

Распределение биогенных веществ в придонных водах Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых

А. А. Полухин¹, Ю. С. Гурова², ✉

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ Gurova@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 22.09.2025; одобрена после рецензирования 14.10.2025;
принята к публикации 10.11.2025.

Аннотация

Цель. Выявлены закономерности пространственной изменчивости концентраций основных биогенных веществ (нитриты и нитраты, фосфаты, силикаты) и параметров карбонатной системы (рН, общая щелочность) в придонном слое вод морей Лаптевых и Восточно-Сибирского.

Методы и результаты. Комплексное исследование придонного слоя вод морей Лаптевых и Восточно-Сибирского основано на данных, полученных в ходе 69-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», проходившего в летне-осенний период 2017 г. Пробы придонной воды отбирали на четырех разрезах: Хатангском и Ленском (море Лаптевых), Индигирском и Кольмском (Восточно-Сибирское море). Для отбора использовали трубку Неймисто с послойным извлечением воды из трех горизонтов (0–15, 15–30 и 30–45 см) над дном. Гидрохимические параметры определяли стандартными методами. Выявлено, что общая щелочность в целом возрастала по мере удаления станций от берега, указывая на влияние речного стока (1,1–1,9 мМ/л), к отдаленным участкам шельфа (2,2–2,5 мМ/л). Во всех районах сохранялись слабощелочные условия (рН 7,8–8,1). Наименьшее насыщение вод кислородом (56–73 %) отмечено в зонах прямого влияния крупных рек и в районах с ограниченным водообменом. Максимальные концентрации фосфатов (до 1,43 мкМ) и силикатов (до 41,22 мкМ) на прибрежных станциях подтверждают влияние речного стока, при этом аномально высокие концентрации этих элементов и их неконсервативное вертикальное распределение в отдельных глубоководных районах могут указывать на дополнительные источники поступления, такие как диагенетические процессы и влияние таяния подводной мерзлоты.

Выводы. Полученные данные подчеркивают ключевую роль придонного слоя как зоны активной трансформации биогенных элементов, где взаимодействие физических, химических и биологических процессов существенно влияет на функционирование донных экосистем. Результаты имеют важное значение для оценки воздействия климатических изменений на арктический шельф, особенно в контексте деградации подводной мерзлоты и изменения режима речного стока.

Ключевые слова: Арктика, Восточно-Сибирское море, море Лаптевых, арктический шельф, гидрохимия, карбонатная система, придонные воды, биогенные элементы, придонный слой

Благодарности: работа выполнена в рамках тем государственного задания Института океанологии РАН FMWE-2024-0021 «Структурно-функциональная организация, биологическая продуктивность и механизмы современной климатической и антропогенной изменчивости морских и океанических экосистем; экосистемы Арктического бассейна и морей России в современных условиях, биоресурсный потенциал океанических и морских экосистем», а также ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0001 «Фундаментальные исследования процессов, определяющих потоки вещества и энергии в морской среде и на ее границах, состояние и эволюцию физической и биогеохимической структуры морских систем в современных условиях». Авторы выражают благодарность академику М. В. Флинту за организацию экспедиций и возможность получить

данные, к. б. н. А. А. Удалову за помощь при отборе проб, коллегам из Лаборатории биогеохимии ИО РАН за помощь при обработке проб в ходе экспедиции.

Для цитирования: Полухин А. А., Гурова Ю. С. Распределение биогенных элементов в придонных водах Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 1. С. 101–114. EDN КРКОUI.

Original article

Distribution of Nutrients in the Bottom Waters of the East Siberian Sea and the Laptev Sea

A. A. Polukhin¹, Yu. S. Gurova², ✉

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ Gurova@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to identify the patterns of spatial variability in the concentrations of key nutrients (nitrites and nitrates, phosphates, and silicates) and the carbonate system parameters (pH and total alkalinity) in the bottom waters of the Laptev and East Siberian seas.

Methods and Results. The bottom layer of the Laptev and East Siberian seas were comprehensively studied based on the data obtained during the 69th cruise of R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in summer and autumn, 2017. Bottom water samples were collected at four sections: the Khatanga and Lena sections (Laptev Sea), and the Indigirka and Kolyma ones (East Siberian Sea). Sampling was done by the Neimisto corer permitting to collect water layer by layer from three horizons (0–15, 15–30, and 30–45 cm) above the seabed. Hydrochemical parameters were determined by standard methods. Total alkalinity was revealed to increase generally both with the distance growing from a station to the coast indicating the impact of river runoff (1.1–1.9 mM/L), and towards more remote shelf areas (2.2–2.5 mM/L). Slightly alkaline conditions (pH 7.8–8.1) remained in all the areas. The lowest oxygen saturation (56–73 %) was observed in the zones directly influenced by large rivers and in the areas with a limited water exchange. Maximum concentrations of phosphates (up to 1.43 μM) and silicates (up to 41.22 μM) at the coastal stations confirm the effect of river runoff. At that, abnormally high concentrations of these elements and their non-conservative vertical distribution in certain deep-sea areas may indicate additional input sources, such as the diagenetic processes and the impact of sub-water permafrost melting.

Conclusions. The obtained data highlight the key role of the bottom layer as a zone of active transformation of nutrients where the interaction of physical, chemical, and biological processes significantly influences the functioning of bottom ecosystems. The results are important for assessing the impact of climate changes on the Arctic shelf, especially in the context of submarine permafrost degradation and changes in the river runoff regimes.

Keywords: Arctic, East Siberian Sea, Laptev Sea, Arctic shelf, hydrochemistry, carbonate system, bottom waters, nutrients, bottom layer

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the themes of state assignments of Institute of Oceanology, RAS FMWE-2024-0021 “Structural and functional organization, biological productivity, and mechanisms of modern climatic and anthropogenic variability of marine and oceanic ecosystems; ecosystems of the Arctic Basin and the Seas of Russia in modern conditions, bio-resource potential of oceanic and marine ecosystems”, and FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0001 “Fundamental research of the processes determining substance and energy flows in the marine environment and at its boundaries, the state and evolution of physical and biogeochemical structure of marine systems in modern conditions”. The authors are grateful to Academician M. V. Flint for organizing the expeditions and providing the opportunity to obtain the data, to PhD (Biology) A. A. Udalov for assistance in collecting samples, as well as to the colleagues from the Biohydrochemistry Laboratory of IO, RAS for assistance in sample processing during the expedition.

Введение

Арктические экосистемы в последние годы подвергаются значительной трансформации, обусловленной прежде всего климатическими изменениями [1]. Исследованию биогеохимических процессов в водной толще посвящено большое количество работ [1–6], при этом гидрохимические особенности придонных и поровых вод изучаются гораздо реже и носят эпизодический характер [7–9]. Между тем анализ изменчивости таких параметров, как концентрации основных биогенных веществ (нитриты, нитраты, фосфаты, силикаты) и общая щелочность, позволяет оценить влияние на придонную экосистему как внешних факторов, так и процессов, происходящих внутри нее.

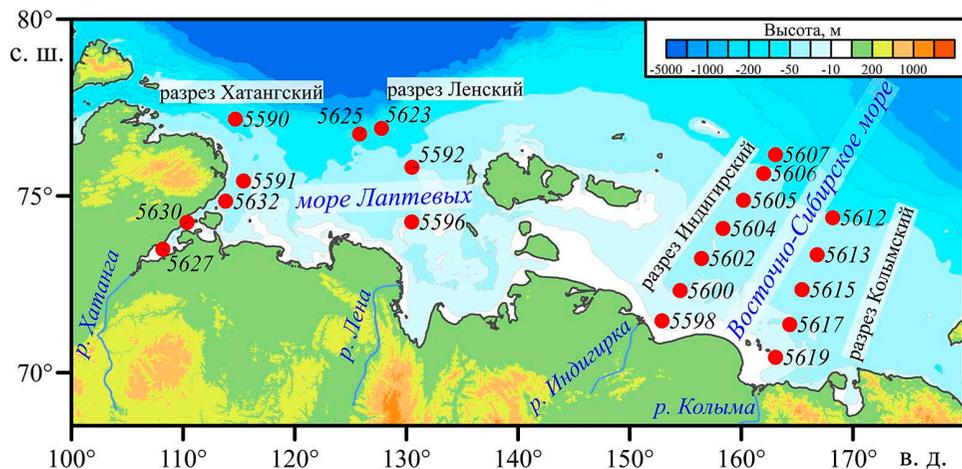
Придонный слой вод является ключевым для трансформации биогенных веществ, поступающих из водной толщи и донных отложений [10]. В этом слое формируются выраженные вертикальные градиенты концентраций, обусловленные взаимодействием физических, химических и биологических процессов [2]. Особое значение придонный слой имеет на шельфе моря Лаптевых, где сосредоточен сток рек Лены и Хатанги: он создает устойчивую стратификацию водной толщи, а также обуславливает активное поступление терригенного органического вещества (ОВ) и биогенных элементов [11, 12]. В таких условиях в придонном слое вод могут формироваться зоны с пониженным содержанием кислорода [13, 14]. Влияние речного стока на формирование придонных вод в Восточно-Сибирском море существенно слабее, чем в море Лаптевых, что определяет различия в их гидрохимических характеристиках. На долю моря Лаптевых приходится ~ 30 % всего материкового стока арктических морей России, тогда как Восточно-Сибирское море получает лишь ~ 10 % [15, 16]. Такой контраст определяет уникальные особенности распределения биогенных элементов: в Восточно-Сибирском море формируется однородная придонная водная масса, а в море Лаптевых четко выражено влияние речной биогенной нагрузки. Глубоководные участки арктического шельфа, в отличие от мелководных, характеризуются более однородным распределением параметров в придонном слое вследствие ограниченного влияния речного стока и преобладания процессов вертикального перемешивания [17]. Однако даже здесь придонный слой вод служит своеобразным буфером, регулирующим обмен между донными отложениями и водной толщей [14].

Цель данной работы – выявить закономерности пространственной изменчивости концентраций основных биогенных веществ (нитриты, нитраты, фосфаты, силикаты) и параметров карбонатной системы (рН, общая щелочность) в придонном слое вод морей Лаптевых и Восточно-Сибирского.

Материалы и методы

В работе использованы данные, полученные в ходе комплексной экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш» в сентябре 2017 г. В море Лаптевых было выполнено два разреза: Хатангский (от Хатангского залива к континентальному склону – ст. 5627, 5630, 5632) и Ленский (в зоне влияния

речного стока р. Лены – ст. 5596, 5592 – и расположения сипов на континентальном склоне – ст. 5623). В Восточно-Сибирском море также выполнено два широтных разреза от приустьевых районов рек Индигирки и Колымы к континентальному склону: Индигирский (ст. 5598, 5600, 5602, 5604, 5605, 5606, 5607) и Колымский (ст. 5612, 5613, 5615, 5617, 5619) (рис. 1, таблица).



Р и с. 1. Схема станций отбора проб (красные кружки). Координаты станций см. в таблице
F i g. 1. Scheme of sampling stations (red circles). See the table for station coordinates

Координаты станций на четырех разрезах
Coordinates of the stations at four sections

Море / Sea	Разрез / Section	Период / Period	Номер станции / Station number	Широта, °с. ш. / Latitude, N	Долгота, °в. д. / Longitude, E
Лаптевых / Laptev	Хатангский / Khatanga	17–18 сентября / September 17–18	5627	73,494	108,181
			5630	74,254	110,340
			5632	74,847	113,809
			5590	77,174	114,675
			5591	75,424	115,409
	Ленский / Lensky	2–16 сентября / September 2–16	5592	75,808	130,489
			5596	74,263	130,475
			5623	76,908	127,761
			5598	71,467	152,890
Восточно-Сибирское / East Siberian	Индигирский / Indigirsky	5–7 сентября / September 5–7	5600	72,320	154,513
			5602	73,234	156,430
			5604	74,080	158,348
			5605	74,873	160,183
			5606	75,636	161,996
			5607	76,165	163,054
			Колымский / Kolyma	8–9 сентября / September 8–9	5612
	5613	73,337			166,788
	5615	72,347			165,440
	5617	71,362			164,341
	5619	70,434			163,069

Пробы придонной воды отбирали с помощью трубки Неймисто. После поднятия на борт и отстаивания воды в трубке сначала с помощью тонкого силиконового шланга отбирали воду из слоя 0–15 см над наилком, затем из слоя 15–30 см и, наконец, из слоя 30–45 см. Таким образом, наддонную воду получали послойно с трех горизонтов непосредственно над дном. Этот способ обеспечивает точность отбора проб, недостижимую при использовании стандартного батометра.

Содержание фосфатов (PO_4^{3-}), силикатов (SiO_3^{2-}), нитритов (NO_2^-) и нитратов (NO_3^-), а также параметры карбонатной системы (водородный показатель pH по шкале *NBS* и общая щелочность *Alk*) определяли стандартными методами, разработанными для морских гидрохимических исследований [18, 19], оптическую плотность проб после окрашивания – на спектрофотометре *Lange Hach 2800* (Германия). Концентрацию растворенного кислорода определяли по методу Винклера; пробы отбирали в специальные склянки уменьшенного объема (30 мл), добавляли по 0,5 мл хлористого марганца и йодисто-щелочного раствора ($\text{KI} + \text{KOH}$) для фиксации. Титрование проводили по стандартной методике на полуавтоматической бюретке «Аквилон» с использованием 0,02 N раствора тиосульфата натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$). Насыщение кислородом рассчитывали по формуле Вейсса. Пересчет pH на значения *in-situ* проводился в программе *CO2Sys* [20].

Пробы для определения биогенных элементов предварительно фильтровали через мембранные фильтры *Millex-HV* (*Merck Millipore*, Германия) с диаметром пор 0,45 мкм.

Результаты и обсуждение

Разрез Хатангский в море Лаптевых

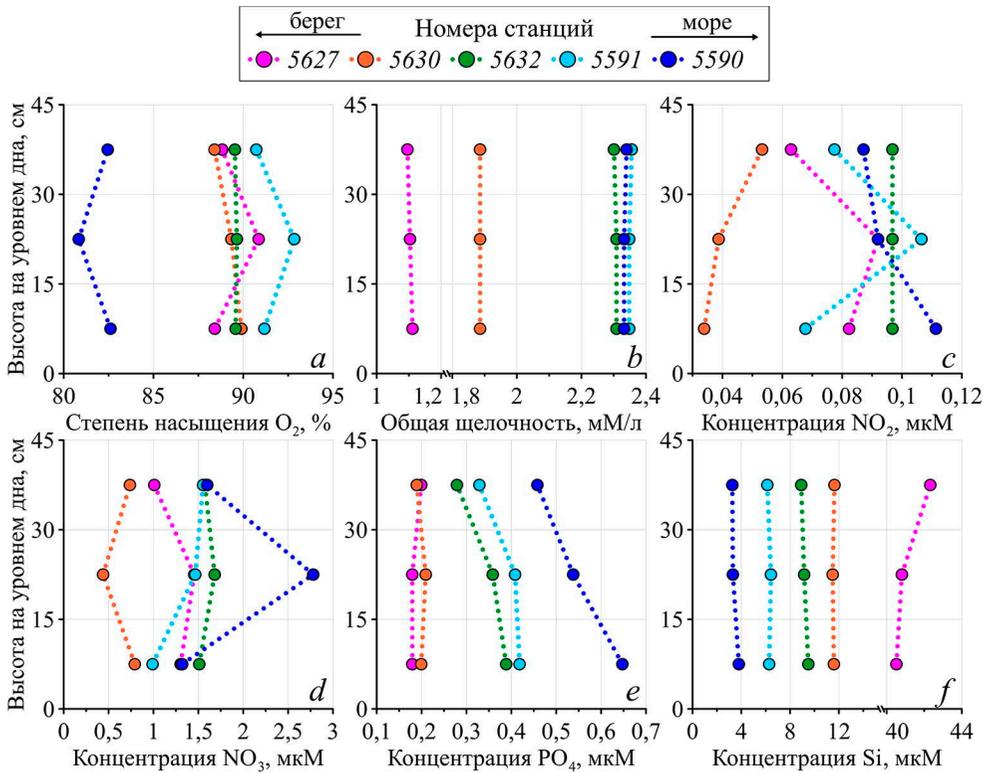
Исследования проводились на разрезе в акватории Хатангского залива моря Лаптевых. Протяженность разреза составила 617 км – от мористой части устья р. Хатанги и Хатангского залива в сторону континентального склона.

В придонном слое вод (0–45 см над поверхностью донных отложений) значения общей щелочности возрастали по мере удаления станций от устьевой зоны реки – от 1,1 мМ/л (рис. 2, *c*) на ст. 5627 до 2,3 мМ/л на ст. 5632 (рис. 2, *b*). На всех станциях отмечены слабощелочные условия (значения pH варьировали в диапазоне 7,87–8,02), что характерно для зоны активного взаимодействия водной толщи с донными отложениями.

Содержание NO_2 на всех станциях и горизонтах изменялось незначительно и не превышало 0,11 мкМ (рис. 2, *c*). Минимальные средние значения концентрации NO_3 (рис. 2, *d*) в придонном слое для разреза Хатангского отмечены на ст. 5630 (0,6 мкМ в среднем), что вероятно, может быть следствием смешения пресных и морских вод.

Содержание PO_4 в слое 30–45 см в среднем растет в приустьевой зоне от 0,19 мкМ на ст. 5627 до 0,55 мкМ на ст. 5590 (рис. 2, *e*), что, по-видимому, связано с трансформацией речных и морских вод в пределах маргинального фильтра. На мористой станции (ст. 5590) отмечены также аномальные для разреза гидрологические характеристики (температура воды $-1,6$ °C, соленость 33,8 ЕПС), что может указывать на дополнительное поступление PO_4 с водами

из Карского моря или тальми водами с севера. В мористой части разреза (ст. 5590) концентрации убывают. Аналогичный характер распределения отмечен для общей щелочности, концентраций нитритов и нитратов.



Р и с. 2. Распределение гидрохимических параметров: степени насыщения вод кислородом (*a*); общей щелочности (*b*); а также концентрации биогенных веществ: NO_2 (*c*); NO_3 (*d*); PO_4 (*e*); Si (*f*) в придонных водах на разрезе Хатангском

F i g. 2. Distribution of hydrochemical parameters: oxygen saturation (*a*); total alkalinity (*b*); and concentration of nutrients: NO_2 (*c*); NO_3 (*d*); PO_4 (*e*); Si (*f*) in the bottom waters at the Khatanga section

Исключение составляет распределение концентрации силикатов (рис. 2, *f*), максимальное значение которой зафиксировано на ст. 5627 (41,22 мкМ), затем по мере удаления в мористом направлении их концентрация резко убывает, варьируя в диапазоне 3,5–11,6 мкМ на остальных станциях, что указывает на значительное влияние речного стока.

Придонный слой вод был насыщен кислородом, степень насыщения изменялась незначительно – в диапазоне 89,2–91,6 % (рис. 2, *a*), что в целом согласуется с полученными концентрациями биогенных веществ. Минимальные значения, отмеченные на ст. 5590, расположенной в северной части разреза, обусловлены увеличением глубины станции (62 м), а также, возможно, разложением ОВ в донных отложениях. Это предположение подтверждается повышенными значениями концентрации NO_3 (1,3–2,8 мкМ) на этой станции.

Разрез Ленский в море Лаптевых

Исследования проводились в центральной части шельфа моря Лаптевых от континентального склона к дельте р. Лены. Протяженность разреза составила 246 км.

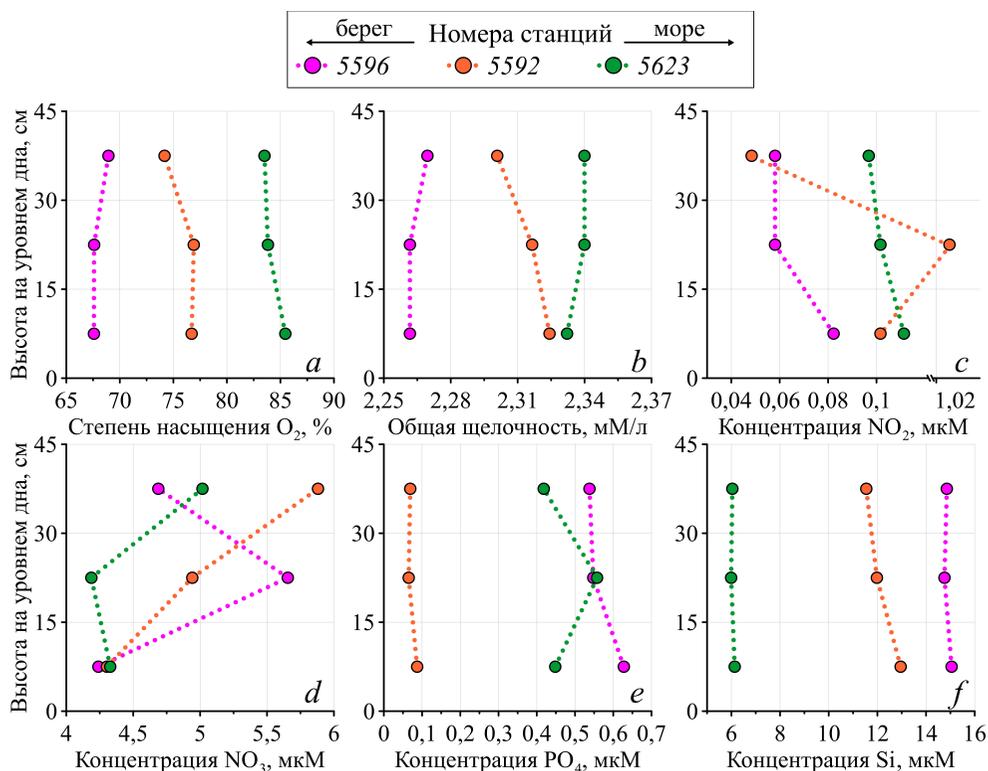


Рис. 3. Распределение гидрохимических параметров: степени насыщения вод кислородом (a); общей щелочности (b); а также концентрации биогенных веществ: NO₂ (c); NO₃ (d); PO₄ (e); Si (f) в придонных водах на разрезе Ленском

F i g. 3. Distribution of hydrochemical parameters: oxygen saturation (a); total alkalinity (b); and concentration of nutrients: NO₂ (c); NO₃ (d); PO₄ (e); Si (f) in the bottom waters at the Lensky section

Распределение общей щелочности на разрезе было однородным (рис. 3, b), ее значения в среднем составили 2,3 мм/л, что может указывать на равновесие кислотно-основных процессов на границе вода – дно, характерное для шельфовых зон. Водородный показатель (pH) вод на разрезе изменялся от 7,95 до 8,09, что соответствует слабощелочным условиям. Насыщение вод кислородом было неравномерным (рис. 3, a). На ст. 5596, расположенной ближе к дельте реки, оно составило в среднем 68 %, что указывает на активный процесс разложения ОВ. По мере удаления станций от берега воды становились более насыщенными кислородом – до 86 % на ст. 5623. Этот рост насыщения можно объяснить ослаблением влияния речного стока, поставляющего ОВ на шельф и усилением влияния морских вод. Данный вывод подтверждается снижением температуры воды (от +1,2 до –1,8 °С) и ростом солёности (от 32,2 до 34,1 ‰).

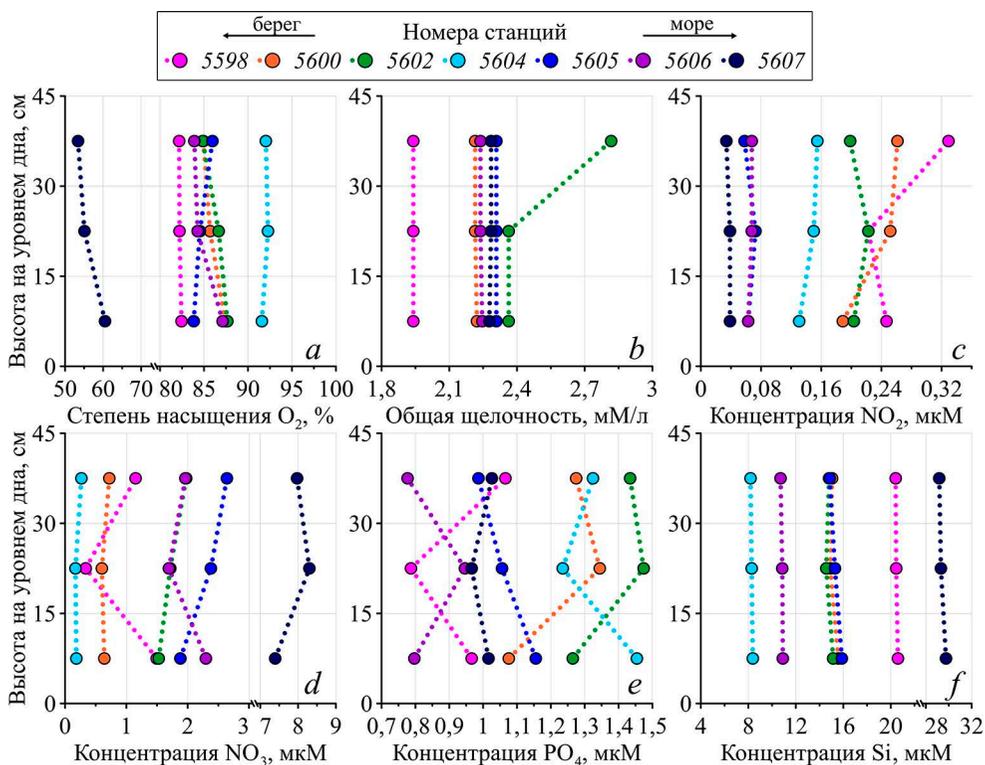
Максимальная концентрация NO_2 отмечена на ст. 5592 (1 мкМ) (рис. 3, *c*), что, вероятно, может указывать на протекание неполной денитрификации в условиях дефицита кислорода (76 %). Распределение NO_3 было относительно равномерным (в среднем 4,8 мкМ), за исключением незначительного снижения в районе сипов (в среднем 4,5 мкМ/л) (рис. 3, *d*). Максимальные концентрации фосфатов и силикатов, отмеченные на ст. 5596 (0,57 мкМ и 14,9 мкМ соответственно), указывают на значительное влияние стока р. Лены в данном районе (рис. 3, *e, f*). По мере удаления от дельты концентрация силикатов постепенно снижается (до 6,1 мкМ). Однако на станции вблизи дельты р. Лены их концентрации (ст. 5596) были ниже, чем на ст. 5627 (Хатанский разрез), что объясняется удаленностью ст. 5596 от устьевой области. Концентрации PO_4 сначала значительно убывают (от 0,6 до 0,1 мкМ), а затем возрастают в районе расположения сипов (0,5 мкМ на ст. 5623), что указывает на сипы как на возможный источник поступления PO_4 [21]. На ст. 5623 также отмечена инверсия в вертикальном распределении фосфатов: их концентрация возрастает от 0,4 мкМ (слой 30–45 см) до 0,6 мкМ (слой 15–30 см) и затем снижается до 0,41 мкМ (слой 0–15 см) (рис. 3, *e*). Стоит также отметить, что аналогичных изменений концентрации силикатов в районе расположения сипов не отмечалось.

Разрез Индигирский в Восточно-Сибирском море

Исследования проводились в Восточно-Сибирском море от устьевой области р. Индигирки в направлении к континентальному склону. Протяженность разреза составила 614 км.

Пониженное (относительно всего разреза) значение общей щелочности (1,94 мМ/л) было отмечено на южной станции разреза (ст. 5598) (рис. 4, *b*), что характерно для данного района и связано с влиянием материкового стока и пониженной соленостью воды (до 24,6 ЕПС). На остальных станциях разреза щелочность стабилизируется и изменяется в пределах 2,2–2,5 мМ/л при слабощелочных условиях ($\text{pH} = 7,8$).

Насыщение придонных вод кислородом возрастает от 82 % (ст. 5598) до 92 % (ст. 5604) (рис. 4, *a*), что может указывать на его расход при окислении O_2 в зоне влияния речного стока (ст. 5598, 5600, 5602). Развитие гипоксии (56 %) в северной части разреза (ст. 5607), вероятно, связано с возросшей глубиной станции отбора проб (58 м) и разложением O_2 в осадках на фоне слабого водообмена с Арктическим бассейном. Это подтверждается аномально высокой концентрацией нитратов (NO_3) на ст. 5607 (в среднем 7,9 мкМ), превышающей в несколько раз ее максимальные значения на расположенных рядом по разрезу ст. 5605 (2,3 мкМ) и 5606 (1,98 мкМ) и на порядок – на ст. 5600 (0,65 мкМ/л) и 5604 (0,21 мкМ) (рис. 4, *d*). В целом превышение концентраций нитратов в северной части разреза (ст. 5604, 5605, 5606, 5607) над значениями в южной части, подверженной влиянию речного стока, подтверждает гипотезу о том, что на момент проведения работ основным источником биогенных элементов в арктических морях является рециклинг, а не материковый сток, как показано в [22].



Р и с. 4. Распределение гидрохимических параметров: степени насыщения вод кислородом (a); общей щелочности (b); а также концентрации биогенных веществ: NO_2 (c); NO_3 (d); PO_4 (e); Si (f) в придонных водах на разрезе Индигирском

F i g. 4. Distribution of hydrochemical parameters: oxygen saturation (a); total alkalinity (b); and concentration of nutrients: NO_2 (c); NO_3 (d); PO_4 (e); Si (f) in the bottom waters at the Indigirsky section

Максимальные значения концентрации фосфатов (1,43 мкМ) отмечены на ст. 5602 и 5604 перед понижением рельефа дна, образующим ложбину глубиной около 10 м, минимальные значения (0,84 мкМ) – на ст. 5606 в зоне взаимодействия морских и материковых вод (рис. 4, e). Выделены три типа вертикального распределения фосфатов в придонном слое: консервативное (увеличение ко дну, ст. 5605), инверсия (максимум в промежуточном слое, ст. 5600, 5602 и 5606) и обратная инверсия (минимум в промежуточном слое 15–30 см над осадком, ст. 5598 и 5604). Амплитуда изменчивости концентрации фосфатов в наддонном 45-сантиметровом слое составляет при инверсии ~ 0,1 мкМ, а при обратной инверсии – 0,2 мкМ.

Распределение силикатов было также неравномерным: концентрации уменьшались от 20,5 мкМ (ст. 5598) до 8,28 мкМ (ст. 5604), что, как и общая щелочность, указывает на влияние материкового стока (рис. 4, f). Аномально высокие значения концентрации силикатов (29,4 мкМ в среднем) на ст. 5607, не характерные для данной глубины (58 м), могут быть связаны с их поступлением из тающей мерзлоты [23]. Концентрация нитритов (NO_2) плавно убывала по мере удаления станций от берега – от максимума на ст. 5598 (0,27 мкМ в среднем) к минимуму на ст. 5607 (0,04 мкМ в среднем) в зоне понижения

рельефа, что при максимальных концентрациях нитратов и минимальной степени насыщения кислородом вод (56%) может свидетельствовать о протекании второго этапа процесса нитрификации (рис. 4, с).

Разрез Колымский в Восточно-Сибирском море

Исследования на разрезе проводились в акватории Восточно-Сибирского моря от устьевой области р. Колымы к приглубой части шельфа. Протяженность разреза составила 538 км.

Общая щелочность на разрезе плавно увеличивалась от 1,9 мМ/л на ст. 5619 до 2,2 мМ/л на максимально удаленной от берега ст. 5612 (рис. 5, b), что объясняется уменьшением влияния речного стока.

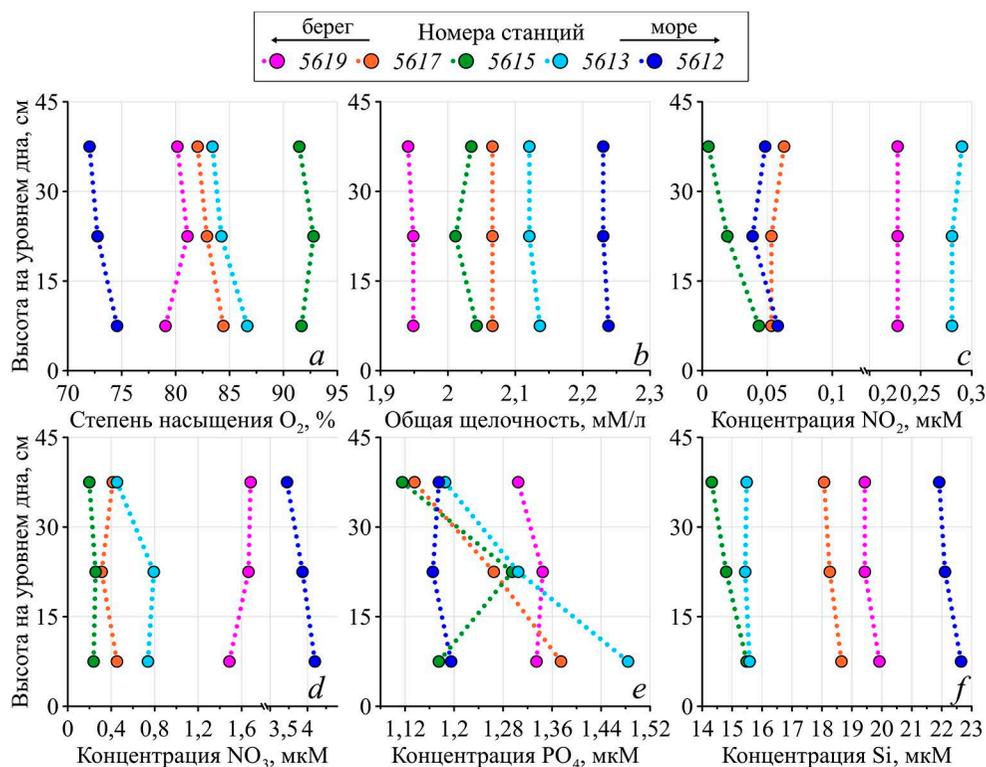


Рис. 5. Распределение гидрохимических параметров: степени насыщения вод кислородом (a); общей щелочности (b); а также концентрации биогенных веществ: NO₂ (c); NO₃ (d); PO₄ (e); Si (f) в придонных водах на разрезе Колымском

Fig. 5. Distribution of hydrochemical parameters: oxygen saturation (a); total alkalinity (b); and concentration of nutrients: NO₂ (c); NO₃ (d); PO₄ (e); Si (f) in the bottom waters at the Kolyma section

Насыщение придонных вод кислородом было неравномерным, максимальное его значение (92%) было отмечено на ст. 5615 (в середине разреза), вероятно, вследствие активного перемешивания (рис. 5, a). Минимальное значение насыщения (73%) на ст. 5612 соответствует максимальным концентрациям нитратов, указывая на процесс нитрификации. Повышенные значения нитратов (1,61 мкМ) и нитритов (0,3 мкМ) на ст. 5619 объясняются влиянием

материкового стока (рис. 5, *c, d*). Абсолютный максимум содержания нитритов был отмечен на ст. 5613 (0,29 мкМ). Распределение рН на разрезе коррелировало с распределением содержания растворенного кислорода и степени его насыщения, что связано с общностью определяющих факторов (температура вод и баланс продукционных и деструкционных процессов).

Достаточно однородное распределение концентраций фосфатов по разрезу (диапазон средних значений 1,2–1,3 мкМ) может указывать на активное перемешивание вод в данной части акватории (рис. 5, *e*). На ст. 5613 и 5617 наблюдается резкий вертикальный градиент фосфатов: в слое 30–45 см изменчивость составляет 0,3 мкМ, что может быть связано с орографией дна (динамичный склон шельфа и понижение рельефа соответственно). На ст. 5615 наблюдается инверсия концентрации фосфатов: значения увеличиваются от слоя 30–45 до слоя 15–30 см на 0,19 мкМ, затем снижаются на 0,17 мкМ в слое 0–15 см.

Содержание силикатов было высоким для глубин до 20 м (в среднем 17 мкМ), что подтверждает сильное воздействие материковых вод на исследуемую акваторию (рис. 5, *f*). Отмечена существенная пространственная изменчивость содержания силикатов в придонном слое: максимум (19,6 мкМ) на ст. 5619 возле берега в зоне поступления речных вод, минимум (14,9 мкМ) на ст. 5615 в центральной части разреза, а на самой мористой станции 5612 содержание вновь возрастает до аномально высокого значения 22,2 мкМ, что может указывать на влияние тающей подводной мерзлоты [23].

Заключение

В результате исследования на шельфе арктических морей Лаптевых и Восточно-Сибирского выявлены особенности пространственной и вертикальной изменчивости концентраций основных биогенных веществ (нитриты и нитраты, фосфаты, кремний), растворенного кислорода и параметров карбонатной системы (рН, общая щелочность) в придонном слое вод. Послойный отбор проб с помощью трубки Неймисто позволил получить вертикальные профили исследуемых компонентов в слое 0–45 см над ненарушенным осадком. Выявлены пространственные закономерности, отражающие влияние речного стока на придонный слой. Анализ данных по четырем разрезам (Хатангскому, Ленскому, Индигирскому и Колымскому) показал, что общая щелочность имеет тенденцию к увеличению от прибрежных станций вблизи устьевых зон рек (1,1–2,3 мМ/л) к удаленным участкам шельфа (2,2–2,3 мМ/л), что служит индикатором снижения влияния речного стока по мере удаления станций от берега. При этом минимальные значения щелочности в устьевой области р. Хатанги объясняются ограниченным водообменом между водами Хатангского залива и морем Лаптевых. Во всех исследованных районах сохранялись слабощелочные условия (рН 7,8–8,1), характерные для арктических шельфовых морей.

Установлено, что минимальные значения насыщения вод кислородом (56–68 %) отмечались в зонах прямого влияния крупных рек (Хатанга, Лена, Индигирка, Колыма). Это связано с интенсивным потреблением кислорода при

разложении органического вещества. На удаленных от устьевых областей арктических рек станциях насыщение кислородом достигало 85–92 %, отражая активное перемешивание водных масс.

Выявлена значительная неоднородность в пространственном распределении биогенных элементов не только в двух рассматриваемых акваториях морей, но и внутри этих акваторий. Максимальные концентрации фосфатов (до 1,43 мкМ) и кремния (до 41,22 мкМ) на прибрежных станциях подтверждают ведущую роль речного стока в поставке этих биогенных веществ, тогда как аномально высокие значения их концентрации на отдельных удаленных станциях могут указывать на дополнительные источники, такие как диагенетические процессы в осадках и влияние тающей подводной мерзлоты. Эти же процессы, скорее всего, влияют на неконсервативное вертикальное распределение фосфатов в небольшом по толщине придонном слое, где зафиксированы значительные вертикальные градиенты (0,1–0,3 мкМ в слое 1 см или до 25 % от абсолютных величин). Распределение нитратов и нитритов в придонном слое вод (в частности, минимальные значения нитратов в центральных частях разрезов и локальные максимумы нитритов) указывает на активное протекание процессов нитрификации и денитрификации, интенсивность которых может определяться особенностями рельефа дна и динамики вод.

Полученные результаты подчеркивают ключевую роль придонного слоя как зоны активной трансформации биогенных элементов, где взаимодействие физических, химических и биологических процессов может оказывать существенное влияние на состояние и развитие донных экосистем арктического шельфа. Дальнейшие исследования необходимы для понимания функционирования арктических экосистем в условиях климатических изменений, особенно в контексте прогнозирования последствий деградации подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря и изменения режима речного стока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The polar regions in a 2 °C warmer world / E. Post [et al.] // *Science Advances*. 2019. Vol. 5, iss. 2. eaaw9883. EDN LJMYUJ. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9883>
2. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice / N. Shakhova [et al.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. Vol. 373, iss. 2052. 20140451. EDN UZYQRR. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0451>
3. *Gordeev V. V.* River input of water, sediment, major ions, nutrients and trace metals from Russian territory to the Arctic Ocean // *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean* / E. L. Lewis, E. P. Jones, P. Lemke, T. D. Prowse, P. Wadhams (eds.). Dordrecht : Springer, 2000. P. 297–322. (NATO Science Partnership Subseries ; 2). https://doi.org/10.1007/978-94-011-4132-1_14
4. *Vetrov A. A., Romankevich E. A.* Carbon Cycle in the Russian Arctic Seas. Heidelberg : Springer, 2004. 334 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06208-1>
5. Microbial processes of the carbon and sulfur cycles in the Chukchi Sea / A. S. Savvichev [et al.] // *Microbiology*. 2007. Vol. 76. P. 603–613. <https://doi.org/10.1134/S0026261707050141>
6. *Костылева А. В., Полухин А. А., Степанова С. В.* Особенности гидрохимической структуры зоны смешения вод реки Лены и моря Лаптевых в осенний период // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 6. С. 843–850. EDN JVPOIT.

7. *Синицына В. В., Борисенко Г. В., Полухин А. А.* Распределение биогенных элементов на границе вода – дно в поровых и наддонных водах Карского моря и моря Лаптевых // *Океанологические исследования*. 2024. Т. 52, № 1. С. 121–141. EDN XRNVIQ. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).6)
8. *Rusakov V. Y., Borisov A. P.* Sedimentation on the Siberian Arctic Shelf as an indicator of the arctic hydrological cycle // *Anthropocene*. 2023. Vol. 41. 100370. EDN IRMGVR. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2023.100370>
9. The Impact of Methane Seepage on the Pore-Water Geochemistry across the East Siberian Arctic Shelf / N. Guseva [et al.] // *Water*. 2021. Vol. 13, iss. 4. 397. EDN BPHYOM. <https://doi.org/10.3390/w13040397>
10. *Aller R. C.* Sedimentary diagenesis, depositional environments, and benthic fluxes // *The Oceans and Marine Geochemistry*. Elsevier, 2014. P. 293–334. (Treatise on Geochemistry ; vol. 8). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00611-2>
11. East Siberian Sea, an Arctic region of very high biogeochemical activity / L. G. Anderson [et al.] // *Biogeosciences*. 2011. Vol. 8, iss. 6. P. 1745–1754. EDN OHQBVP. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1745-2011>
12. A reassessment of the Eurasian River input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean / V. V. Gordeev [et al.] // *American Journal of Science*. 1996. Vol. 296, iss. 6. P. 664–691. EDN LDOREP. <https://doi.org/10.2475/ajs.296.6.664>
13. Coastal dynamics and submarine permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia / P. Overduin [et al.] // *The Cryosphere*. 2016. Vol. 10, iss. 4. P. 1449–1462. EDN WTPWVP. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1449-2016>
14. Biogeochemical structure of the Laptev Sea in 2015–2020 associated with the River Lena plume / L. Xie [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2023. Vol. 10. 1180054. EDN XHMBGW. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1180054>
15. Freshwater and its role in the Arctic Marine System: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans / E. C. Carmack [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2016. Vol. 121, iss. 3. P. 675–717. EDN WRTFND. <https://doi.org/10.1002/2015JG003140>
16. *Spivak E. A., Osadchiv A. A., Semiletov I. P.* Structure and variability of the Lena river plume in the south-eastern part of the Laptev Sea // *Oceanology*. 2021. Vol. 61, iss. 6. P. 839–849. <https://doi.org/10.1134/S000143702106014X>
17. Shelf–basin interaction along the East Siberian Sea / L. G. Anderson [et al.] // *Ocean Science*. 2017. Vol. 13, iss. 2. P. 349–363. EDN PRNDVZ. <https://doi.org/10.5194/os-13-349-2017>
18. *Современные методы гидрохимических исследований океана / ред. О. К. Бордовский, В. Н. Иваненков.* Москва : ИОАН СССР, 1992. 199 с.
19. Гидрохимические особенности акватории Карского моря летом 2015 г. / П. Н. Маккавеев [и др.] // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 1. С. 57–66. EDN XSMVWN. <https://doi.org/10.7868/S0030157417010087>
20. *Lewis E. R., Wallace D. W. R.* Program developed for CO₂ system calculations. Oak Ridge, Tennessee, U. S. A. : Carbon Dioxide Information Analysis Center Oak Ridge National Laboratory, 1998. 42 p. (Environmental Sciences Division Publication ; no. 4735).
21. Глубинные расплавы крупных вулканов и вулканических провинций Западной Антарктиды: новые экспериментальные данные / В. Г. Бахмутов [и др.] // *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2020. No. 6. P. 46–53. EDN HJZZQO. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.06.046>
22. О механизмах деградации подводных многолетнемерзлых пород на Восточном Арктическом шельфе России / Л. И. Лобковский [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2013. Т. 449, № 2. С. 185–188. EDN PVXDRZ. <https://doi.org/10.7868/S0869565213080203>

23. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia / J. E. Vonk [et al.] // Nature. 2012. Vol. 489, № 7414. P. 137–140. <https://doi.org/10.1038/nature11392>

Об авторах:

Полухин Александр Анатольевич, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией биогидрохимии, ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ФГБУН ИО РАН) (117997, Москва, Нахимовский проспект, дом 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1708-1428**, **Scopus Author ID: 47561889400**, **ResearcherID: S-2879-2016**, **SPIN-код: 5383-5138**, aleanapol@gmail.com.

Гурова Юлия Сергеевна, научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9826-4789**, **Scopus Author ID: 57964475800**, **ResearcherID: AAB-5628-2019**, **SPIN-код: 9777-8929**, gurova@mhi-ras.ru