



Научная статья

УДК 551.464.32
EDN: VMGLYK

Биогеохимические характеристики поверхностного слоя и потоки CO₂ в системе океан – атмосфера в заливах Западного Шпицбергена

Н. К. Алексеева , А. Л. Никулина, Е. В. Блошкина, Я. В. Швед,
И. В. Рыжов, А. Е. Новихин, М. С. Махотин

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия
 nkalekseeva@aari.ru

Поступила в редакцию 26.06.2024; одобрена после рецензирования 21.08.2024;
принята к публикации 12.09.2024.

Аннотация

Цель. Оценка пространственной изменчивости и сезонной динамики параметров карбонатной системы во фьордах Западного Шпицбергена по результатам экспедиционных исследований в весенний (апрель) и летний (август) сезоны 2023 г. – цель данной работы.

Методы и результаты. Изучены физико-химические параметры воды, такие как общая щелочность, pH и содержание биогенных компонентов. Анализ проб был выполнен в химико-аналитической лаборатории Российского научного центра на архипелаге Шпицберген (РНЦШ). Измерение pH проводилось с помощью лабораторного pH-метра *Mettler Toledo Seven Compact S220*. Общая щелочность определялась методом прямого титрования соляной кислотой с визуальным определением точки эквивалентности. Концентрации фосфатов и силикатов, хлорофилла *a* измерялись стандартными спектрометрическими методами. Параметры карбонатной системы, направление и скорость потока CO₂ были рассчитаны в программе *Program Developed for CO₂ System calculations*. Обнаруженные сезонная динамика и вариабельность карбонатной системы тесно связаны с атмосферными условиями, сезонной изменчивостью водных масс, интенсивностью биопродуктивности. Полученные оценки потока углекислого газа по данным за август 2023 г. позволяют сделать вывод о его поглощении в Грэнфьорде (–1,52 ... –4,76 ммоль м^{–2}·сут^{–1}) и Исфьорде (–0,12 ... –1,0 ммоль м^{–2}·сут^{–1}) в этот период, в Биллефьорде наблюдается локальная область с положительно направленным потоком углекислого газа (1,2–2,6 ммоль м^{–2}·сут^{–1}).

Выводы. В результате выполненных исследований в заливах были выявлены выраженные сезонные колебания параметров карбонатной системы и потоков углекислого газа, сходные с колебаниями в других внутренних фьордах Шпицбергена. Полученные результаты подчеркивают значимость карбонатных параметров для понимания биогеохимического баланса биогеохимических процессов в морских экосистемах в условиях глобального изменения климата.

Ключевые слова: фьорды Западного Шпицбергена, морская карбонатная система, поток CO₂, хлорофилл *a*, арагонит, Арктика


Благодарности: сбор материала осуществлен в 2023 г. Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом (АНИИ) на архипелаге Шпицберген в рамках Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш). Авторы выражают благодарность отделу координации и планирования научных исследований РАЭ-Ш за постоянное внимание к работе и качественную организацию полевых исследований, а также сотрудникам зимовочного состава РАЭ-Ш в пос. Баренцбург за оказанное содействие при выполнении полевых и лабораторных исследований. Работы выполнены в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы. Соглашение № 169-03-2024-072.

Для цитирования: Биогеохимические характеристики поверхностного слоя и потоки CO₂ в системе океан – атмосфера в заливах Западного Шпицбергена / Н. К. Алексеева [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 6. С. 878–890. EDN VMGLYK.

Original article

Biogeochemical Characteristics of the Surface Layer and CO₂ Fluxes in the Ocean – Atmosphere System in the Fjords of Western Spitsbergen

N. K. Alekseeva , A. L. Nikulina, E. V. Bloshkina, Ya. V. Shved, I. V. Ryzhov, A. E. Novikhin, M. S. Makhotin

Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia
 nkalekseeva@aari.ru

Abstract

Purpose. The study is purposed at assessing and analyzing spatial variability and seasonal dynamics of the carbonate system parameters in the fjords of Western Spitsbergen based on the results of field research in the spring (April) and summer (August) seasons, 2023.

Methods and Results. The physical and chemical parameters of water, such as total alkalinity, pH and nutrient component contents are studied. The samples are analyzed in the chemical analytical laboratory of the Russian Scientific Center at the Spitsbergen (RSCS). pH is measured using a *Mettler Tolloedo Seven Compact S220* laboratory pH-meter, and total alkalinity – by direct titration of a seawater sample with a 0.02 hydrochloric acid solution (the equivalence point is determined visually). The concentrations of phosphates and silicates, as well as chlorophyll *a* are measured by standard spectrometric methods. The carbonate system parameters, and CO₂ flux direction and speed are computed within the *Program Developed for CO₂ System calculations*. The revealed seasonal dynamics and variability of the carbonate system parameters are closely related to the atmospheric conditions, water mass seasonal variability and intensity of bioproductivity. The estimates of carbon dioxide flux obtained using the data for August 2023 permit to conclude that during this period it is absorbed in Grønfjord (–1.52 ... –4.76 mmol m^{–2}·day^{–1}) and Isfjord (–0.12 ... –1.0 mmol m^{–2}·day^{–1}), whereas in Billefjord a local area with positively directed CO₂ flux (1.2–2.6 mmol m^{–2}·day^{–1}) is noted.

Conclusions. The studies carried out in the fjords have resulted in revealing seasonal fluctuations in the carbonate system parameters and the carbon dioxide fluxes similar to those in other inner fjords of Spitsbergen. The obtained results highlight the importance of the carbonate system parameters in understanding the biogeochemical balance and the state of marine ecosystems in the context of climate change.

Keywords: Western Spitsbergen fjords, marine carbonate system, CO₂ flux, chlorophyll *a*, aragonite, Arctic

Acknowledgments: The material was collected by the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) at the Spitsbergen within the framework of the Russian scientific Arctic expedition to the Spitsbergen (RAE-S) in 2023. The authors are grateful to the Department of research coordination and planning of RAE-S for their constant attention to the work and high-quality organization of field studies, as well as

to the RAE-S wintering staff in Barentsburg for their assistance in performing field and laboratory research. The study was carried out within the framework of Federal scientific and technical program for ecological development of Russian Federation and climate change for 2021–2030. Agreement No. 169-03-2024-072.

For citation: Alekseeva, N.K., Nikulina, A.L., Bloshkina, E.V., Shved, Ya.V., Ryzhov, I.V., Novikhin, A.E. and Makhotin, M.S., 2024. Biogeochemical Characteristics of the Surface Layer and CO₂ Fluxes in the Ocean – Atmosphere System in the Fjords of Western Spitsbergen. *Physical Oceanography*, 31(6), pp. 826-837.

Введение

Глобальное изменение климатической системы нашей планеты является одной из ключевых проблем, оказывающих существенное влияние практически на все сферы человеческой деятельности. Полярные области Земли и, в частности, Северный Ледовитый океан – важнейшие индикаторы и факторы этих изменений. В последние десятилетия в арктическом регионе наблюдаются сокращение площади ледяного покрова, увеличение влияния атлантических вод, интенсификация циклонической деятельности, что ведет к перестройке структуры водной толщи и изменению интенсивности гидрохимических и гидробиологических процессов.

Наибольшие изменения климатической системы происходят в Западной Арктике, в том числе в регионе арх. Шпицберген. Исследования работы [1] выявили увеличение на 4°C среднегодовой температуры приземного воздуха на западе Шпицбергена в период 1970–2012 гг., что значительно превышает рост (0,7°C) глобальной температуры воздуха за этот период. При этом установлено наибольшее увеличение температуры воздуха на 7°C в зимний период на севере от Шпицбергена с 1979 г. по результатам реанализа *ERA-Interim* Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [2].

Вместе с этим во фьордах Западного Шпицбергена температура атлантических водных масс увеличилась (напр., на 0,2°C в Исфьорде [3]), были зафиксированы более частые вторжения атлантической воды в системы западных фьордов [4, с. 5]. Также наблюдается отрицательный тренд баланса массы ледников на архипелаге [5], что способствует увеличению выбросов талой ледниковой воды в прибрежные морские воды. Все эти климатические изменения оказывают влияние на происходящие биогеохимические процессы во фьордах Западного Шпицбергена, в частности на морскую карбонатную систему.

Карбонатная система регулирует pH морской воды и контролирует циркуляцию углекислого газа (CO₂) между биосферой, литосферой, атмосферой и океанами [6]. Ее основными параметрами являются общая щелочность (*TA*), растворенный неорганический углерод (*DIC*), pH и парциальное давление CO₂ (*pCO₂*)¹. Зная эти параметры, с учетом скорости ветра и *pCO₂* в атмосфере мы можем дать количественную оценку и определить, поглощает ли океан углекислый газ или выделяет его в атмосферу.

¹ Dickson A. G. The carbon dioxide system in seawater: Equilibrium chemistry and measurements // Guide to Best Practices for Ocean Acidification Research and Data Reporting. Luxembourg : Publications office of the European Union, 2010. P. 17–40.

Фьорды Западного Шпицбергена расположены в зоне активного взаимодействия теплых, соленых атлантических и холодных, более пресных арктических вод. Район исследования включал в себя Исфьорд, являющийся одним из крупнейших фьордов в Арктике и вторым по длине на арх. Шпицберген, Грэнфьорд – относительно небольшой фьорд, расположенный на южной стороне Исфьорда, недалеко от его горла, и Биллефьорд, находящийся во внутренней части Исфьорда. Для всех фьордов выделяют 7 типов водных масс: поверхностные, промежуточные, трансформированные, атлантические, арктические, локальные и зимние [7, с. 129].

В отличие от хорошо изученного гидрологического режима исследования особенностей биогеохимических процессов и параметров карбонатной системы во фьордах Западного Шпицбергена носят более фрагментарный характер. Более того, небольшой объем данных, связанных с этой темой, часто ограничен отдельными участками фьордов, что препятствует их более широкой интерпретации [1, 8–10]. Так, в системе Исфьорда большинство исследований, в результате которых была описана сезонная динамика таких параметров вод, как pH, TA, растворенный кислород, DIC, степень насыщенности вод арагонитом (Ω_{Ar}) и др. [1, 10, 11], было выполнено в небольших по размеру Темплфьорде и Адвентфьорде в 2011–2017 гг. Наблюдения показали, что ледниковое влияние отражается в биогеохимической структуре вод Темплфьорда как в летнее, так и в зимнее время года [11]. Результаты продемонстрировали значительное влияние прибрежного стока и талой ледниковой воды на карбонатную систему и способность к поглощению CO₂. Анализ данных, полученных в Адвентфьорде, показал, что основным фактором изменчивости TA и DIC являлись колебания солености, связанные с речным стоком, процессами перемешивания и адвекцией водных масс: 77 и 45% соответственно. Биологическая активность обеспечивала 60% ежемесячных колебаний Ω_{Ar} , а изменения солености практически не оказывали влияния (5%) [1]. Анализ измерений в Темплфьорде [8] подтвердил, что увеличение запасов пресной воды (наземной и ледниковой) превращает океан из источника CO₂ в его поглотитель и обеспечивает положительную обратную связь с закислением океана.

При этом измерений параметров биогеохимической структуры вод и карбонатной системы, выполненных непосредственно в самом Исфьорде, очень мало, и все они относятся к летнему периоду [12, 13], а для Грэнфьорда и Биллефьорда таких измерений нет.

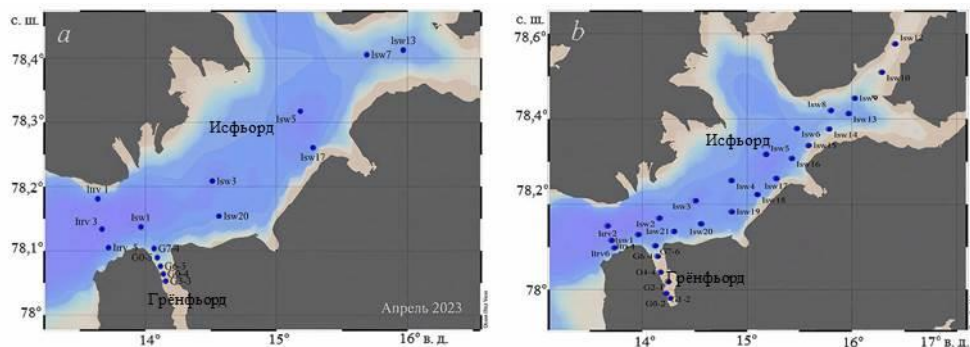
Цель данной работы – оценка пространственной изменчивости и сезонной динамики параметров карбонатной системы во фьордах Западного Шпицбергена по результатам экспедиционных исследований в весенний (апрель) и летний (август) сезоны 2023 г. Также настоящая работа вносит важный вклад в пополнение массива данных о морской карбонатной системе фьордов.

Материалы и методы

Исследования биогеохимических процессов в заливах Западного Шпицбергена, выполненные в апреле и августе 2023 г., включали в себя океанологические и гидрохимические работы. Отбор проб морской воды проводился на

заданных горизонтах. В результате лабораторного анализа этих проб были получены характеристики *ТА*, рН, фосфатов, кремния силикатов, концентрации хлорофилла *a*.

Весной пробы воды из поверхностного слоя были отобраны на 15, а в летний сезон на 28 океанологических станциях в заливах Исфьорд и Грэнфьорд (рис. 1). Общее количество обработанных проб морской воды составило 790.



Р и с. 1. Станции отбора проб в заливах Западного Шпицбергена в апреле (а) и в августе (б) 2023 г.

F i g. 1. Sampling stations in the fjords of Western Spitsbergen in April (a) and August (b), 2023

В апреле 2023 г. термохалинное профилирование выполнялось с борта маломерного судна *Farm* посредством *CTD*-зонда *SBE-19plusV2 SeaCat*. Точность измерения датчиков кондуктивности и температуры составляла $0,0005 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ и $0,005^\circ\text{C}$ соответственно. В августе 2023 г. термохалинное профилирование в акватории Исфьорда проводилось с катера «Баренцбург», в акватории Грэнфьорда – с лодки *PolarCirkel 660 Work CTD*-зондом *RBRconcerto C.T.Dfast*. Точность измерения датчиков кондуктивности и температуры составляла $0,003 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ и $0,002^\circ\text{C}$ соответственно.

Отбор проб морской воды проводился на горизонтах 0, 5, 10, 25, 50 м батометром Рутнера. Анализ проб был выполнен в химико-аналитической лаборатории РНЦШ на арх. Шпицберген.

Измерение рН проводилось по шкале *NBS* с использованием лабораторного рН-метра *Mettler Toledo Seven Compact S220* согласно методике, изложенной в РД 52.10.735-2010, с точностью определения $\pm \Delta 0,05$. Калибровка осуществлялась по трем точкам (4,01, 7,0, 9,21) с использованием буферных растворов *Mettler Tolledo*.

Для определения общей щелочности выполнялось титрование пробы раствором соляной кислоты с одновременным пропусканием через титруемую пробу потока свободного от CO_2 воздуха до точки эквивалентности с точностью измерения $\pm \Delta 0,014 \text{ ммоль} \cdot \text{л}^{-1}$ согласно методике РД 52.10.743-2010.

Содержание биогенных соединений (кремний силикатов, фосфаты) определялось стандартным спектрометрическим методом (РД 52.10.744-2020 и РД 52.10.738-2010) с точностью измерения $\pm \Delta 0,06$.

Концентрации хлорофилла *a* были получены методом спектрофотометрии согласно ГОСТу 17.1.4.02-90 с погрешностью $\pm \Delta 20\%$.

Компоненты карбонатной системы и степень насыщенности воды арагонитом рассчитывались в программе *Program Developed for CO₂ System calculations*². В расчетах параметров карбонатной системы использовались константы диссоциации угольной кислоты, приведенные в работе [14].

Направление потока углекислого газа в системе вода – атмосфера было получено с использованием квадратичной параметризации Ваннинкова из работы [15] на основе данных о $p\text{CO}_2$ в воде и в атмосфере, а также о скорости ветра. В вычислениях использовались данные о содержании диоксида углерода в атмосферном воздухе, измеренного на анализаторе монооксида и диоксида углерода *CO12M Environnement S.A.*, и скорости ветра в поверхностном слое атмосферы (до 2 м), измеренной метеорологическим комплексом *Campbell Scientific*.

Результаты и обсуждения

В апреле 2023 г. к западу от 14,9° в. д. в поверхностном слое вод Исфьорда и Грэнфьорда была зафиксирована трансформированная атлантическая водная масса с положительными значениями температуры и соленостью 34,7–34,8 (рис. 2). На поверхностный слой восточной части Исфьорда атлантические воды влияния не оказывали, здесь наблюдалась локальная водная масса (температура ниже 0°C, соленость меньше 34,7), формирующаяся в осенне-зимний период в результате охлаждения поверхностной и промежуточной водных масс. При этом для всего района исследования характерным было гомогенное распределение температуры и солености по вертикали, что является типичным для этого времени года.

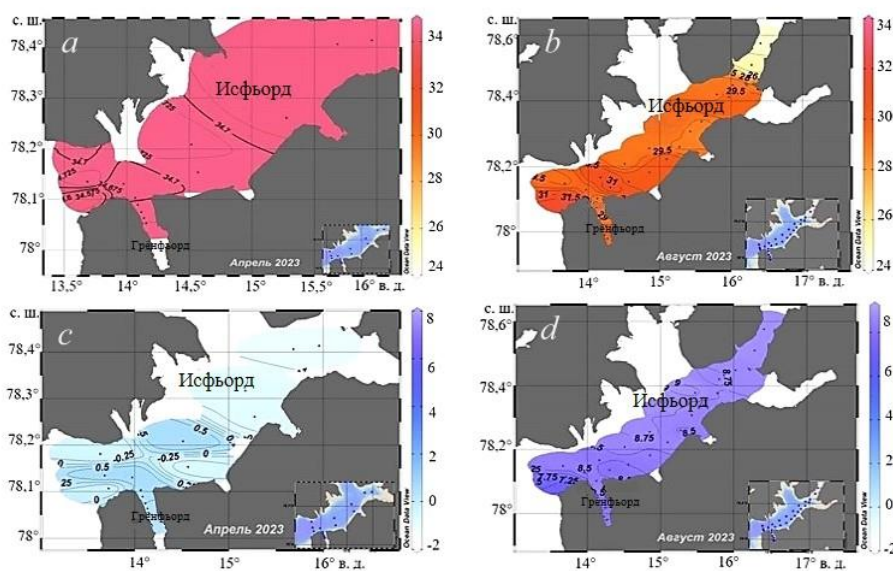


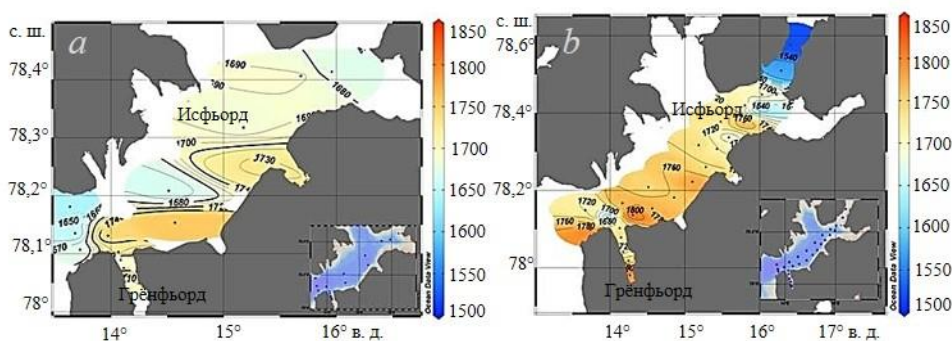
Рис. 2. Распределение гидрофизических параметров в поверхностном слое заливов Западного Шпицбергена в 2023 г.: солености в апреле (a) и в августе (b); температуры в апреле (c) и в августе (d)

Fig. 2. Distribution of hydrophysical parameters in the surface layer of the Western Spitsbergen fjords, 2023: salinity in April (a) and August (b); temperature in April (c) and August (d)

² CO₂calc – A user-friendly seawater carbon calculator for Windows, Max OS X, and iOS (iPhone) / L. L. Robbins [et al.] // Reston, U.S. : Geological Survey, 2010. 17 p.

В августе 2023 г. значения температуры и солёности на поверхности вод фьордов менялись в диапазонах 6,9–9°C и 24,7–32,3 соответственно. Минимальные значения солёности были зафиксированы в Биллефьорде на станциях (ст.) *Isw12* (24,7) и *Isw10* (25,3). На всех остальных станциях значения солёности превышали 28,8. Минимальное значение температуры наблюдалось на ст. *Itrv6*, во всех остальных точках значения температуры были > 8°C. Нижняя граница поверхностной водной массы ($T > 1^\circ\text{C}$, $S < 34,3$) в исследуемом районе была обнаружена на глубинах 30–45 м.

В апреле в Исфьорде концентрации TA изменялись в пределах 1641–1761 мкмоль·кг⁻¹, в заливе Грэнфьорд – в пределах 1686–1743 мкмоль·кг⁻¹ (рис. 3). В августе в заливе Исфьорд концентрации TA менялись в диапазоне 1610–1820 мкмоль·кг⁻¹, в заливе Грэнфьорд – в диапазоне 1710–1830 мкмоль·кг⁻¹, в заливе Биллефьорд – в диапазоне 1520–1570 мкмоль·кг⁻¹.



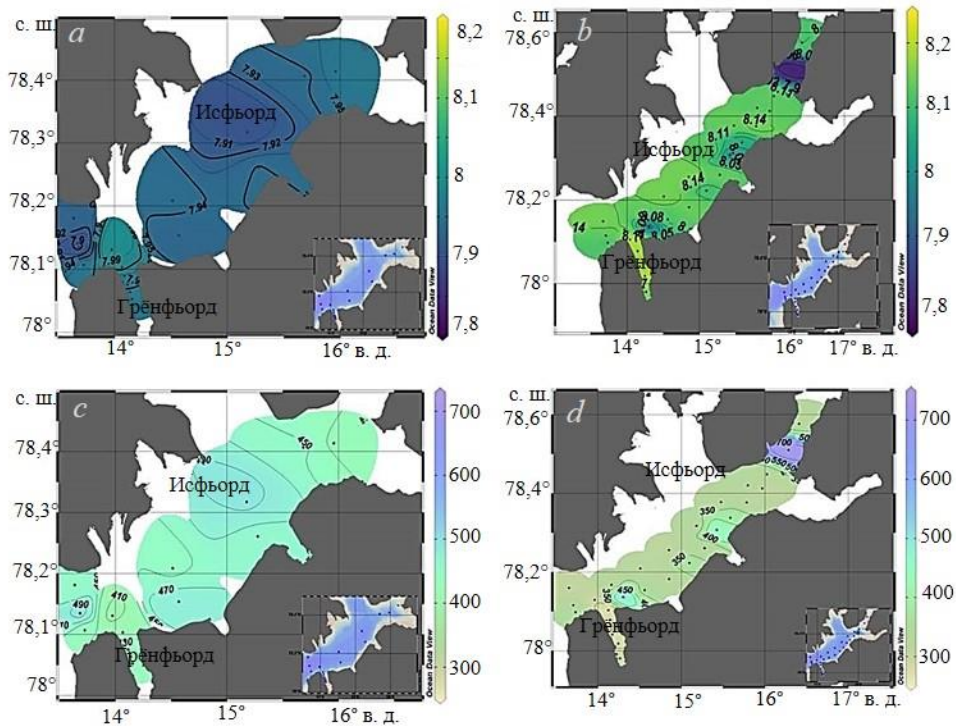
Р и с. 3. Распределение общей щёлочности (мкмоль·кг⁻¹) в апреле (а) и в августе (б) 2023 г. в поверхностном слое заливов Западного Шпицбергена

F i g. 3. Distribution of total alkalinity ($\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$) in the surface layer of the Western Spitsbergen fjords in April (a) and August (b), 2023

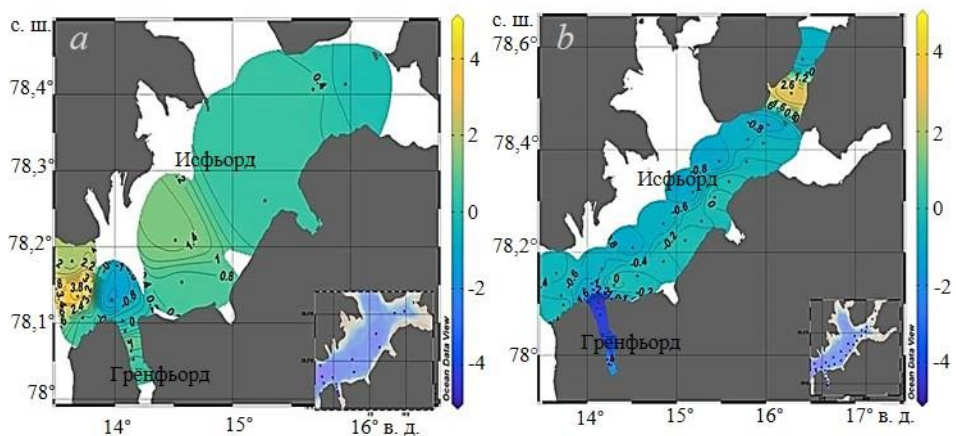
В апреле 2023 г. была зафиксирована незначительная пространственная изменчивость $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое Исфьорда и Грэнфьорда – от 400 до 500 мкатм. Пониженные значения $p\text{H}$ (7,89–8,00) и повышенные значения $p\text{CO}_2$ (рис. 4) в обоих фьордах весной 2023 г. позволяют сделать вывод о минерализации органического вещества в поверхностном слое.

В августе значения $p\text{H}$ на акватории Исфьорда находились в пределах 7,97–8,15. При этом значения $p\text{CO}_2$ на большей части акватории фьорда составили ~ 350 мкатм, за исключением локальных зон с повышенными значениями 400–450 мкатм. В Грэнфьорде $p\text{CO}_2$ изменялось в диапазоне 276–330 мкатм, $p\text{H}$ – в диапазоне 8,14–8,20.

В заливе Биллефьорд наблюдались самые высокие значения $p\text{CO}_2$ (730 мкатм) и пониженные (до 7,8) значения $p\text{H}$ (рис. 5). Такой характер распределения парциального давления углекислого газа и $p\text{H}$ можно объяснить двумя происходящими одновременно процессами – минерализацией органического вещества и фотосинтезом. При высокой концентрации биогенных элементов и освещенности процесс фотосинтеза преобладает, что приводит к изъятию углекислого газа из воды для синтеза органического вещества. Это повышает $p\text{H}$ среды и делает воду недонасыщенной по отношению к CO_2 и перенасыщенной по отношению к кислороду [16, с. 245].



Р и с. 4. Поверхностное распределение в заливах Западного Шпицбергена в 2023 г.: pH в апреле (a) и в августе (b); $p\text{CO}_2$ ($\mu\text{атм}$) в апреле (c) и в августе (d)
Fig. 4. Surface distribution of pH in April (a) and August (b), and $p\text{CO}_2$ ($\mu\text{атм}$) in April (c) and August (d) in the Western Spitsbergen fjords, 2023



Р и с. 5. Распределение в 2023 г. на границе вода – атмосфера потока CO_2 ($\text{ммоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$) в поверхностном слое заливов Западного Шпицбергена: a – в апреле, b – в августе
Fig. 5. Distribution of CO_2 flux ($\text{ммоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) at the water – atmosphere boundary in the surface layer of the Western Spitsbergen fjords in April (a) and August (b), 2023

В целом в исследуемых фьордах в августе были зафиксированы более высокие значения рН и Ω_{Ar} по сравнению с апрелем. В апреле наблюдалось недонасыщение вод арагонитом ($\Omega_{Ar} < 1$). В августе значения Ω_{Ar} изменялись в диапазоне 1,2–1,75. В заливе Биллефьорд наблюдалась локальная область с пониженными значениями Ω_{Ar} (0,75).

В Исфьорде концентрации хлорофилла *a* в апреле изменялись в пределах 0,04–0,11 мкг·л⁻¹, в августе – от 0,26 мкг·л⁻¹ (внутренняя часть фьорда) до 0,85–0,9 мкг·л⁻¹ (его мористая часть). В апреле для Грёнфьорда было характерно однородное распределение концентраций хлорофилла *a* (0,21 мкг·л⁻¹) в поверхностном слое. В августе концентрации были значительно выше, наблюдалось их увеличение от кутовой части (0,64 мкг·л⁻¹) к горлу фьорда (2,04 мкг·л⁻¹). Такие высокие концентрации хлорофилла *a* позволяют сделать вывод о «цветении» фитопланктона в Грёнфьорде в августе.

Более высокие значения концентраций хлорофилла *a* в Грёнфьорде по сравнению с Исфьордом, вероятно, обусловлены влиянием берегового стока, увеличивающего количество биогенных элементов, необходимых для вегетации микроводорослей. В свою очередь, высокие значения рН в Грёнфьорде способствовали продуктивности фитопланктона, увеличивая доступность питательных веществ [17, с. 58].

В апреле распределение концентраций кремния в поверхностном слое фьордов было однородным, они изменялись в незначительном диапазоне 9–10 мкмоль·л⁻¹, минимальные значения были зафиксированы в горле Исфьорда. В августе для Грёнфьорда и Биллефьорда характерными были более высокие концентрации кремния (4,5–6 мкмоль·л⁻¹) по сравнению с Исфьордом (2–4,5 мкмоль·л⁻¹), что обусловлено влиянием пресноводного стока. Минимальные концентрации кремния наблюдались вдоль южного берега Исфьорда.

В апреле в поверхностном слое фьордов на большинстве станций концентрации фосфатов изменялись в пределах 0,6–0,8 мкмоль·л⁻¹. Более высокие значения (1,4 и 1 мкмоль·л⁻¹) были зафиксированы на ст. *Isw3* и *Isw7* соответственно. В августе концентрации фосфатов составили 0,09–0,73 мкмоль·л⁻¹ в Исфьорде, 0,1–0,30 мкмоль·л⁻¹ в Грёнфьорде и 0,26 мкмоль·л⁻¹ в Биллефьорде.

Обмен CO₂ между океаном и атмосферой происходит при наличии вертикального градиента парциального давления (ΔpCO_2) между поверхностным слоем морской воды и приводным слоем атмосферы. Если $\Delta pCO_2 > 0$, то происходит выделение CO₂ из океана в атмосферу и наоборот, при $\Delta pCO_2 < 0$ поток считается отрицательным и происходит поглощение CO₂ океаном [18, с. 220].

В данной работе исследования проводились при низких скоростях ветра (< 5 м·с⁻¹) в обоих сезонах. В апреле потоки углекислого газа в системе вода – атмосфера (FCO_2), рассчитанные для заливов Исфьорд и Грёнфьорд, изменялись в диапазонах 0,37–4,18 и 0,2–1,43 ммоль·м⁻²·сут⁻¹ соответственно, что говорит о выделении углекислого газа в атмосферу. Полученные оценки FCO_2 по данным за август 2023 г. позволяют сделать вывод о поглощении CO₂ в Грёнфьорде (–1,52 ... –4,76 ммоль·м⁻²·сут⁻¹) и Исфьорде (–0,12 ... –1,0 ммоль·м⁻²·сут⁻¹) в этот период, в Биллефьорде наблюдается локальная область с положительно направленным FCO_2 (1,2–2,6 ммоль·м⁻²·сут⁻¹) (рис. 5).

Данные натуральных наблюдений в апреле и августе 2023 г. и результаты их анализа хорошо согласуются с результатами других исследователей. Для Исфьорда, также как и для других крупных фьордов Западного Шпицбергена – Кроссфьорда, Конгсфьорда, залива Хорнсунд, характерным оказалась значительная пространственная изменчивость TA , что связано со сложностью системы фьордов с многочисленными источниками пресной воды (реки, тающие ледники), которые могут иметь разные концентрации TA в зависимости от биогеохимических процессов и геологического строения водосбора. Кроме того, значительную роль в распределении TA в прибрежных районах играют процессы, происходящие в толще воды, такие как кальцификация, растворение $CaCO_3$ или образование рассола [12]. Так, например, очень низкие значения общей щелочности наблюдались в 2012 г. в апреле – мае ($1142 \text{ мкмоль} \cdot \text{кг}^{-1}$) и в сентябре ($526 \text{ мкмоль} \cdot \text{кг}^{-1}$) в Темплфьорде, что связано с влиянием интенсивного ледникового стока [11, с. 16]. По нашим данным, минимальные значения общей щелочности были зафиксированы в заливе Биллефьорд в августе 2023 г., где (несмотря на то что выводной ледник Норденшельда уже полностью отступил на сушу) распределение по-прежнему достаточно велико, чтобы уменьшить общую щелочность морской воды в период максимальной абляции в августе.

Наши исследования показали, что для Исфьорда, также как и для Темплфьорда [8, 10] и Адвентфьорда [1], характерными процессами являются уменьшение pCO_2 и увеличение Ω_{Ar} от зимних месяцев к летним. При этом значения pCO_2 ($400\text{--}500 \text{ мкатм}$) в Исфьорде, по данным за апрель 2023 г., были выше, чем зафиксированные в Темплфьорде в середине марта 2012 г. (370 мкатм), согласно [8, с. 2423], и в марте 2016 г. (330 мкатм), согласно [10, с. 8]. Значения Ω_{Ar} ($1,2\text{--}1,75$) для Исфьорда в августе 2023 г. были ниже, чем в августе 2018 г. ($2\text{--}2,5$), согласно работе [12, с. 4], но совпадали со значениями, полученными в Темплфьорде в августе 2016 г. ($1,45$) и 2017 г. ($1,48$), согласно работе [10, с. 9].

Скорости потоков углекислого газа в системе вода – атмосфера, рассчитанные нами для заливов Исфьорд и Грэнфьорд по данным за август 2023 г., оказались ниже по сравнению с оценками, полученными для Темплфьорда ($-11 \dots -17 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) для июня – начала августа 2017 г. [11, с. 5], но близкими к оценкам, полученным нами в исследуемых заливах в сентябре 2022 г. ($-0,2 \dots -1,9 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) [19, с. 236].

Близкие диапазоны концентраций основных биогеохимических параметров, полученных нами в 2023 г. и ранее другими исследователями, позволяют нам сделать вывод, что такие значения являются характерными для района исследования, отличающимися выраженными сезонными колебаниями.

Заключение и выводы

В ходе исследования было проведено сравнение данных двух экспедиций, состоявшихся в апреле и августе 2023 г. в заливах Исфьорд, Биллефьорд и Грэнфьорд (арх. Западный Шпицберген). Анализ полученных результатов подтвердил хорошо изученную для данного региона сезонную изменчивость не только термохалинных характеристик, но и различных биогеохимических процессов. Их сезонная изменчивость проявлялась в выраженных колебаниях

параметров карбонатной системы и потоков углекислого газа, что свидетельствует о динамической природе отклика морской экосистемы на изменения климата.

Результаты измерения концентраций кремния и фосфатов показали, что для апреля характерным было практически однородное пространственное распределение их значений. Летом диапазоны, в которых изменялись концентрации этих биогенных соединений, значительно увеличились. Высокие концентрации кремния в Грёнфьорде и Биллефьорде по сравнению с Исфьордом были обусловлены влиянием пресноводного стока. Закономерностей в особенностях пространственного распределения концентраций фосфатов в августе выявлено не было.

В весенний период наблюдалось повышение уровней $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое воды и снижение рН, что говорит о процессе минерализации органического вещества. Такие значения $p\text{CO}_2$ были обусловлены преобладанием холодных водных масс и меньшей солнечной активностью, что оказывало влияние на интенсивность биогеохимических процессов. Летом наблюдалась противоположная картина: уменьшение уровней $p\text{CO}_2$ и увеличение рН в связи с активизацией фотосинтетической деятельности фитопланктона. Повышенная биопродуктивность для этого периода года вызвана активным прогревом поверхностного слоя и поступлением пресноводного стока, способствующего более интенсивному потреблению CO_2 , увеличению содержания кислорода и щелочности вод. В различные сезоны поверхностный слой воды характеризовался разной степенью насыщенности арагонитом: в апреле наблюдалось недонасыщение ($\Omega_{\text{Ar}} < 1$), в августе — уменьшение коррозионности. Следует отметить, что в апреле акватория заливов была свободна ото льда, что дало возможность оценить направление и скорость потока CO_2 в системе вода – атмосфера. Согласно нашим расчетам, в апреле в поверхностном слое воды происходило выделение с небольшими скоростями $F\text{CO}_2$, а в августе наблюдалось поглощение CO_2 из атмосферы в воду в Исфьорде и Грёнфьорде. В Биллефьорде была отмечена локальная область с положительно направленным $F\text{CO}_2$. По данным за сентябрь 2022 г., в заливах Исфьорд и Грёнфьорд $F\text{CO}_2$ также был направлен из атмосферы в воду.

Продолжение и расширение исследований в этой области будет способствовать лучшему пониманию сезонной динамики процессов в результате происходящих климатических изменений, что позволит оценить влияние этих глобальных изменений на уникальные и чувствительные арктические экосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seasonal dynamics of the marine CO_2 system in Adventfjorden, a west Spitsbergen fjord / Y. Ericson [et al.] // Polar Research. 2019. Vol. 38. 3345. <https://doi.org/10.33265/polar.v38.3345>
2. Loss of sea ice during winter north of Svalbard / I. H. Onarheim [et al.] // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2014. Vol. 66, iss. 1. 23933. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.23933>
3. Warming of Atlantic Water in two west Spitsbergen fjords over the last century (1912–2009) / A. K. Pavlov [et al.] // Polar Research. 2013. Vol. 32. 11206. <https://doi.org/10.3402/polar.v32i0.11206>

4. *Bloshkina E. V., Pavlov A. K., Filchuk K.* Warming of Atlantic Water in three west Spitsbergen fjords: recent patterns and century-long trends // *Polar Research*. 2021. Vol. 40. 5392. <https://doi.org/10.33265/polar.v40.5392>
5. A long-term dataset of climatic mass balance, snow conditions, and runoff in Svalbard (1957–2018) / W. van Pelt [et al.] // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13, iss. 9. P. 2259–2280. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2259-2019>
6. Millero E. J. The Carbonate System in Marine Environments // *Chemical Processes in Marine Environments* / Eds. A. Gianguzza, E. Pelizetti, S. Sammartano. Berlin, Heidelberg : Springer, 2000. P. 9–41. (Environmental Science and Engineering Series). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04207-6>
7. *Блошкина Е. В., Фильчук К. В.* Современное состояние вод фьордов Западного Шпицбергена // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018. Т. 64, № 2. С. 125–140. EDN VOHLUQ. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-2-125-140>
8. Effect of glacial drainage water on the CO₂ system and ocean acidification state in an Arctic tidewater-glacier fjord during two contrasting years / A. Fransson [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015. Vol. 120, iss. 4. P. 2413–2429. <https://doi.org/10.1002/2014jc010320>
9. Late winter-to-summer change in ocean acidification state in Kongsfjorden, with implications for calcifying organisms / A. Fransson [et al.] // *Polar Biology*. 2016. Vol. 39, iss. 10. P. 1841–1857. <https://doi.org/10.1007/s00300-016-1955-5>
10. Marine CO₂ system variability in a high arctic tidewater-glacier fjord system, Tempelfjorden, Svalbard / Y. Ericson [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2019. Vol. 181. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.04.013>
11. Arctic Inshore Biogeochemical Regime Influenced by Coastal Runoff and Glacial Melting (Case Study for the Tempelfjord, Spitsbergen) / M. Pogojeva [et al.] // *Geosciences*. 2022. Vol. 12, iss. 1. 44. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010044>
12. The marine carbonate system variability in high meltwater season (Spitsbergen Fjords, Svalbard) / K. Kozirowska-Makuch [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2023. Vol. 211, iss. 3. 102977. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2023.102977>
13. In-situ parameters, nutrients and dissolved carbon distribution in the water column and pore waters of Arctic fjords (Western Spitsbergen) during a melting season. / S. R. Saghravani [et al.]. *Earth System Science Data*, 2024. Preprint. 19 p. <https://doi.org/10.5194/essd-2024-13>
14. Measurement of the Apparent Dissociation Constants of Carbonic Acid in Seawater at Atmospheric Pressure¹ / C. Mehrbach [et al.] // *Limnology and Oceanography*. 1973. Vol. 18, iss. 6. P. 897–907. <https://doi.org/10.4319/lo.1973.18.6.0897>
15. *Wanninkhof R.* Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited // *Limnology and Oceanography: Methods*. 2014. Vol. 12, iss. 6. P. 351–362. <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>
16. Карбонатная система Амурского залива (Японское море) летом 2005 г. / П. Я. Тищенко [и др.] // *Известия ТИНРО*. 2006 Т. 146. С. 235–255. EDN NYZDTL.
17. *Березовская В. А., Ляндзберг Р. А.* Факторы, влияющие на величину pH в прибрежных водах Камчатки // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2004. № 3. С. 58–61. EDN NDHANN.
18. *Малинин В. Н., Образцова А. А.* Изменчивость обмена углекислым газом в системе океан-атмосфера // *Общество. Среда. Развитие*. 2011. № 4. С. 220–226. EDN OWVNJZ.
19. Marine Carbonate System Parameters of the West Spitsbergen Fjords in Late Summer 2022 / N. K. Alekseeva [et al.] // *Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023)*. Proceedings of the VII International Conference of Young Scientists / Ed. T. Chaplina. Cham : Springer, 2023. P. 233–238. (Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). https://doi.org/10.1007/978-3-031-47851-2_27

Об авторах:

Алексеева Наталья Константиновна, научный сотрудник, ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), **ORCID ID: 0000-0002-0705-6408**, **ResearcherID: J-5432-2016**, **Scopus Author ID: 57208470667**, **SPIN-код: 6849-5034**, nkalekseeva@aari.ru

Никулина Анна Леонидовна, заместитель начальника, Российская научная арктическая экспедиция на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш), ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), **Dr. rer. nat.**, **ORCID ID: 0000-0002-7001-338X**, **SPIN-код: 5267-8093**, **Scopus Author ID: 26039425600**, anikulina@aari.ru

Блошкينا Екатерина Владимировна, младший научный сотрудник, ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), **ORCID ID: 0000-0002-2078-7459**, **ResearcherID: I-6901-2015**, **Scopus Author ID: 36166378400**, **SPIN-код: 3210-3627**, bloshkinaev@mail.ru

Швед Яна Валерьевна, инженер, ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), **ORCID ID: 0009-0009-2985-7570**, **ResearcherID: HPE-4386-2023**, **SPIN-код: 8335-7948**, yvswede@aari.ru

Рыжов Иван Владимирович, младший научный сотрудник, ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), **ORCID ID: 0009-0008-8300-6550**, ryzhov@aari.ru

Новихин Андрей Евгеньевич, научный сотрудник, ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), **ORCID ID: 0000-0001-5141-8624**, **ResearcherID: J-6005-2016**, **Scopus Author ID: 36669102600**, **SPIN-код: 2874-638**, andrey_n@aari.ru

Махотин Михаил Сергеевич, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией гидрологического режима Северного Ледовитого океана, ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (199397, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), **ORCID ID: 0000-0002-2801-1030**, **ResearcherID: K-8861-2016**, **Scopus Author ID: 23995647100**, **SPIN-код: 4672-9570**, makhotin@aari.ru