, главным образом кремния (менее 55 μ M) (см. табл. 2) и повышенными концентрациями аммонийного азота (более 0,5 μ M). Поверхностные воды высокоширотной модификации, приуроченные к морям Рисер-Ларсена, Космонавтов, Содружества и Дейвиса, характеризовались высокими концентрациями биогенных элементов.

Восточнее круговорота Уэдделла (в районе 30° в. д.) поток вод АЦТ расширялся, растекаясь веером на восток, юго-восток и юго-запад с замыкающей восточной ветвью КУ, приближаясь относительно близко к материковому склону морей Космонавтов, Содружества и Дейвиса. В результате западнее 30° в. д. антарктические воды характеризовались более высоким содержанием силикатов (50–80 μ M), в то время как восточнее 30° в. д. они были значительно ниже и на больше части исследуемой акватории не превышали 50 μ M (см. рис. 26). Пространственное распределение фосфатов и нитратов в поверхностном слое антарктических вод (южнее ЮПФ) имело схожий характер, в их распределении наблюдалась небольшая мозаичность, которая определялась главным образом продукционно-деструкционными процессами, а не циркуляционными (см. рис. 2a, δ).

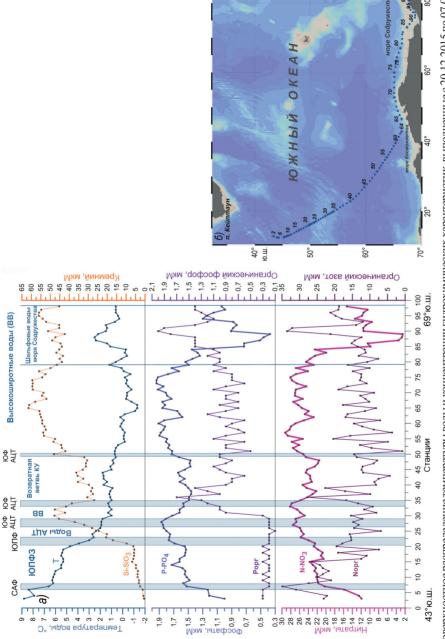


Fig. 3. Surface distribution of water temperature and concentration of hydrochemical characteristics, carried out from 20.12.2015 to 07.01.2016 (a). Positions of stations established in the 61st RAE: waterfront of Cape Town — Sea of Cooperation (6). The structure of the waters is indicated in accordance with Fig. 1 Рис. З. Поверхностное распределение температуры воды и концентрации гидрохимических характеристик, выполненные с 20.12.2015 по 07.01.2016 г. (а) Положение станций, выполненных в 61-й РАЭ на переходе п. Кейптаун — море Содружества (б). Структура вод указана в соответствии с рис.

Антарктические воды на большей части исследуемой акватории характеризовались низкими концентрациями органических форм азота и фосфора с тремя основными максимумами — в районе ЮПФЗ, в трансформированных водах возвратного потока КУ и на шельфе приматериковых морей Антарктиды. По осредненным данным за весенне-летне-осенний антарктический период содержание органического азота в поверхностном слое изменялось в пределах от 10 до 25 μ M, а органического фосфора — от аналитического нуля до 0,45 μ M (см. рис. 2 ϵ), при этом максимальные концентрации органических форм азота и фосфора были зафиксированы на шельфе морей Содружества и Дейвиса (до 60 μ M и до 2,0 μ M соответственно).

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Поверхностные распределения температуры воды и гидрохимических характеристик, выполненные в декабре 2011 и марте 2012 гг. (57-я РАЭ), когда маршруты следования судна практически совпадали, представлены на рис. 4.

В декабре на севере исследуемой акватории (в водах ЮПФЗ) процесс вегетации уже начался и сопровождался увеличением температуры воды и уменьшением концентраций биогенных элементов. Содержание растворенного кремния в поверхностном слое ЮПФЗ в декабре варьировало в интервале от 0,4 до 2,0 μ M. В районе ЮПФ (48,5–49,5° ю. ш.) наблюдалось резкое увеличение концентрации растворенного кремния от 2–6 μ M до 16–20 μ M. В марте содержание кремния в поверхностных водах ЮПФЗ было в два раза выше декабрьских величин, а сам градиент в районе ЮПФ более сглажен (рис. 4a).

Для сезонной динамики фосфатов и нитратов в поверхностных водах ЮПФЗ были характерны те же закономерности. В декабре на севере исследуемой акватории наблюдались минимальные концентрации фосфатов и нитратов, которые резко увеличивались внутри ЮП Φ 3 от 1,2 μ M и 15 μ M на северной ее границе до 1,7 μ M и 24 μ M — на южной границе ЮПФЗ соответственно (рис. 4б). В марте содержание фосфатов и нитратов в целом было выше, при этом возрастание их концентраций с севера на юг также носило более плавный характер и изменялось от 1,35 µМ и 19 µМ до 1,55 µМ и 22 µМ соответственно (см. рис. 46). Рассчитанное стехиометрическое соотношение Si/P для поверхностного слоя ЮПФЗ в декабре в среднем составляло 1,1, а в марте возросло в 3 раза по сравнению с весенними величинами. Такие низкие значения Si/P могут быть связаны с лимитирующей ролью кремния для первичного продуцирования в поверхностном слое вод внутри ЮПФЗ (не включая воды ЮПФ). Соотношение N/P здесь было близко к стехиометрическому и составляло в декабре в среднем 13,6, а в марте величина N/P увеличилась до 14,4. Полученные результаты указывают на то, что в поверхностном слое ЮПФЗ в декабре весенне-летнее потребление биогенных элементов уже началось, при этом сезонная изменчивость их концентраций в целом невелика.

Южнее, в поверхностных водах АЦТ и высокоширотной модификации, наоборот, в декабре наблюдались высокие (почти зимние) концентрации силикатов, фосфатов и нитратов (см. рис. 4a, δ), температура воды в декабре здесь также была минимальной. Полученные данные указывают на то, что «фенологическая волна» в водах АЦТ и высокоширотной модификации в декабре еще не наступила, ее пик сместился на февраль—март. При этом для содержания растворенного кремния сезонная динамика в поверхностном слое антарктических вод была выражена более слабо (см. рис. 4a), в то время как концентрации фосфатов и нитратов в марте в среднем в 1,2-1,3 раза снизились по сравнению с величинами, наблюдаемыми в предвегетационный период (см. рис. 4δ). Соотношение Si/P южнее ЮПФ резко увеличилось и достигало максимальных величин — 25-35 в вы-

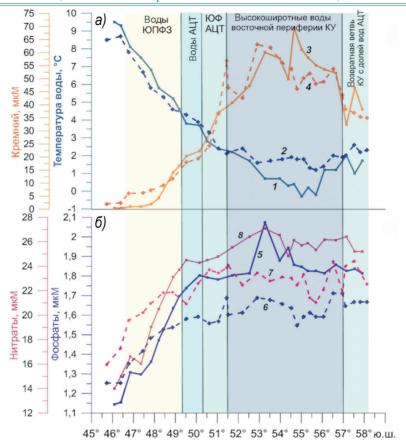


Рис. 4. Поверхностное распределение температуры воды и концентрации растворенного кремния (a), а также концентраций фосфатов и нитратов (δ), выполненные на квазимеридиональном разрезе по 30° в. д. в 57-й РАЭ в течение двух сезонов: с 13.12 по 15.12.2011 г. и с 05.03 по 08.03.2012 г. Структура вод указана в соответствии с рис. 1.

I — температура воды в декабре 2011 г.; 2 — температура воды в марте 2012 г.; 3 — содержание кремния в декабре 2011 г.; 4 — содержание кремния в марте 2012 г.; 5 — содержание фосфатов в декабре 2011 г.; 6 — содержание фосфатов в марте 2012 г.; 7 — содержание нитратов в декабре 2011 г.; 8 — содержание нитратов в марте 2012 г.

Fig. 4. Surface distribution of water temperature and concentration of dissolved silicon (a), as well as concentrations of phosphates and nitrates (δ) , carried out on a quasi–meridional section along 30° E in the 57th RAE during two seasons: from 13.12 to 15.12.2011 and from 05.03 to 08.03.2012. The structure of the waters is indicated in accordance with Fig. 1.

1— water temperature in December 2011; 2— water temperature in March 2012; 3— silicon content in December 2011; 4— silicon content in March 2012; 5— phosphate content in December 2011; 6— phosphate content in March 2012; 7— nitrate content in December 2011; 8— nitrate content in March 2012

Для органических форм азота и фосфора сезонная изменчивость проявлялась в увеличении их концентраций в поверхностном слое исследуемой акватории в результате поступления органического вещества в процессе развития и отмирания фитопланктона. Так, в декабре—январе в поверхностных водах в районе ЮПФЗ и ЮФАЦТ наблюдалось повышенное содержание органического азота (до 35 µМ) и фосфора (до 0,58 µМ). Более высокие величины органических форм биогенных элементов также отмечались в трансформированных водах возвратного потока КУ и на шельфе приматериковых морей. К марту концентрации органических форм азота и фосфора на большей части исследуемой акватории (за исключением вод приматериковых морей) уменьшились до 20 µМ и 0,4 µМ соответственно, а в апреле их содержание в поверхностном слое не превышало 10–15 µМ и 0,2–0,3 µМ соответственно.

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

В исследуемый период межгодовая изменчивость гидрохимических характеристик определялась, с одной стороны, пространственным смещением САФ, ЮПФ и ЮФАЦТ, вместе с которыми смещался и гидрохимический фронт, а с другой — интенсивностью крупномасштабного круговорота Уэдделла, сопровождаемого расширением или сужением акватории распространения более холодных высокоширотных вод с высокими концентрациями биогенных элементов.

По полученным данным среднее положение оси ЮПФ — южной границы ЮПФЗ (поверхностный градиент температуры воды и растворенного кремния) за 2007, 2009, 2011–2016 гг. составило 50°16' ю. ш. По литературным источникам за 2004, 2007-2010 гг. положение ЮПФ находилось на широте 50°03′ [33] и на протяжении 2009-2015 гг. выраженной тенденции к смещению на север или юг выявлено не было [34]. Такое достаточно устойчивое положение ЮПФЗ претерпело в сезоне 2017/18 г. сильное смещение в северном направлении впервые за исследуемый период. Так, если в 2007–2016 гг. положение ЮПФ колебалось в пределах $49^{\circ}50' - 50^{\circ}33'$ ю. ш., то в декабре 2017 г. оно оказалось на $48^{\circ}52'$ ю. ш., т. е. сместилось более чем на 60 миль к северу. В этот же сезон отмечалось и максимальное распространение КУ на северовосток. Ширина пересекаемых судном участков КУ менялась от 104 миль в 61-й РАЭ (2015–2016 гг.) до максимальной 472 миль в 63-й РАЭ (2017–2018 гг.), демонстрируя усиление крупномасштабного круговорота Уэдделла, сопровождаемое расширением зоны распространения вод высокоширотной модификации и увеличением содержания биогенных элементов, главным образом кремния до 62-70 µМ (в среднем за исследуемый период $48-60 \mu M$) в поверхностном слое антарктических вод (рис. 5δ).

В летний период 2019—2020 гг. наблюдалась обратная ситуация — резкое смещение фронтов АЦТ на юг. В результате низкие концентрации биогенных элементов и высокие значения температуры воды отмечались во всем поверхностном слое антарктических вод (см. рис. 5). Так, в феврале 2020 г. концентрации силикатов и фосфатов в поверхностном слое антарктических вод впервые за весь период наблюдения достигли аномально низких величин (менее 10 μ M и менее 1,3 μ M) в районе 55—61° ю. ш. (см. рис. 5 σ , σ), температура воды здесь также была максимальной за весь период наблюдений (более 3 °С) (см. рис. 5 σ). Рассчитанные величины Si/P резко снизились до 5—15 μ M, что характерно для вод ЮПФЗ с долей вод АЦТ (см. рис. 5 σ). Высокоширотные воды КУ в летний сезон 2019/20 на разрезе не выделялись.

Кроме того, существенная межгодовая изменчивость также отмечалась в высокоширотных водах приматериковых морей Антарктиды.

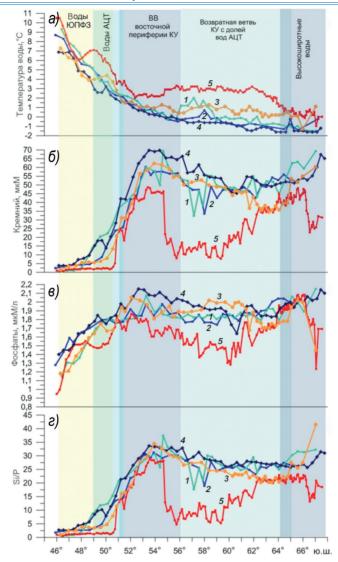


Рис. 5. Поверхностное распределение температуры воды, °С (a), концентрации растворенного кремния, μ M (δ), минерального фосфора, μ M (ϵ) и величины Si/P (ϵ) на квазимеридиональном разрезе по 30° в. д. в летний антарктический период с 2011 по 2020 г. Структура вод указана в соответствии с рис. 1.

I — 12.2011 (57-я РАЭ); 2 — 12.2014 (60-я РАЭ); 3 — 12.2016—01.2017 (62-я РАЭ); 4 — 12.2017—01.2018 (63-я РАЭ); 5 — 02.2020 (65-я РАЭ)

Fig. 5. Surface distribution of water temperature, °C (a), concentration of dissolved silicon, μ M (δ), mineral phosphorus, μ M (ϵ), and Si/P values (ϵ), carried out on a quasi-meridional section along 30°E in the summer Antarctic period from 2011 to 2020. The structure of the waters is indicated in accordance with Fig. 1.

I — 12.2011 (57th RAE); *2* — 12.2014 (60th RAE); *3* — 12.2016–01.2017 (62nd RAE); *4* — 12.2017–01.2018 (63rd RAE); *5* — 02.2020 (65th RAE)

ВЫСОКОШИРОТНЫЕ «ОАЗИСЫ»

На шельфе морей Содружества и Дейвиса создавались уникальные для Южного океана условия, когда в декабре-январе, опережая приход естественной «фенологической волны», в поверхностном слое наблюдалось практически полное потребление биогенных элементов. Так, в декабре-январе в прибрежной акватории моря Содружества (в заливе Прюдс) отмечалось резкое увеличение содержания растворенного кислорода (до 10 мл/л) и перенасыщение вод (до 120-140 %), резкое снижение концентраций биогенных элементов (вплоть до нулевых значений), увеличение содержания органических форм азота (до 45-60 µМ) и фосфора (до 1,2-2,0 µМ), что связано с наиболее активным периодом развития фитопланктона. Его начало приходилось на середину декабря и продолжалось до начала января. Наибольшая скорость убыли биогенных элементов отмечалась с середины до конца декабря и достигала значений: для кремния — 3,2 µМ в сут, для нитратного азота — 1,8 µМ в сут, а для минерального фосфора — 0,12 µМ в сут. Максимальное потребление биогенных элементов происходило в прибрежных акваториях, вблизи кромки припая. При наличии устойчивого пикноклина вспышка цветения фитопланктона наблюдалась визуально — вода становится зеленого цвета с пониженной прозрачностью.

В январе—феврале отмечался рост содержания биогенных элементов, связанный с затуханием процесса фотосинтеза, и к апрелю содержание их в поверхностном слое в целом уже соответствовало значениям, наблюдаемым в середине декабря. При этом наиболее быстро восстанавливались концентрации фосфатов, а содержание нитратов в апреле лишь на 70 % достигло декабрьских величин. Важно отметить, что стехиометрические соотношения Рэдфилда между отдельными элементами в целом соблюдались и составляли в среднем для Si/P — 22,1, а для N/P — 14,5. Это свидетельствует о том, что поступление биогенных элементов в поверхностные воды в этот период происходит частично за счет деструкции и минерализации органического вещества, т. к. регенерация фосфатов происходит быстрее, чем нитратов, а часть минерального азота находится в аммонийной и нитритной формах.

Однако в высокоширотных водах приматериковых морей Антарктиды летние «оазисы» наблюдались с разной степенью выраженности и зависели от гидрометеорологических условий (продолжительности безветренных дней и наличия разрушенного припая) в каждый конкретный год. Многолетний мониторинг гидрохимических условий в прибрежной акватории залива Прюдс (море Содружества) позволил выделить условно «теплые» годы, когда отмечались ранняя вегетация (в конце декабря) и интенсивное потребление фитопланктоном биогенных элементов в поверхностных водах, а также «холодные» годы, когда формирование летних «оазисов» в декабреянваре не наблюдалось.

К наиболее «теплым» за исследуемый период можно отнести 2009 и 2014 гг., когда в конце декабря в поверхностном слое было зафиксировано активное потребление биогенных элементов, особенно ярко это наблюдалось в декабре 2009 г.: концентрация фосфатов уменьшилась с 2,1 до 0,3 μ M, нитратов — с 27 до 0,8 μ M, растворенного кремния — с 60 до 6,0 μ M (рис. 6a, δ). В то же время наблюдалось резкое увеличение органических форм азота и фосфора до 40–50 μ M и до 0,8–0,9 μ M соответственно. При этом температура воды была максимальной за весь период исследования и составляла 3,2 °C (см. рис. 6a).

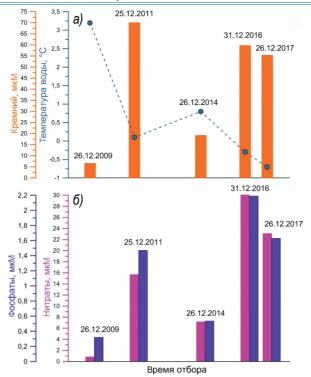


Рис. 6. Межгодовая динамика температуры воды и растворенного кремния (a), фосфатов и нитратов (δ) в поверхностных водах на шельфе залива Прюдс

Fig. 6. Interannual variability of the surface temperature and silicate concentration (a), phosphate and nitrate concentrations (δ) of Prydz Bay shelf waters

К условно «холодным» периодам можно отнести сезоны 2011/12, 2016/17 и 2017/18 гг., когда в поверхностных водах прибрежной акватории залива Прюдс в декабре—январе было отмечено отсутствие признаков активного потребления биогенных элементов, наличие большого массива ледяного припая и достаточно низкая температура воды — от 0° до -0.8 °C (рис. 6a, δ). В данном случае «фенологическая волна» еще не пришла, а формирование опережающих ее летних «оазисов» в таких условиях представляется маловероятным. При этом концентрации биогенных элементов в «холодные» периоды соответствовали высоким значениям высокоширотного типа вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были выявлены основные особенности пространственной гидрохимической структуры и характеристики вод в поверхностном слое Южного океана от Субантарктического фронта до шельфовых районов морей Рисер-Ларсена, Космонавтов, Содружества и Дейвиса.

По полученным данным в поверхностном распределении гидрохимических характеристик наблюдался резкий гидрохимический фронт в районе ЮПФЗ. В районе САФ резко возрастали концентрации растворенного кислорода, фосфатов и нитратов в южном направлении, а в районе ЮПФ резко увеличивались концентрации раство-

ренного кремния с 6–7 до 19–21 μ М. Внутри ЮПФЗ отмечался локальный максимум аммонийного азота, а также — увеличение концентраций органических форм азота и фосфора до 25–30 μ М и до 0,4–0,5 μ М соответственно.

Антарктические воды южнее ЮПФ характеризовались высокими концентрациями биогенных элементов в поверхностном слое и низким содержанием органических форм азота и фосфора. При этом в распределении силикатов отмечался второй поверхностный градиент, приуроченный к ЮФАЦТ, в районе которого содержание растворенного кремния резко возрастало в южном направлении от 30 до 50 µМ. Поверхностный градиент растворенного кремния может использоваться как надежный поверхностный показатель положения ЮФАЦТ, что уже отмечалось в предшествующих работах [1, 3–6]. В районе 55–62° ю. ш. в поверхностном распределении биогенных элементов отмечалось выраженное понижение их концентраций, что, вероятно, связано с трансформированными водами возвратного потока КУ, представленными высокоширотными водами восточной ветви КУ с долей вод АЦТ [6]. Расположенные южнее воды высокоширотной модификации, приуроченные к морям Рисер-Ларсена, Космонавтов, Содружества и Дейвиса, характеризовались высокими концентрациями биогенных элементов в поверхностном слое и максимальной изменчивостью их содержания в летний антарктический период.

Анализ результатов показал, что весенне-летнее потребление биогенных элементов происходило вслед за «фенологической волной», которая на севере исследуемой акватории (в водах ЮПФЗ) началась в декабре и проявлялась в небольшом снижении содержания фосфатов, нитратов и силикатов в поверхностном слое и увеличении аммонийного азота и органических форм азота и фосфора. В водах высокоширотной модификации пик «фенологической волны» сместился на февральмарт, в декабре здесь сохранялись высокие (почти зимние) концентрации биогенных элементов. Максимальная сезонная динамика отмечалась в районе шельфовых вод морей Содружества и Дейвиса, где, опережая приход естественной «фенологической волны», в декабре—январе наблюдалось резкое снижение концентраций минеральных форм биогенных элементов вплоть до нулевых значений, при этом резко возрастали концентрации аммонийного азота, а также органических форм азота и фосфора.

Межгодовая изменчивость гидрохимических характеристик определялась главным образом пространственным сдвигом ЮПФЗ и ЮФАЦТ, вслед за которыми сдвигался и гидрохимический фронт, а также интенсивностью крупномасштабного круговорота Уэдделла, сопровождаемого расширением или сужением акватории распространения высокоширотных вод с пониженными температурами и высокими концентрациями биогенных элементов. По полученным данным в летний антарктический сезон 2017/18 г. впервые за исследуемый период было зафиксировано резкое смещение ЮПФЗ и ЮФАЦТ максимально далеко на север, а также усиление интенсивности распространения высокоширотных вод КУ с высокими концентрациями растворенного кислорода и биогенных элементов и низкой температурой в поверхностном слое антарктических вод. По литературным данным известно, что тенденция к смещению широтного положения фронтов ЮПФЗ на север прослеживалась на протяжении 25 лет (с конца 1990-х до 2009 г.) [35]. В летний антарктический период 2019/20 г. наблюдалась обратная ситуация — резкое смещение фронтов АЦТ на юг и аномальное распространение вод с низкими концентрациями биогенных элементов и высоким значением температуры воды во всем поверхностном слое антарктических вод.

Таким образом, пространственное распределение гидрохимических характеристик на исследуемой акватории Южного океана определялось в большей степени гидрологической структурой и ее изменчивостью в пространстве и во времени, а в меньшей степени продукционно-деструкционными процессами. Только в прибрежной акватории морей Содружества и Дейвиса создавались уникальные для Южного океана условия, когда в летний антарктический период влияние биохимических процессов превалировало над циркуляционными. Для этих акваторий была отмечена максимальная сезонная и межгодовая изменчивость гидрохимических показателей, которая определялась гидрометеорологическими условиями в каждый конкретный год. При теплой и безветренной погоде здесь формировались своеобразные летние «оазисы» с резкими вспышками цветения фитопланктона, которые сопровождались активным потреблением биогенных элементов и значительным снижением их содержания в поверхностных водах. По полученным данным такие высокоширотные «оазисы» были особенно характерны для шельфовых вод моря Содружества (залив Прюде) со свойственными этому району многочисленными и продолжительными солнечными днями, открытой ото льда водой и ее интенсивным прогревом. В море Дейвиса они были не столь выражены, а в морях Рисер-Ларсена и Космонавтов не наблюдались.

Конфликт интересов. Отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-31148 мол а).

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам, участвовавшим в научных исследованиях в составе 53–65-й РАЭ, за помощь в получении и обработке гидрохимических данных.

Competing interests. No competing interests.

Funding. The research is supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project 14-05-31148 mol a.

Acknowledgments. The authors are grateful to their Colleagues of 53–65 RAE for assistance in obtaining and determination of hydrochemical characteristics.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Аржанова Н.В., Буркальцева М.А. Обеспеченность фитопланктона биогенными элементами в Атлантическом океане // Биологические ресурсы Атлантического океана. М.: Наука, 1986. С. 111–133.
- 2. *Горшков А.Н., Гудошников Ю.П., Смагин В.М.* Основные черты пространственного распределения гидрохимических показателей в Южном океане // Пелагические экосистемы Южного океана: Сборник научных трудов. М.: Наука, 1993. С. 99–107.
- 3. Henley S.F., Cavan E.L., Fawcett S.E., Kerr R., Monteiro T., Sherrell R.M., Bowie A.R., Boyd P.W., Barnes D.K.A., Schloss I.R., Marshall T., Flynn R., Smith S. Changing biogeochemistry of the Southern Ocean and its ecosystem implications // Front. Mar. Sci. 2020. V. 7. Article 581. doi: 10.3389/fmars.2020.00581.
- 4. *Аржанова Н.В., Артамонова К.В.* Гидрохимическая структура вод в районе промысла антарктического криля // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 118–132.
- 5. *Батрак К.В.* Гидрохимическая характеристика различных модификаций антарктических вод // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 371–378.
- 6. Масленников В.В. Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. М.: ВНИРО, 2003. 295 с.

7. Campanelli A., Massolo S., Grilli F., Marini M., Paschini E., Rivaro P., Artegiani A., Jacobs S. Variability of nutrient and thermal structure in surface waters between New Zealand and Antarctica, October 2004–January 2005 // Polar Research. 2011. V. 30. Article 7064. doi: 10.3402/polar.v30i0.7064.

- 8. *Budillon G., Rintoul S.R.* Fronts and upper ocean thermal variability south of New Zealand // Antarctic Science. 2003. № 15. P. 141–152.
- 9. *Orsi A.H., Whitworth Th. III, Nowlin W. D. Jr.* On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // Deep-Sea Res. 1995. V. 42. № 5. P. 641–673.
- 10. Структура гидрофизических полей атлантического сектора Южного океана и их влияние на планктонные сообщества: Науч. отчет по теме № 01 / [Сост. М. А. Богдановым и др.]. М.: ВНИРО, 1986. 63 с.
- 11. *Масленников В.В., Полков В.В.* Положение зоны взаимодействия антарктических вод разных модификаций как показатель северной границы массового дрейфа антарктического криля // Антарктика: Доклады Междуведомственной комиссии по изучению Антарктики. Вып. 27. М.: Наука, 1988. С. 134—142.
- 12. Федулов П.П., Шнар В.Н. Фронтальная зона и структура вод круговорота Уэдделла // Исследования Уэдделловского круговорота. Океанографические условия и особенности развития планктонных сообществ: Сборник научных трудов. М.: ВНИРО, 1990. С. 31–48.
- 13. Franck V.M., Brzezinski M.A., Coale K.H., Nelson D.M. Iron and silicic acid concentrations regulate Si uptake north and south of the polar frontal zone in the pacific sector of the Southern ocean // Deep Sea Res. Part II. Top. Stud. Oceanogr. 2000. № 47. P. 3315–3338. doi: 10.1016/s0967–0645(00)00070–9.
- 14. Сапожников В.В., Ширяев В.А. Использование гидрохимических характеристик для выяснения динамики вод и оценки продукционно-деструкционных процессов в районах тропических апвеллингов // Промыслово-океанографические исследования продуктивных зон морей и океанов: Сборник научных трудов. М.: ВНИРО, 1984. С. 151–165.
- 15. *Hart T.J.* Phytoplankton periodicity in Antarctic surface waters // Discovery Rep. 1942. V. 21. P. 261–356.
- 16. *El-Sayed S.Z.* History and evolution of primary productivity studies of the Southern Ocean // Polar Biol. 2005. № 28. P. 423–438.
- 17. *Martin J.H., Fitzwater S.E.* Iron Deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific Subarctic // Nature. 1988. V. 331. P. 341–343.
- 18. *Sedwick P.N., Bowie A.R., Trull T.W.* Dissolved iron in the Australian sector of the Southern Ocean (CLIVAR SR3 section): Meridional and seasonal trends // Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Papers. 2008. V. 55. P. 911–925. doi: 10.1016/j.dsr.2008.03.011.
- 19. *Shafiee R.T., Snow J.T., Zhang Q., Rickaby R.E.M.* Iron requirements and uptake strategies of the globally abundant marine ammonia-oxidizing archaeon, *Nitrosopumilus maritimus* SCM1 // ISME J. 2019. V. 13. P. 2295–2305. doi: 10.1038/s41396–019–0434–8.
- 20. *Boyd P.W.* The role of iron in the biogeochemistry of the Southern Ocean and equatorial Pacific: a comparison of in situ iron enrichments // Deep Sea Research II. 2002. V. 49. P. 1803–1821.
- 21. *Чмыр В.Д.* Первичная продукция в водах Атлантической части Антарктики в предзимний период 1998 г. // Бюл. Укр. Антарк. Цент. 2002. Вып. 4. С. 141–142.
- 22. Millero F.J. Chemical Oceanography. 3rd ed. Taylor and Francis Group, 2006. 496 p.
- 23. Ведерников В.И., Сапожников В.В. Влияние добавок различных элементов минерального питания на первичную продукцию антарктического фитопланктона // Труды ИОАН СССР. 1978. Т. 112. С. 58–68.
- 24. *Волковинский В.В.* Измерения первичной продукции в море Скотия // Морские биологические ресурсы Антарктики. М.: Изд-во «Пищевая промышленность», 1969. С. 160–168.
- 25. Орадовский С.Г. О роли микроэлементов в процессе формирования первичной продуктивности морских вод // Основы биологической продуктивности океана. М.: Наука, 1971. С. 32–36.

- 26. *Horne A.J., Fogg G.E., Eagle D.Y.* Studies in situ of the primary production of an area of inshore Antarctic sea // J. Mar. Biol. Assoc. U. K. 1969. V. 49. № 2. P. 393–405.
- 27. *Макаров Р.Р.* Некоторые данные о численности и возрастном составе массовых копепод и личинок эвфаузиид в прибрежных водах Антарктики // Антарктика. Вып. 33. М.: Наука, 1995. С. 88–106.
- 28. Батрак К.В., Масленников В.В., Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Особенности структуры вод шельфа и материкового склона в море Содружества по данным экспедиции НИС «Академик Федоров» в 2006 г. // Арктика и Антарктика. М.: Наука, 2007. Вып. 5 (39). С. 112–124.
- 29. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
- 30. *Strickland J.D.H.*, *Parsons T.R.* A practical handbook of seawater analysis // Fisheries Research Board of Canada Bulletin. 1968. № 167. 203 p.
- 31. *Аржанова Н.В.* Отношение содержания кремния и фосфора как показатель зоны смешения вод в области Южных Оркнейских островов и Антарктического полуострова // Антарктика. М.: Наука, 1982. Вып. 21. С. 95–100.
- 32. De Baar H.J.W., de Jong, Bakker D.C.E., Löscher B. M., Veth C., Bathmann U., Smetacek V. Importance of iron for plankton blooms and carbon dioxide drawdown in the Southern Ocean // Nature. 1995. V. 373 (6513). P. 412–415. https://doi.org/10.1038/373412a0.
- 33. Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Термическая структура верхнего слоя океана между Африкой и Антарктидой по данным океанографических работ ААНИИ 2004—2010 гг. // Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Сер. Океанология и морской лед. М.; СПб.: ООО «Па-улсен», 2011. С. 280—290.
- 34. Ионов В.В. Синоптический мониторинг поверхностных термических фронтов Южного океана // Труды ВНИРО. 2015. Т. 157. С. 143–150.
- 35. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Бабий М.В., Галковская Л.К. Межгодовая изменчивость температурных фронтов Южного океана // Системы контроля окружающей среды. 2009. Вып. 12. С. 280–282.

REFERENCES

- 1. *Arzhanova N.V., Burkal tseva M.A.* Providing of phytoplankton with nutrients in the Atlantic Ocean. *Biologicheskie resursy Atlanticheskogo okeana*. Biological resources of the Atlantic Ocean. Moscow: Nauka, 1986: 111–133. [In Russian].
- 2. *Gorshkov A.N., Gudoshnikov Yu.P., Smagin V.M.* The main features of the spatial distribution of hydrochemical indicators in the Southern Ocean. *Pelagicheskie ekosistemy Iuzhnogo okeana: Sbornik nauchnykh trudov.* Pelagic systems of the Southern Ocean: Digest of scientific papers. Moscow: Nauka, 1993: 99–107. [In Russian].
- 3. Henley S.F., Cavan E.L., Fawcett S.E., Kerr R., Monteiro T., Sherrell R.M., Bowie A.R., Boyd P.W., Barnes D.K.A., Schloss I.R., Marshall T., Flynn R., Smith S. Changing biogeochemistry of the Southern Ocean and its ecosystem implications. 2020. Front. Mar. Sci. 2020, 7: 581. doi: 10.3389/fmars.2020.00581.
- 4. *Arzhanova N.V., Artamonova K.V.* Hydrochemical structure of waters in the Antarctic krill fishery area. *Trudy VNIRO*. Proc. VNIRO. 2014, 152: 118–132. [In Russian].
- 5. *Batrak K.V.* Hydrochemical characteristics of various modifications of Antarctic waters. *Okeanologiia*. Oceanology. 2008, 48 (3): 371–378. [In Russian].
- 6. Maslennikov V.V. Klimaticheskie kolebaniya i morskaya ekosistema Antarktiki. Climate fluctuations and the Antarctic marine ecosystem. Moscow: VNIRO, 2003: 295 p. [In Russian].

7. Campanelli A., Massolo S., Grilli F., Marini M., Paschini E., Rivaro P., Artegiani A., Jacobs S. Variability of nutrient and thermal structure in surface waters between New Zealand and Antarctica, October 2004–January

- 8. *Budillon G., Rintoul S.R.* Fronts and upper ocean thermal variability south of New Zealand. Antarctic Science. 2003, 15: 141–152.
- 9. Orsi A.H., Whitworth Th. III, Nowlin W. D. Jr. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. Deep-Sea Res. 1995, 42 (5): 641–673.
- 10. Struktura gidrofizicheskikh polej atlanticheskogo sektora yuzhnogo okeana i ikh vliyanie na planktonnye soobshhestva. The structure of hydrophysical fields in the Atlantic sector of the Southern ocean and their impact on plankton communities. Moscow: VNIRO, 1986: 63 p. [In Russian].
- 11. *Maslennikov V.V., Popkov V.V.* Position of the interaction zone of Antarctic waters of various modifications as an indicator of the northern boundary of the mass drift of Antarctic krill. Antarctica. *Antarktika: Doklady Mezhduvedomstvennoi komissii po izucheniiu Antarktiki*. Antarctica: Reports of the Interdepartmental Commission for the Study of Antarctica. Iss. 27. Moscow: Nauka, 1988; 134–142. [In Russian].
- 12. Fedulov P.P., Shnar V.N. Frontal zone and water structure of the Weddell Circle. Issledovaniia Ueddellovskogo krugovorota. Okeanograficheskie usloviia i osobennosti razvitiia planktonnykh soobshchestv: Sbornik nauchnykh trudov. Researches of the Weddell Circle. Oceanographic conditions and features of the plankton communities development. Digest of scientific papers. Moscow: VNIRO, 1990: 31–48. [In Russian].
- 13. Franck V.M., Brzezinski M.A., Coale K.H., Nelson D.M. Iron and silicic acid concentrations regulate Si uptake north and south of the polar frontal zone in the pacific sector of the Southern ocean. Deep Sea Res. Part II. Top. Stud. Oceanogr. 2000, 47: 3315–3338. doi: 10.1016/s0967–0645(00)00070–9.
- 14. *Sapozhnikov V.V., Shiryaev V.A.* The use of hydrochemical characteristics to clarify the dynamics of waters and assess the production and destruction processes in the areas of tropical upwellings. *Promyslovo-okeanograficheskie issledovaniia produktivnykh zon morei i okeanov: Sbornik nauchnykh trudov.* Commercial oceanographic studies of productive zones of the seas and oceans. Digest of scientific papers. Moscow: VNIRO, 1984: 151–165. [In Russian].
- 15. *Hart T.J.* Phytoplankton periodicity in Antarctic surface waters. Discovery Rep. 1942, 21: 261–356. 16. *El-Sayed S.Z.* History and evolution of primary productivity studies of the Southern Ocean. Polar Biol. 2005, 28: 423–438.
- 17. *Martin J.H., Fitzwater S.E.* Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific Subarctic. Nature. 1988, 331: 341–343.
- 18. *Sedwick P.N., Bowie A.R., Trull T.W.* Dissolved iron in the Australian sector of the Southern Ocean (CLIVAR SR3 section): Meridional and seasonal trends. Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Papers. 2008, 55: 911–925. doi: 10.1016/j.dsr.2008.03.011.
- 19. Shafiee R.T., Snow J.T., Zhang Q., Rickaby R.E.M. Iron requirements and uptake strategies of the globally abundant marine ammoniaoxidising archaeon, *Nitrosopumilus maritimus* SCM1. ISME J. 2019, 13: 2295–2305. doi: 10.1038/s41396–019–0434–8.
- 20. *Boyd P.W.* The role of iron in the biogeochemistry of the Southern Ocean and equatorial Pacific: a comparison of in situ iron enrichments. Deep Sea Research II. 2002, 49: 1803–1821.
- 21. *Chmyr V.D.* Primary production in the waters of the Atlantic Antarctic in the pre-winter period of 1998. *Biulleten' Ukrainskogo Antarkticheskogo Tsentra*. Bulletin of Ukr. Antarc. Center. 2002, 4: 141–142. [In Russian].
- 22. Millero F.J. Chemical Oceanography. 3rd ed. Taylor and Francis Group, 2006: 496 p.
- 23. *Vedernikov V.I., Sapozhnikov V.V.* Influence of various elements additives of mineral nutrition on the primary production of Antarctic phytoplankton. *Trudy IOAN SSSR*. Proc. IOAN USSR. 1978, 112: 58–68. [In Russian].

- 24. *Volkovinsky V.V.* Measurements of primary production in the Scotia Sea. *Morskie biologicheskie resursy Antarktiki* Antarctic marine biological resources. Moscow: Publ. House "*Pishchevaya promyshlennost*", 1969: 160–168. [In Russian].
- 25. *Oradovsky S.G.* On the role of microelements in the formation of the primary productivity of sea waters. *Osnovy biologicheskoi produktivnosti okeana*. Ocean biological productivity fundamentals. Moscow: Nauka, 1971: 32–36. [In Russian].
- 26. *Horne A.J., Fogg G.E., Eagle D.Y.* Studies in situ of the primary production of an area of inshore Antarctic sea. J. Mar. Biol. Assoc. U. K. 1969, 49 (2): 393–405.
- 27. *Makarov R.R.* Some data on the abundance and age composition of mass copepods and euphausiid larvae in the coastal waters of Antarctica. *Antarktika*. Antarctica. 1995, 33: 88–106. [In Russian].
- 28. Batrak K.V., Maslennikov V.V., Antipov N.N., Klepikov A.V. Features of structure of the shelf and continental slope waters in the Sea of Cooperation according to the data of the expedition of R/V «Akademik Fedorov» in 2006. Arktika i Antarktika. Arctic and Antarctica. 2007, 5 (39): 112–124. [In Russian].
- 29. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ehkologicheskom monitoringe rybokhozyajstvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla rajonov Mirovogo okeana. Guidelines for the chemical analysis of sea and fresh waters in the environmental monitoring of fishery reservoirs and promising fishing areas of the World Ocean. Moscow: Publ. House of VNIRO, 2003: 202 p. [In Russian].
- 30. Strickland J.D.H., Parsons T.R. A practical handbook of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada Bulletin. 1968, 167: 203 p.
- 31. *Arzhanova N.V.* The ratio of the content of silicon and phosphorus as an indicator of mixing waters zone in the area of the South Orkney Islands and the Antarctic Peninsula. *Antarktika*. Antarctica. Moscow: Nauka, 1982, 21: 95–100. [In Russian].
- 32. De Baar H J. W., de Jong, Bakker D.C. E., Löscher B. M., Veth C., Bathmann U., Smetacek V. Importance of iron for plankton blooms and carbon dioxide drawdown in the Southern Ocean. Nature. 1995, 373 (6513): 412–415. https://doi.org/10.1038/373412a0.
- 33. Antipov N.N., Klepikov A.V. Thermal structure of the upper layer of the ocean between Africa and Antarctica according to the oceanographic data of the AARI 2004–2010. Vklad Rossii v Mezhdunarodnyi poliarnyi god 2007/08. Ser. Okeanologiia i morskoi led. Contribution of Russia to the International Polar Year 2007/08. Ser. Oceanology and sea ice. Moscow; St. Petersburg: LLC "Paulsen", 2011: 280–290. [In Russian].
- 34. *Ionov V.V.* Synoptic monitoring of surface thermal fronts of the Southern Ocean. Trudy VNIRO. Proc. VNIRO. 2015, 157: 143–150. [In Russian].
- 35. Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A., Babij M.V., Galkovskaya L.K. Interannual variability of temperature fronts in the Southern Ocean. Sistemy kontrolia okruzhaiushchei sredy. Environmental control systems. 2009, 12: 280–282. [In Russian].