Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2025. Т. 4, № 2. С. 35–55.
Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities. 2025. Vol. 4, No. 2. P. 35–55.

Научная статья
УДК 574.583 (268.45)
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.004

АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ПЕЛАГИАЛИ

Елена Ивановна Дружкова, Игорь Васильевич Берченко,
Анастасия Владимировна Ващенко, Марина Павловна Венгер,
Вероника Владимировна Водопьянова, Владимир Геннадьевич Дворецкий,
Татьяна Геннадьевна Ишкулова, Виктор Витальевич Ларионов,
Павел Робертович Макаревич, Алексей Анатольевич Намятов,
Анатолий Анатольевич Олейник, Иван Александрович Пастухов,
Дмитрий Владимирович Широколобов, Татьяна Ивановна Широколобова
Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск, Россия
druzhkova@mmbi.info, berchenko@mmbi.info, venger@mmbi.info, vodopyanova@mmbi.info,
vdvoretskiy@mmbi,info, ishkulova@mmbi.info, larionov@mmbi.info, makarevich@mmbi.info,
alexey.namyatov.a@gmail.com, oleinik@mmbi.info, pastuhovi@mmbi.info, shirokolobova@mmbi.info

Аннотация

В ходе проведенных исследований определено влияние климатических флуктуаций на структурно-продукционные характеристики пелагиали как с использованием многолетних рядов данных по содержанию хлорофилла *a in situ*, так и при выполнении прямого таксономического изучения пелагического фитоцена на локальных участках акватории Баренцева моря в период весенней активизации. Установлены сроки начала весеннего цветения фитопланктона, динамика его развития и структурной организации. Разработана методика использования изотопных соотношений $\delta^{18}O$ для оценки индивидуальных стехиометрических соотношений и первичной продукции акваторий. Получены новые сведения о весеннем пелагическом комплексе зоопланктона в районе арктического архипелага Новая Земля, проведены уникальные исследования бактерио- и вириопланктона в его ранее не изучавшихся прибрежных районах. Приведены сезонные гидрохимические показатели водных масс Кольского залива.

Ключевые слова:

Баренцево море, прикромочная зона, изотопные трассеры, хлорофилл *a*, вириопланктон, бактериопланктон, фитопланктон, зоопланктон

Original article

ACTUAL ASPECTS OF THE ARCTIC PELAGIC ZONE INVESTIGATIONS

Elena I. Druzhkova, Igor V. Berchenko, Anastasya V. Vashchenko, Marina P. Venger,
Veronica V. Vodopianova, Vladimir G. Dvoretsky, Tatyana G. Ishkulova, Victor V. Larionov,
Pavel R. Makarevich, Alexey A. Namyatov, Anatoliy A. Oleinik, Ivan A. Pastuhov,
Dmitry V. Shirokolobov, Tatyana I. Shirokolobova
Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
druzhkova@mmbi.info, berchenko@mmbi.info, venger@mmbi.info, vodopyanova@mmbi.info,
vdvoretskiy@mmbi.info, ishkulova@mmbi.info, larionov@mmbi.info, makarevich@mmbi.info,
alexey.namyatov.a@gmail.com, oleinik@mmbi.info, pastuhovi@mmbi.info, shirokolobova@mmbi.info

Abstract

In the course of conducted studies the influence of climatic fluctuations on the structural and production characteristics of the pelagic zone was determined using both long-term data series on the chl-*a* content in situ and direct taxonomic study of the pelagic phytocenosis in local areas of the Barents Sea during spring activation. The timing of the onset, dynamics of development and structural organization of spring phytoplankton bloom were determined. A technique was developed for using $\delta^{18}O$ isotope ratios to assess individual stoichiometric ratios and primary production of water areas. New information was obtained on the spring pelagic complex of zooplankton in the areas of the Arctic archipelago of Novaya Zemlya. The first unique studies of bacterio- and virioplankton were conducted in previously unstudied coastal areas of the Novaya Zemlya archipelago. Seasonal hydrochemical parameters of the water masses of the Kola Bay are given.

Keywords:

Barents Sea, MIZ, isotopic tracers, chlorofill *a*, virioplankton, bacterioplankton, phytoplankton, zooplankton

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

Введение

В настоящее время основной целью научной деятельности лаборатории планктона является оценка влияния биотических и абиотических факторов на структуру и функционирование планктонной биоты. Продолжается накопление знаний в областях с дефицитом информации на временной либо пространственной шкалах – изучение всех компонентов пелагиали в гидрологически активных районах с потенциально высоким продукционным потенциалом.

Происходящие климатические изменения в Арктике оказывают значительное влияние на морские экосистемы (The changing …, 2008; The role …, 2013; Comiso, Hall, 2014). Они затрагивают различные трофические уровни и изменяют биоразнообразие, структуру и продуктивность сообществ (IPCC …, 2019; Phytoplankton …, 2021). В последнее время регистрируется увеличение объема и повышение температуры атлантических вод, поступающих в Баренцево море, и связанное с этим сокращение площади морского льда и увеличение периода открытой воды (Comiso, 2012; Quantifying …, 2012; Boitsov et al, 2012; Role …, 2017).

Область дрейфующих льдов – уникальный биотоп, где неразрывно связаны два компонента первичных продуцентов – пелагическая и ледовая флора (Биологические …. 2012; Role …, 2017; Makarevich et al., 2022), являющиеся основой создания органического вещества Баренцева моря (Microphytoplankton …, 2018; The advective …, 2018). Исследования проводились как с использованием длительных рядов многолетних данных – для выявления влияния климатических флуктуаций на структурно-продукционные характеристики пелагиали по содержанию хлорофилла *a in situ*, так и на локальных участках акватории в период весенней активизации пелагического фитоцена, уровень которой определяет все дальнейшее развитие экосистемы арктических морей в течение года. В северной части Баренцева моря начало этого процесса традиционно связывают с прикромочной ледовой зоной, в юго-восточной части – с районами мелководий и струями основных атлантических течений. Однако до настоящего времени нет единого мнения о сроках и условиях начала весенней активизации пелагического альгоценоза.

Применение новых методических подходов, в частности, комбинации изотопных параметров, солености и биогенных элементов, позволяет рассмотреть гидрологические, гидрохимические и гидробиологические процессы в пелагиали в единой системе их взаимосвязи, проанализировать состав водных масс, выделить наиболее продуктивные районы. Необходимо отметить, что изотопное отношение $\delta^{18}O$ широко применяется в современной океанографии для анализа взаимодействий вод различного происхождения. Нами предложено использовать изотопные соотношения для оценки индивидуальных стехиометрических соотношений и первичной продукции. Определение начальных концентраций биогенных компонентов, необходимых для оценки уровня биологической продуктивности, связано с некоторыми трудностями. Разрешение этой проблемы – одна из основных целей исследований.

Ключевым компонентом морских экосистем, который связывает между собой первичных продуцентов с более высокими трофическими уровнями, является зоопланктон, который выступает в качестве основного кормового объекта для рыб, определяя общую продуктивность водоема. Зоопланктонные сообщества могут рассматриваться как индикаторы состояния морских экосистем, которое во многом отражает их динамику в условиях современных климатических вариаций и усиливающегося антропогенного пресса (Тимофеев, 2000; Ecosystem …, 2009; Дворецкий, Дворецкий, 2015).

Несмотря на исследования летнего зоопланктона в восточной части Баренцева моря, сведения о весеннем пелагическом комплексе в литературе отсутствуют.

Учитывая, что реакцию сообществ арктического планктона на океаническое потепление можно выявлять лишь при наличии всех сезонных данных, было выполнено исследование по изучению структуры мезозоопланктона вблизи архипелага Новая Земля в период весеннего цветения фитопланктона.

В Арктике важнейшим и часто доминирующим представителем планктонных пищевых сетей являются прокариоты, играющие ключевую роль в биогеохимических циклах (The ecological …, 1982;

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

Fenchel, 2008). При этом наименее изученным компонентом полярных экосистем до настоящего времени остаются вирусы, активно регулирующие продукцию как прокариотных, так и эукариотных микроорганизмов в пелагиали. В этой связи были проведены уникальные исследования в ранее недоступных прибрежных районах архипелага Новая Земля летом 2022 г.

Материал и методы

Данные для анализа хлорофилла *a* были получены в ходе 25 рейсов Мурманского морского биологического института РАН в Баренцевом море и сопредельных водах с 1984 по 2020 гг. (рис. 1).

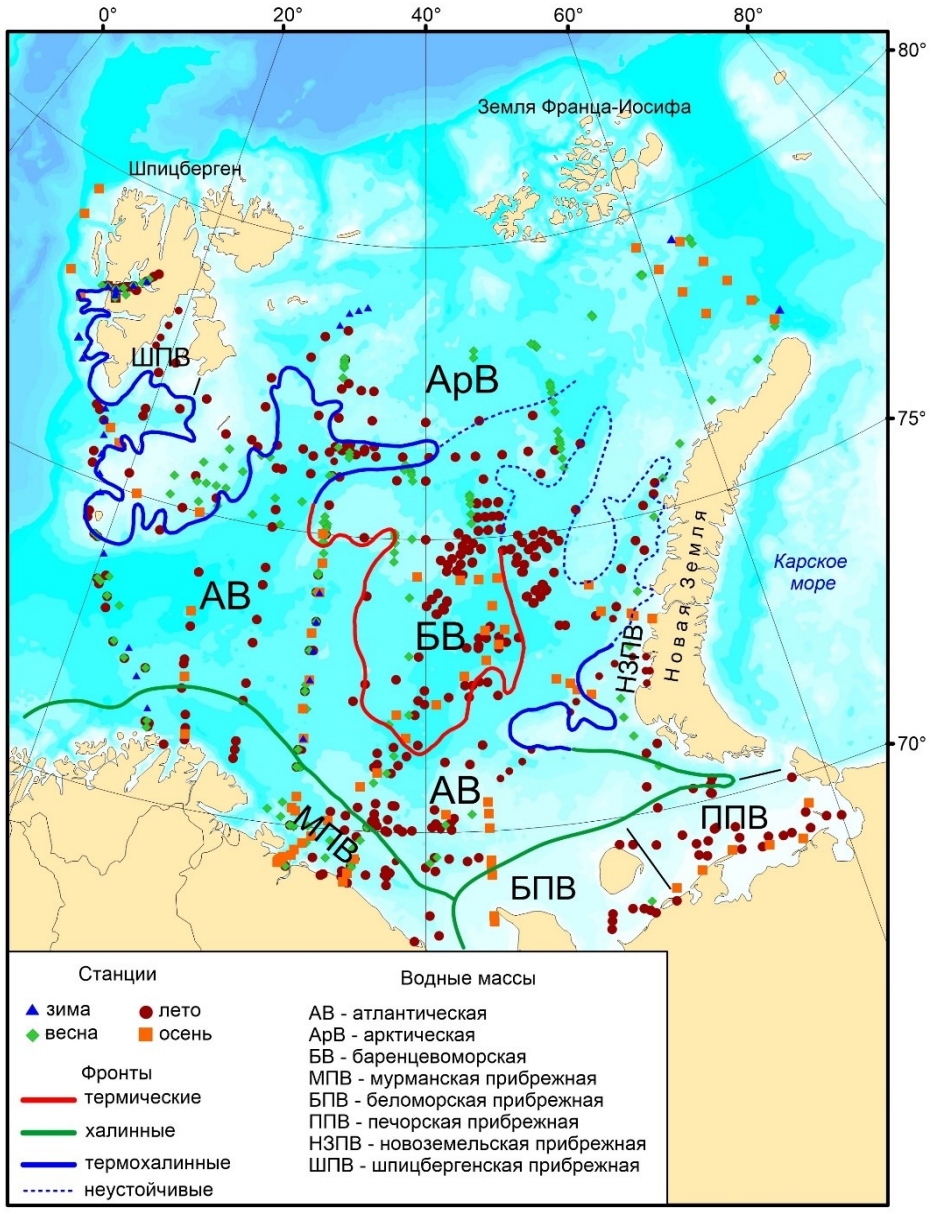

Рис. 1. Станции отбора проб для анализа хлорофилла *a* в Баренцевом море в 1984–2020 гг. Среднее многолетнее положение фронтальных зон и водные массы Баренцева моря приведены по: Climate …, 2012
Fig. 1. Sampling stations for chlorophyll a analysis in the Barents Sea in 1984–2020, average long-term position of frontal zones and water masses of the Barents Sea (Climate …, 2012)

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

Анализ выполнен на основе 765 проб, отобранных батометром Нискина в поверхностном слое воды (до глубины 1 м). С 1984 по 1993 годы концентрацию хлорофилла *a* определяли методом флуориметрии (Strickland, Parsons, 1972), в 2006–2020 гг. – по стандартной методике (ГОСТ …, 2001). Распределение хлорофилла *a* рассматривалось в отношении основных водных масс, выделенных по гидрологическим критериям (Food …, 2006; Воды …, 2016). Использовались следующие предикторы сезонных и пространственных изменений хлорофилла *a*: 1) зимний (декабрь–февраль) индекс Североатлантического колебания (NAO); 2) индекс Арктического колебания (AO); 3) аномалии среднегодовой температуры и солености на разрезе «Кольский меридиан» (*dT*, *dS*); 4) площади ледового покрова Баренцева моря (SIE, годовая; SIE-a, апрель; SIE-s, сентябрь, тыс. км^2). Сравнение выборок по сезонам и водным массам проводилось с помощью однофакторного дисперсионного анализа или теста Краскела-Уоллиса (Zar, 1999). Множественные сравнения выполнены с использованием теста Тьюки-Крамера или теста *Z* Краскела-Уоллиса (Zar, 1999). Общие тенденции изменения концентрации хлорофилла *a* с учетом динамики климатических факторов выявлялись с помощью моделей, основанных на многофакторных регрессиях (Legendre, Legendre, 1998). Статистическая значимость независимых переменных (климатических предикторов) оценивалась на основе теста Вальда (Legendre, Legendre, 1998). Вклад климатических факторов в общую вариацию хлорофилла *a* определялся коэффициентом детерминации R^2. Статистическая обработка данных проводилась с помощью Statistica 10 (StatSoft Inc., США) и NCSS-PASS 2004 (NCSS Statistical Software, США).

Для выявления центров ранневесеннего цветения работы были проведены в ходе рейса НИС «Дальние Зеленцы» с 10 марта по 12 апреля 2021 г. и охватили обширную часть акватории Баренцева моря, свободную от льда. Выполнено 9 разрезов в широтном и меридиональном направлении, включавших 52 гидрологические и 34 комплексные станции. Пробы отбирали и анализировали с выполнением всех стандартных процедур.

В апреле 2019 г. материалом для исследования микроводорослей послужили планктонные сборы, выполненные на северо-востоке Баренцева моря в ходе экспедиционного рейса на НИС «Дальние Зеленцы». Для выделения водных масс и определения их границ были использованы метод градиентов и классический *TS*-анализ (Мамаев, 1987). В качестве критерия наличия фронтальной зоны на поверхности моря принималось значение горизонтальных градиентов температуры и солености, в 5 раз превышающее климатические градиенты для Баренцева моря: 0.01 °С/км и 0.001 ‰/км (Воды …, 2016). Обработка проб осуществлялась по стандартным гидробиологическим методикам.

Пробы зоопланктона получены во время экспедиций Мурманского морского биологического института РАН (ММБИ) на НИС «Дальние Зеленцы» в мае 2016 г. (прибрежные воды Новой Земли). Пробы отбирали от дна до поверхности с помощью сети Джеди, фиксировали формалином, последующую обработку и анализ полученного материала проводили в лаборатории по стандартным методикам. Все расчеты и статистический анализ выполнены с использованием программных пакетов Microsoft Excel 2003, NCSS-PASS 97 и Primer 5.0.

Материал о структурных характеристиках сообществ бактерио- и вириопланктона был получен в прибрежных районах архипелага Новая Земля летом 2022 г. Подсчет вирусных частиц и бактериальных клеток осуществляли стандартным методом эпифлуоресцентной микроскопии.

В 2024 году сотрудниками Мурманского морского биологического института проведен мониторинг экосистемы Кольского залива. Гидрохимические исследования осуществлялись на 8 станциях (табл. 1) и включали определение биогенных элементов: азота нитритного, азота нитратного, фосфора фосфатного и кремния силикатов. Для анализа были использованы стандартные гидрохимические методы: фосфаты определяли методом Морфи-Райли, нитриты и нитраты – методом Берндшнайдера-Робинсона, силикаты – методом Королева (Справочник …, 1991).

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

Таблица 1

Координаты гидрохимических станций в Кольском заливе в 2024 г.

Table 1

Coordinates of hydrochtmical stations in the Kola Bay in 2024

Район	Станция	Координаты	
		в. д.	с. ш.
Южное колено	1 – Абрам-мыс	33°01'16"	68°58'18"
	2 – мыс Еловый	32°58'04"	68°53'40"
	3 – мыс Крестовый	33°03'54"	68°52'53"
Среднее колено	4 – мыс Белокаменный	33°09'53"	69°05'11"
	5 – мыс Ретинский	33°16'24"	69°05'56"
	6 – губа Грязная	33°19'39"	69°03'41"
	7 – губа Хлебная	33°24'35"	69°04'02"
	8 – губа Ваенга	33°27'08"	69°04'59"
Северное колено	9 – мыс Тоня	33°25'45"	69°11'21"

Результаты и обсуждение

Методика оценки индивидуальных стехиометрических соотношений и первичной продукции с использованием изотопного параметра $\delta^{18}O$ основана на оценке потребления биогенных элементов. Основная проблема при использовании данной методики – определение точки отсчета концентраций биогенных элементов, от которой рассчитывается биологическая продуктивность. Трассерами определения этой точки отсчета являются величины солености и изотопного параметра $\delta^{18}O$. Подробно методика расчета первичной продукции по потреблению биогенных элементов представлена в работах (Parameter..., 2023; Hydrochemical…, 2023). В Баренцевом море морская вода состоит из трех составляющих: атлантических, речных и ледовых вод. Относительные объемы этих базовых вод рассчитываются с использованием простого уравнения смешения:

$$C_{con} = f_a C_a + f_r C_r + f_i C_i,$$
$$f_a + f_r + f_i = 1,$$

где C_a – средняя концентрация исследуемого элемента в «чисто» атлантических водах; f_a – относительный объем «чисто» атлантических вод в результирующей водной массе, %; C_r – средняя концентрация исследуемого элемента в «чистых» речных водах; f_r – относительный объем «чистой» речной воды, %; C_i – средняя концентрация исследуемого элемента в «ледовых» водах; f_i – объем образовавшегося или растаявшего морского льда, приведенный к плотности воды или объему талой воды, %, «ледовые» воды.

С помощью полученных объемов базовых вод и измеренных концентраций биогенных элементов определяется «консервативная» концентрация конкретного биогенного элемента (например, фосфатного фосфора), которая зависит только от смешения различных вод без учета фотосинтетической или геохимической активности. Разница между этой и полученной концентрацией в конкретной пробе воды будет представлять собой «неконсервативную» концентрацию. Последняя состоит из «продуктивной» (изменения концентрации в результате процесса фотосинтеза или минерализации органического вещества) и «непродуктивной» компоненты (изменения концентрации в результате обмена с нижележащими слоями в результате вертикального перемешивания «непродуктивной» составляющей), а также притока в результате адвекции. Для перехода от величины потребления биогенных веществ к первичной продукции используются усредненные стехиометрические соотношения Редфилда-Ричардса для каждой систематической группы фитопланктона. Их относительный вклад в первичную продукцию есть измеренное (реальное) стехиометрическое отношение углерода к одному из биогенных элементов при использовании

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

значения относительного химического состава фитопланктона. Зная количество углерода, можно рассчитать первичную продукцию. Таким образом, применение предложенной методики позволяет рассматривать результаты гидрохимических исследований не как отдельный блок, а как комплекс гидрологических, гидрохимических и гидробиологических взаимодействий не на качественном, а на количественном уровне, а также оценить вклад в первичную продукцию всех компонентов баланса биогенных элементов и перейти к изучению климатической изменчивости потребления биогенных элементов и продуктивности исследуемой акватории.

Первичные продуценты. В ходе изучения распределения хлорофилла *a* в различных водных массах и влияния климатических факторов на его динамику были выявлены существенные сезонные и пространственные вариации содержания хлорофилла *a* в поверхностном слое (табл. 2). Локализация центров с повышенными концентрациями фитопигментов в разные сезоны года различна.

Таблица 2

Концентрации хлорофилла *a* в поверхностных водных массах Баренцева моря и сопредельных вод в 1984–2020 гг., мг/м^3

Table 2

Concentrations of chlorophyll *a* in surface water masses Barents Sea and adjacent waters in 1984-2020, mg/m^3

Водная масса	Зима	Весна	Лето	Осень
Арктическая	0.10–0.22	0.28–5.61	0.05–1.51	0.18–0.36
	0.16±0.06	1.54±1.50	0.30±0.37	0.25±0.07
Атлантическая	0.05–0.21	0.13–4.59	0.03–4.99	0.12–1.22
	0.14±0.06	0.74±0.94	0.98±0.78	0.51±0.37
Баренцевоморская	–	0.13–2.58	0.03–12.36	0.08–0.91
		0.44±0.58	0.57±1.09	0.42±0.24
Мурманская прибрежная	0.13–0.21	0.01–1.91	0.14–2.78	0.11–1.65
	0.17±0.06	0.46±0.38	0.76±0.48	0.66±0.41
Новоземельская прибрежная	–	1.12–3.18	0.09–3.06	0.32–0.57
		2.06±1.04	0.65±0.77	0.44±0.09
Печорская прибрежная	–	–	0.14–0.96	0.60–1.48
			0.41±0.23	0.95±0.37
Шпицбергенская прибрежная	0.23–0.28	1.12–8.25	0.15–2.99	0.11–0.18
	0.26±0.02	3.77±2.51	0.84±0.61	0.15±0.03
Беломорская прибрежная	–	–	0.28–1.57	0.45–1.19
			0.81±0.36	0.98±0.27

ПРИМЕЧАНИЕ. Числитель – минимальное и максимальное значения, знаменатель – среднее значение ± стандартное отклонение.

Чтобы проследить сезонную динамику развития фитопланктона на акватории моря, были построены карты аномалий внутригодового хода концентраций хлорофилла *a* (рис. 2). Летние аномалии рассчитывались по отношению к базовому периоду март–август (рис. 2А), осенние – июнь–ноябрь (рис. 2Б). Таким образом, отрицательные аномалии будут наблюдаться в районах, где концентрация хлорофилла *a* летом меньше, чем весной, и осенью меньше, чем летом. В районах, для которых характерно увеличение концентрации от весны к лету и от лета к осени, аномалии будут положительными.

Для арктической водной массы было характерно достижение максимальных концентраций хлорофилла *a* весной и последующее их уменьшение летом и осенью. В атлантической водной массе наиболее продуктивным был летний период. Области увеличения концентрации хлорофилла *a* в общих чертах соответствуют области распространения атлантических водных масс (рис. 2А).

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

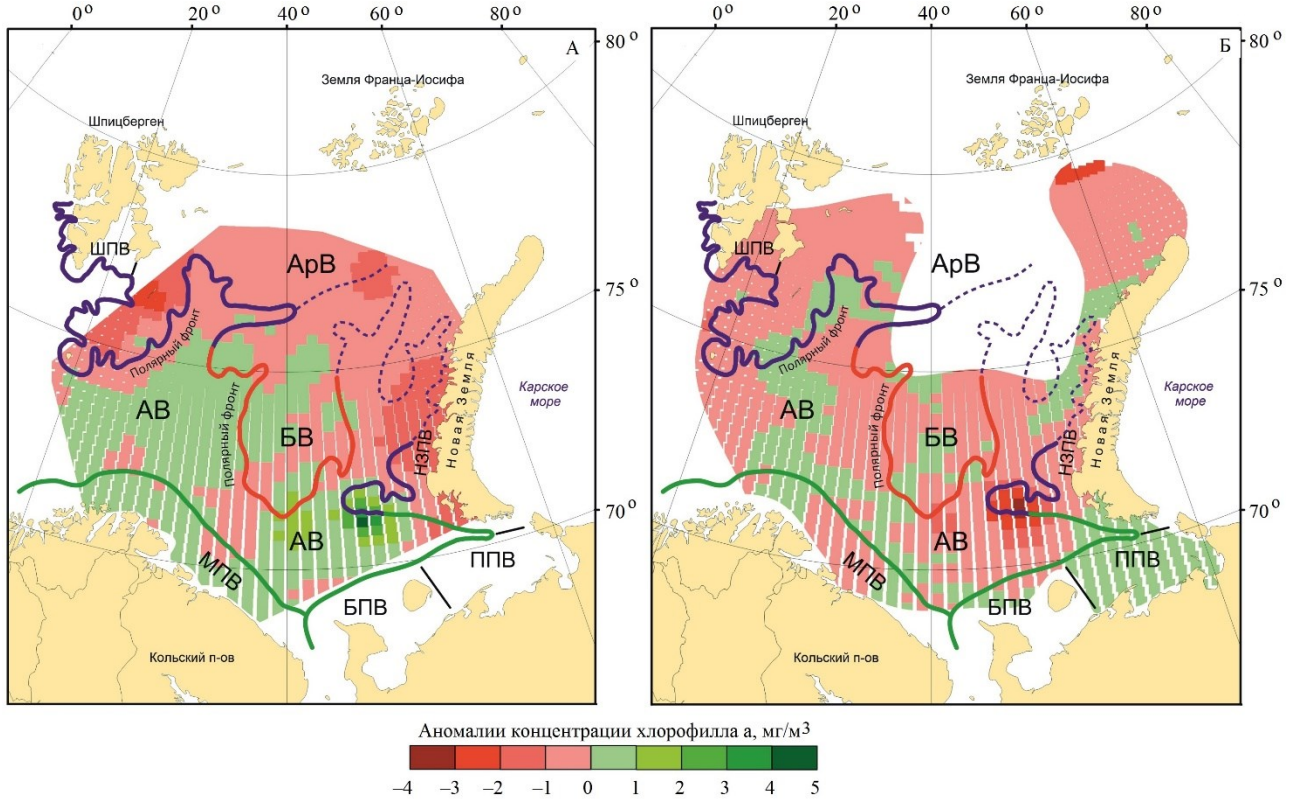

Рис. 2. Аномалии концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое водных масс Баренцева моря летом (А) и осенью (Б):
АрВ – арктическая, АВ – атлантическая, БВ – баренцевоморская, МПВ – мурманская прибрежная, НЗВП – новоземельская прибрежная, ППВ – печорская прибрежная, ШПВ – шпицбергенская прибрежная, БПВ – беломорская прибрежная
Fig. 2. Anomalies of chlorophyll *a* concentration in the surface layer water masses of the Barents Sea summer (A) and autumn (Б):
ApB – Arctic, AB – Atlantic, БВ – Barents Sea, МПВ – Murmansk coastal, НЗВП – Novaya Zemlya coastal, ППВ – Pechora coastal, ШПВ – Spitsbergen coastal, БПВ – White Sea coastal

Чтобы оценить относительный вклад каждой водной массы в производство первичной продукции Баренцева моря, необходимо учитывать не только концентрацию хлорофиила *a* в различные сезоны года в каждой, но и площадь, которую она занимает на акватории моря. Используя данные о средней сезонной концентрации хлорофилла *a* и средней многолетней площади водной массы, было рассчитано относительное содержание хлорофилла *a* в водных массах Баренцева моря в процентах от годового (рис. 3). Площади водных масс были вычислены по карте в их средних границах, указанных на рис. 2.

Наибольшее относительное содержание хлорофилла *a* в поверхностном слое Баренцева моря было зарегистрировано в весенний период – 46 % от годового (20.4 % – арктическая водная масса), что является характерной особенностью арктической и субарктической зоны Мирового океана, где основная часть годовой первичной продукции формируется во время весеннего цветения фитопланктона. Летом этот показатель снизился до 28.7 %, при этом наибольшее содержание хлорофилла *a* было отмечено в атлантической водной масса – 11.8 %. Осенью и зимой продолжалось снижение относительного содержания хлорофилла *a* до 20.6 и 4.7 % соответственно. Наибольший вклад в суммарное годовое содержание хлорофилла *a* внесли арктическая и атлантическая водные массы (рис. 3).

Наблюдалась также и межгодовая изменчивость концентраций и пространственного распределения хлорофилла *a* на акватории Баренцева моря. Развитие фитопланктона определяется многими факторами, большинство из которых имеют под собой климатическую основу.

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

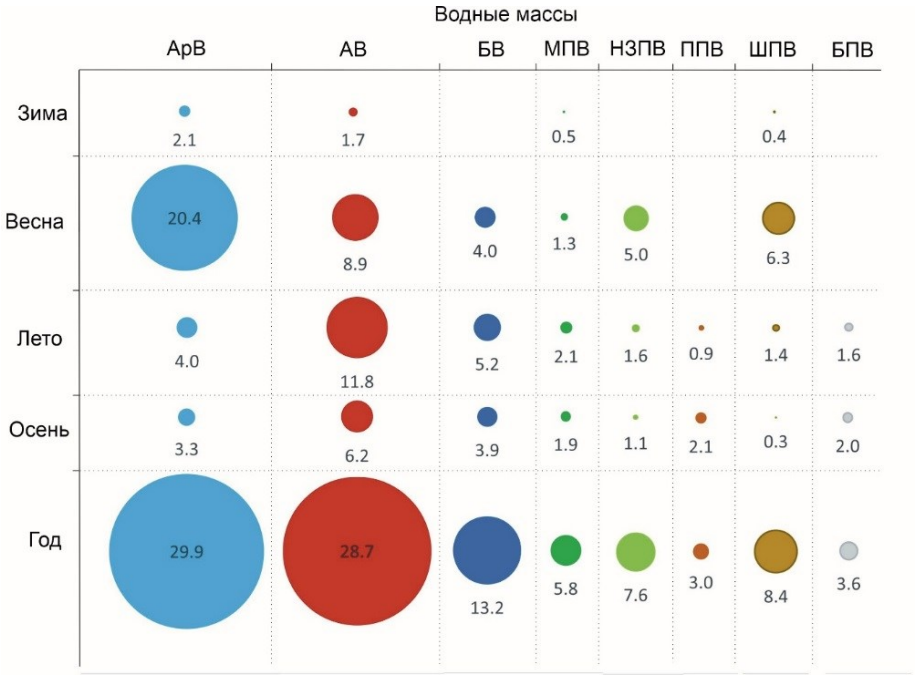

Рис. 3. Относительное содержание хлорофилла *a* в поверхностном слое водных масс Баренцева моря, %:
АрВ – арктическая, АВ – атлантическая, БВ – баренцевоморская, МПВ – мурманская прибрежная, НЗВП – новоземельская прибрежная, ППВ – печорская прибрежная, ШПВ – шпицбергенская прибрежная, БПВ – беломорская прибрежная
Fig. 3. Relative content of chlorophyll *a* in the surface layer of water masses of the Barents Sea, %:
АрВ – Arctic, АВ – Atlantic, БВ – Barents Sea, МПВ – Murmansk coastal, НЗВП – Novaya Zemlya coastal, ППВ – Pechora coastal, ШПВ – Spitsbergen coastal, БПВ – White Sea coastal

Моделирование, основанное на многофакторных регрессиях – модули GLM и GLZ (Generalized Linear Models) (Legendre, Legendre, 1998), позволило оценить характер и дать количественную оценку влияния различных климатических факторов.

Практически все факторы, кроме площади льда в сентябре, были значимо связаны с концентрацией хлорофилла *a* в поверхностном слое. Обнаружена прямая зависимость концентрации хлорофилла *a* от большинства климатических факторов, о чем свидетельствовали положительные коэффициенты регрессионной модели. В случае индекса АО и среднегодовой площади ледового покрова обнаружена обратная зависимость. Найденная линейная модель была статистически значимой (множественный $R = 0.39$, множественный $R^2 = 0.15$, скорректированный $R^2 = 0.14$, $F = 17.23$, $p < 0.01$).

Таким образом, использование многолетних данных позволило уточнить представления об особенностях пространственного распределения хлорофилла *a* в Баренцевом море. Получены новые сведения о локализации хлорофилла *a* в пределах основных водных масс. Средние концентрации хлорофилла *a* в Баренцевом море достигают максимальных значений в весенний период, летом и осенью – снижаются. В весенний период продуцируется около 46 % от суммарного годового количества хлорофилла. В летний период этот показатель снижается до 28 %, в течение осени и зимы – до 21 и 5 % соответственно. Наибольший вклад в суммарное годовое содержание хлорофилла *a* вносят арктическая и атлантическая водные массы. Для арктических вод характерно достижение максимальных концентраций хлорофилла *a* весной и последующее их уменьшение летом и осенью. В атлантических водах наиболее продуктивным является летний период. В целом в более южных районах моря достижение максимальных концентраций хлорофилла *a* происходит позже, чем в северных. Вероятно, это связано с особенностями формирования устойчивой стратификации водной толщи.

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

Необходимо отметить, что подобный подход позволяет увидеть общую картину, но при этом теряются некоторые детали, которые зачастую ощутимо меняют интерпретацию результатов. Примером могут служить результаты съемки, проведенной в марте–апреле 2021 г. на свободной от льда акватории Баренцева моря (рис. 4).

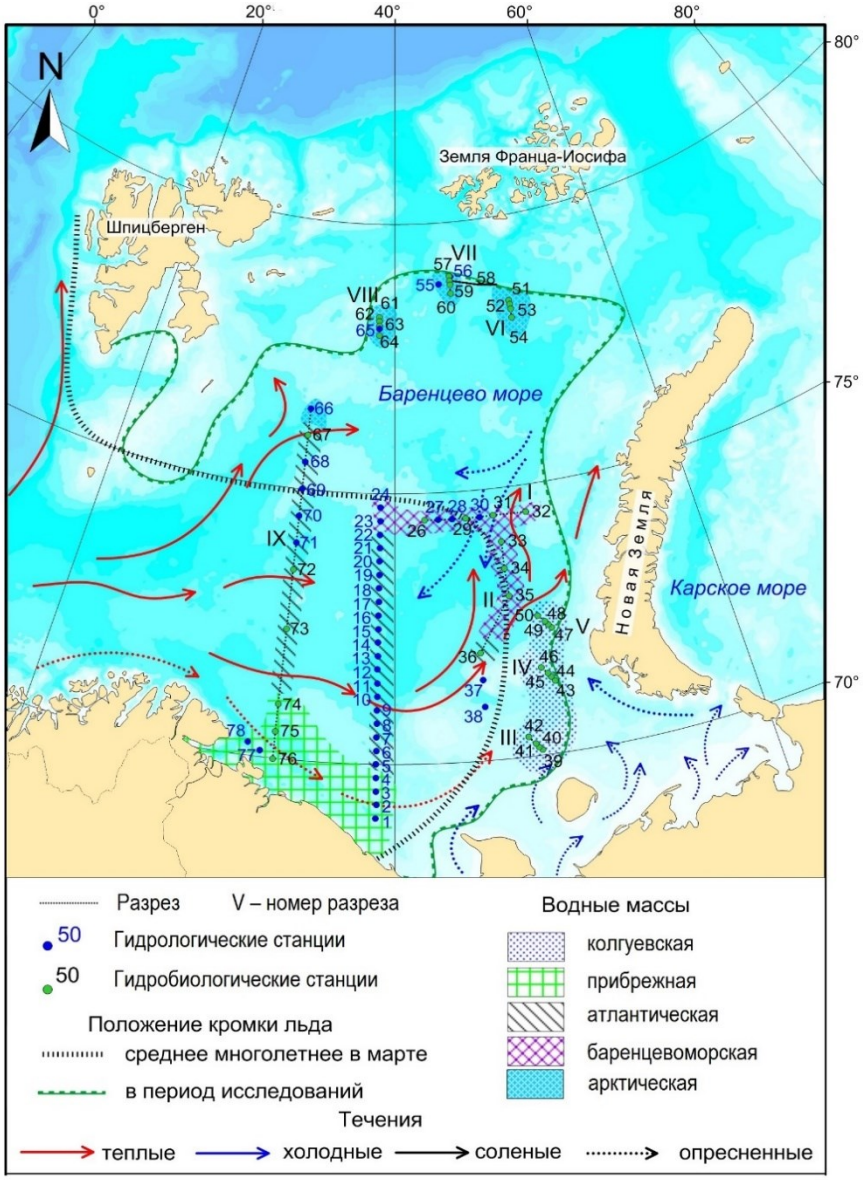

Рис. 4. Ледовые условия и расположение станций в Баренцевом море в марте–апреле 2021 г.
Fig. 4. Ice conditions and station locations in the Barents Sea, March–April 2021

По данным этого исследования, пространственное распределение концентраций хлорофилла *a*, их абсолютные и средние значения существенно различались в разных по происхождению водах Баренцева моря (рис. 5). Линейной зависимости между изменениями концентраций хлорофилла *a* и температурными или соленостными характеристиками воды не наблюдалось. Динамика концентрации хлорофилла *a*, по-видимому, связана не с термохалинными характеристиками водных масс, а с их происхождением, путями миграции и направлениями течений.

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

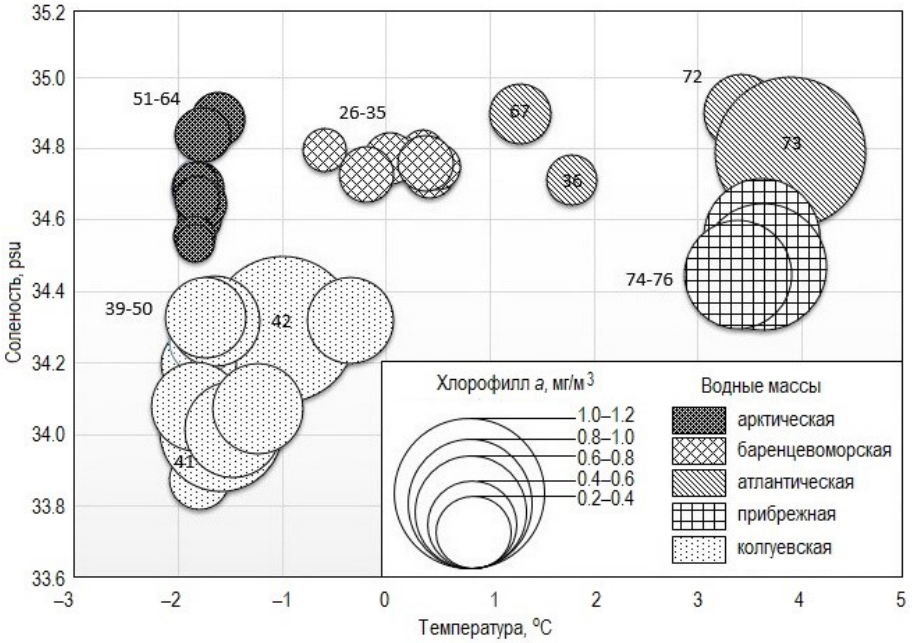

Рис. 5. Концентрации хлорофилла *a*, осредненные для слоя 0–50 м, в области *TS*-диаграммы, весна 2021 г.
Fig. 5. Concentrations of chlorophyll *a* averaged for the 0–50 m horizon in the *TS*-region of the diagram, spring 2021

Были выявлены разобщенные центры ранневесеннего цветения в прибрежных водах – на юго-востоке и юго-западе Баренцева моря. В конце марта–начале апреля максимальные концентрации хлорофилла *a* в прибрежных водах достигали значений около 1 мг/м^3. В это же время в баренцевоморских и арктических водах максимум концентраций не превышал 0.20 мг/м^3. Распределение биогенных элементов соответствовало зимнему периоду, когда вертикальные градиенты этих параметров еще не сформировались. Величины насыщения вод кислородом выше 100 %-го уровня (в разной степени на всей исследованной акватории) характеризовали активизацию процесса фотосинтеза в фитопланктонном сообществе.

Отсутствие прямой связи между гидрологической структурой водной толщи и микропланктоном максимально проявляется при проведении прямых таксономических исследований. В ходе многолетних наблюдений было изучено влияние полярного фронта и кромки льда на структурно-функциональные характеристики пелагического альгоценоза. Анализ воздействия термохалинных характеристик на концентрацию хлорофилла *a* показал, что она существенно различается в водах разного генезиса, т. е. полярный фронт разделяет более продуктивные арктические воды от атлантических. При этом анализ видового состава фитопланктонных сообществ практически показывает его идентичность. Более того, пелагические фитоценозы в атлантических и арктических водах находились на одной стадии годового сукцессионного цикла – ранневесенней.

В области ледовой кромки изучение микрофитопланктона проводилось в апреле 2019 г. На акватории исследованного участка (рис. 6) по гидрологическим показателям было выделено три типа водных масс.

В западной части (разрезы I и II) наибольшую площадь занимали баренцевоморские воды, в восточной (разрез III) они обнаруживались только в придонной пелагиали, а от поверхности до глубин 75–120 м распространялись поверхностные арктические водные массы. На двух южных станциях разреза I прослеживалось влияние поверхностных атлантических течений в виде выраженного термоклина, отделяющего теплые атлантические воды от подстилающих баренцевоморских. На северных станциях 22–24 этого разреза водная толща была однородной с характеристиками, соответствующими водной массе Баренцева моря. По максимальным горизонтальным градиентам температуры

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

полярный фронт на поверхности моря располагался между станциями 24 и 26. Южную часть разреза II (станции 31–33) также занимали баренцевоморские воды с однородной гидрологической структурой. При этом на его северных станциях 28–30, расположенных в непосредственной близости от кромки льда, данные водные массы подстилали поверхностный слой холодных распресненных арктических вод, и на поверхности моря между станциями 30 и 31 отмечался четко выраженный прикраевой фронт.

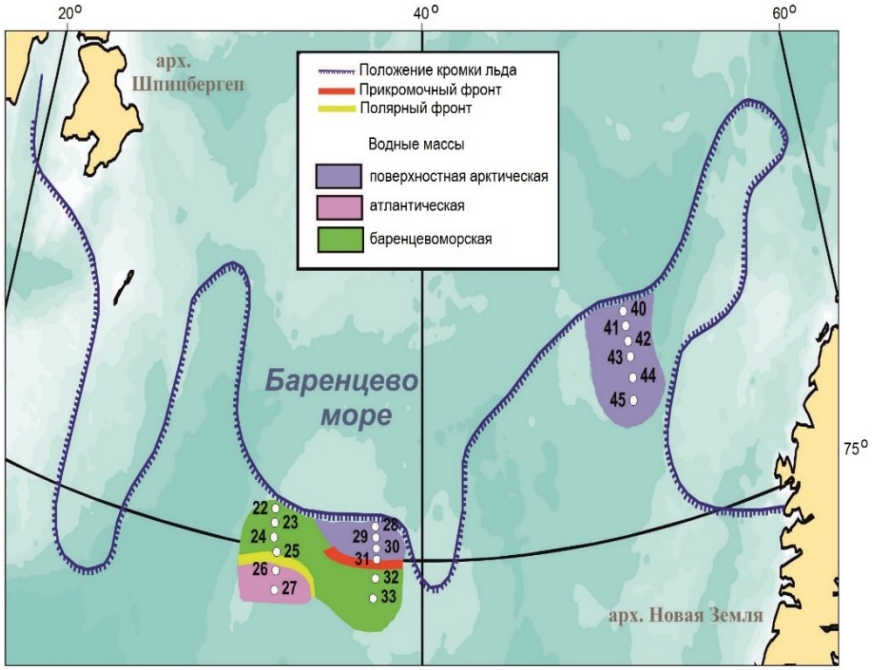

Рис. 6. Карта-схема района исследований в апреле 2019 г.:
разрез I – станции 22–27, разрез II – станции 28–33, разрез III – станции 40–45
Fig. 6. Map of the research area, April 2019:
section I – stations 22–27, section II – stations 28–33, section III – stations 40–45

В исследованной области Баренцева моря отмечен 61 вид фитопланктона: 36 – диатомовые, 23 – динофитовые, 1 – криптофитовые, 1 – диктиохофитовые.

На всем исследованном участке акватории по численности доминировал ранневесенний комплекс диатомовых водорослей: *Pauliella taeniata* (разрезы II и III), *Fragilariopsis oceanica* (разрез III) и мелкие виды рода *Chaetoceros* (разрезы I и II) (рис. 7).

По количественным показателям и таксономическому составу наблюдаемое пространственное распределение организмов отличалось высокой степенью мозаичности как между разрезами, так и между станциями каждого разреза.

Диапазон колебаний обилия микроводорослей составил 140–83000 кл/л при биомассе 0.04–118.65 мкг/л на разрезе III, 0.23–16.33 тыс. кл/л и 0.44–52.11 мкг/л на разрезе I, 1.12–35.33 тыс. кл/л и 2.39–63.61 мкг/л на разрезе II.

В атлантических водных массах численность фитопланктона была минимальна, а в баренцевоморских ее уровень был выше в 2–3.5 раза. В арктических водах на горизонтах 0 и 10 м концентрация организмов была примерно в 10 раз выше, чем в баренцевоморских, а в нижележащих слоях – в 1.5–2 раза. В распределении биомассы микроводорослей обнаруживалось аналогичное соотношение, но при этом ее средние величины в сообществе арктических водных масс превышали таковые баренцевоморских в 4 раза на глубинах 0 и 10 м, на 25 м – менее чем в 1.5 раза, а на 50 м – в 4 раза ниже.

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

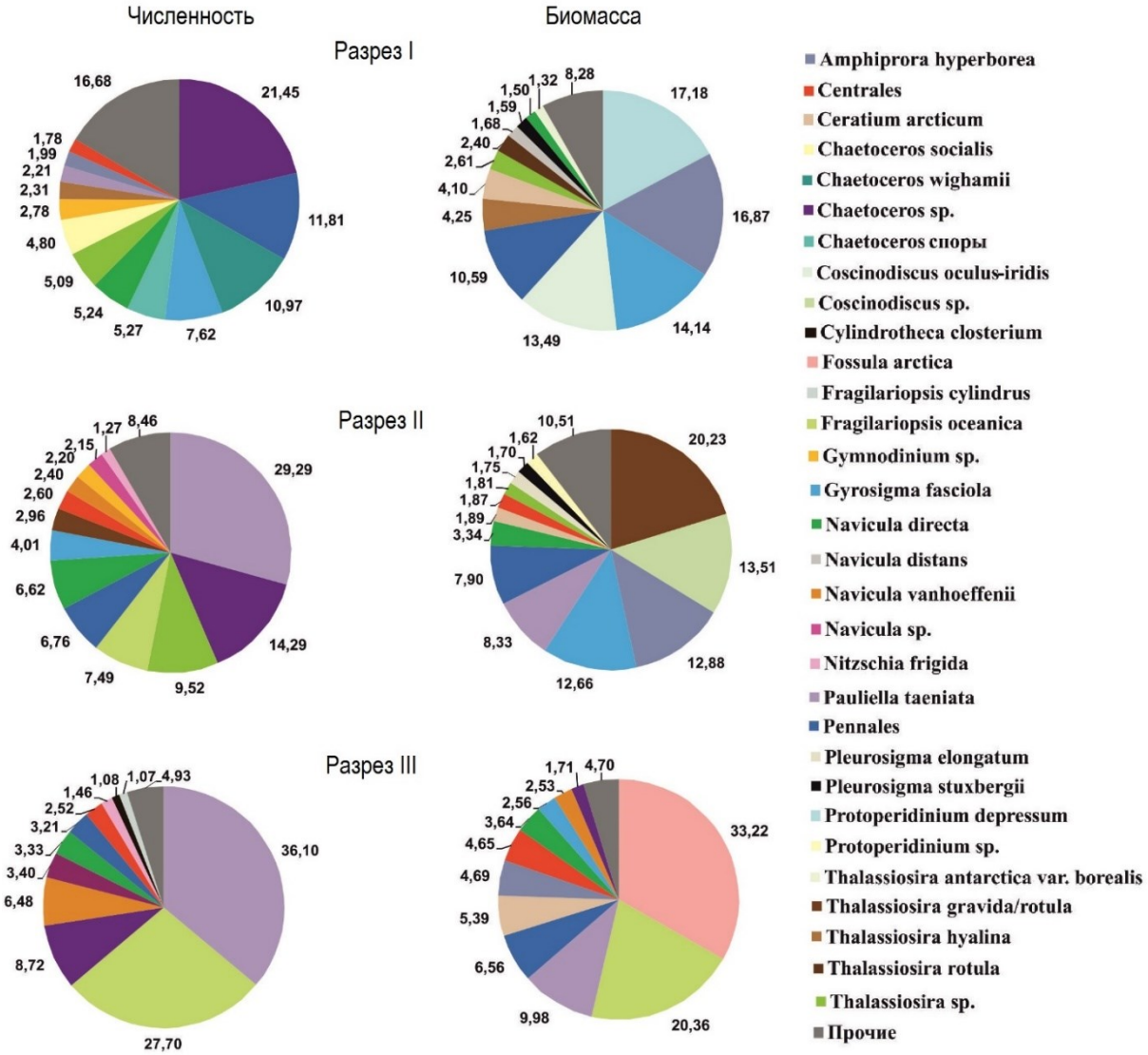

Рис. 7. Доля отдельных видов (в среднем по всем станциям и горизонтам отбора) в общей численности и биомассе пелагических альгоценозов исследованного района, %
Fig. 7. The proportion of individual species (on average for all stations and sampling horizons) from the total values of abundance and biomass of pelagic algal communities in the studied area, %

При сравнении качественного состава пелагических альгоценозов в различных водных массах показатель видового сходства (коэффициент Жаккара) микроводорослей для сообществ атлантических и баренцевоморских вод составил 24.69 %, баренцевоморских и арктических – 23.08 %, арктических и атлантических – 20.24 %. Столь низкие значения, безусловно, свидетельствуют о достоверном различии видовых комплексов фитопланктона в водных массах разного происхождения. При этом коэффициент Жаккара для станций 22, 28 и 40 в прикромочной зоне и ближайших к ним на разрезе (по мере отдаления от полей льда) станций 23, 29 и 41 составлял более 40 %.

Таким образом, в целом в изученной области Баренцева моря наблюдались неоднородность таксономического состава фитопланктона и мозаичное распределение его количественных и качественных характеристик. Выявленные отличия были более значительными в районах локализации водных масс разного типа, чем на станциях, расположенных как на различном расстоянии от ледовой кромки,

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

так и на разных разрезах. При этом из всего списка видов (61) лишь 15 в равной мере отмечались во всех типах водных масс, большинство из них составляли типичные компоненты весеннего комплекса, а остальную часть – динофлагелляты с круглогодичной встречаемостью. Акватория Баренцевоморского бассейна вблизи полей сезонного льда в ранневесенний период характеризовалась началом активизации развития первичных продуцентов. При этом на фоне общей неоднородности качественного состава и мозаичности пространственного распределения набор доминантов был в значительной степени сходен во всей прикромочной зоне. В то же время в разных ее участках изменение численности и биомассы микроводорослей в направлении от ледовой кромки носило различный характер, не обнаруживая общей закономерности. При этом не было выявлено никаких заметных признаков влияния компонентов ледовой флоры, попадающих в пелагиаль вследствие ледотаяния: список видов в сообществах узкой краевой зоны достоверно не отличался от такового в близлежащей области. Количественные показатели развития и уровень таксономического разнообразия микрофитопланктона в большей мере отличались у сообществ в районах локализации водных масс разного происхождения. По-видимому, в период, предшествующий массовому цветению фитопланктона, альгоценозы прикромочной зоны более подвержены воздействию гидрологических факторов. Происходящие в последние десятилетия в арктических морях сокращение площади ледового покрова и сдвиг сроков льдообразования и ледотаяния, безусловно, не могут не оказывать влияния на пространственно-временную структуру сообществ пелагических микроводорослей прикромочной зоны и прилежащей к ней части акватории. Тем не менее, есть все основания предполагать, что эти процессы в минимальной степени отразятся на их качественном составе и распределении видовых комплексов. Но при этом, вследствие удлинения периода открытой воды и, соответственно, продолжительности вегетации, вполне можно ожидать повышения величин количественных характеристик фитопланктона, что, в свою очередь, приведет к увеличению продуктивности морских экосистем в целом.

Исследования новоземельского зоопланктона. Весной 2016 г. у берегов Новой Земли в пробах обнаружено 54 таксона/группы мезозоопланктона. Голопланктонные организмы доминировали, несмотря на высокую относительную численность меропланктонных организмов (усоногих раков, иглокожих и личинок брюхоногих). Кластерный анализ выделил две основные группы станций (Dvoretsky, Dvoretsky, 2022). Выявленные кластеры соответствовали районированию по гидрографическим условиям. Кластер 1 соответствовал прибрежным водам Новой Земли, а кластер 2 – водам Баренцева моря, где присутствовали более холодные воды. В кластере 1 по общей плотности доминировали науплии *Thyssanoessa* spp. (24±6 %), яйца (21±5 %) и науплии (18±4 %) Copepoda, а также *Oithona similis* (14±4 %) (рис. 8). Кластер 2 выделялся преобладанием *O. similis* (18±4 %) в сочетании с относительно высокой численностью науплиев Copepoda (17±5 %), *Fritillaria borealis* (12±3 %) и науплиев усоногих (11±3 %) (рис. 8). Биомасса мезозоопланктона в кластерах 1 и 2 колебалась от 375 до 1485 и от 1001 до 9591 мг/м^2 (сухой массы) соответственно (Dvoretsky, Dvoretsky, 2022). *Parasagitta elegans* (32±9 %) и *Calanus finmarchicus* (20±9 %) вносили наибольший вклад в общую биомассу мезозоопланктона на станциях кластера 1, тогда как в кластере 2 доминировали *C. finmarchicus* (30±3%), *Metridia longa* (17±7 %). Комплекс мезозоопланктона на станциях кластера 1 отличался от такового на станциях кластера 2 на уровне сходства 55 % (ANOSIM, $R = 0.78$, $P = 0.002$) (Dvoretsky, Dvoretsky, 2022). Анализ канонических соответствий показал, что широта, долгота и концентрация хлорофилла *a* были значимыми факторами, которые способствовали наблюдаемой изменчивости численности мезозоопланктона. Общая численность мезозоопланктона положительно коррелирует с долготой и отрицательно со средней температурой и концентрацией хлорофилла *a*. Численность *C. glacialis*, *C. hyperboreus*, *M. longa*, *Microcalanus* spp., P*seudocalanus* spp. и *F. borealis* увеличивалась с широтой/долготой и уменьшалась с повышением температуры. Обилие обычных таксонов мезозоопланктона отрицательно коррелировало с концентрацией хлорофилла *a* на поверхности (Dvoretsky, Dvoretsky, 2022).

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

Рис. 8. Относительное обилие зоопланктона в восточной части Баренцева моря весной 2016 г.
Fig. 8. Relative abundance of zooplankton in the eastern Barents Sea in spring 2016

Таким образом, мезозоопланктон демонстрировал пространственную изменчивость численности и биомассы в различных экологических условиях в районе исследований. Высокая плотность мероланктона и младших стадий веслоногих ракообразных указывает на весеннее состояние сообщества мезозоопланктона. Проведенные исследования могут считаться фоновыми, а информация, полученная в ходе экспедиции, должна служить базовой для дальнейших работ, а также для сравнительного анализа с другими арктическими районами.

Микробиологические исследования. В прибрежных районах архипелага Новая Земля летом 2022 г. численность прокариот изменялась в пределах 0.2–0.9 млн кл/мл, биомасса – 2.8–9.9 мг С/м^3, при диапазоне средних объемов клеток 0.025–0.089 мкм^3 (рис. 9). Повышенные величины количественных показателей выявлены в слое 0–10 м (0.5±0.04 млн кл/мл, 6.6±0.5 мг С/м^3), в то время как промежуточные и придонные слои имели более низкие значения (0.3±0.04 млн кл/мл, 4.0±0.3 мг С/м^3).

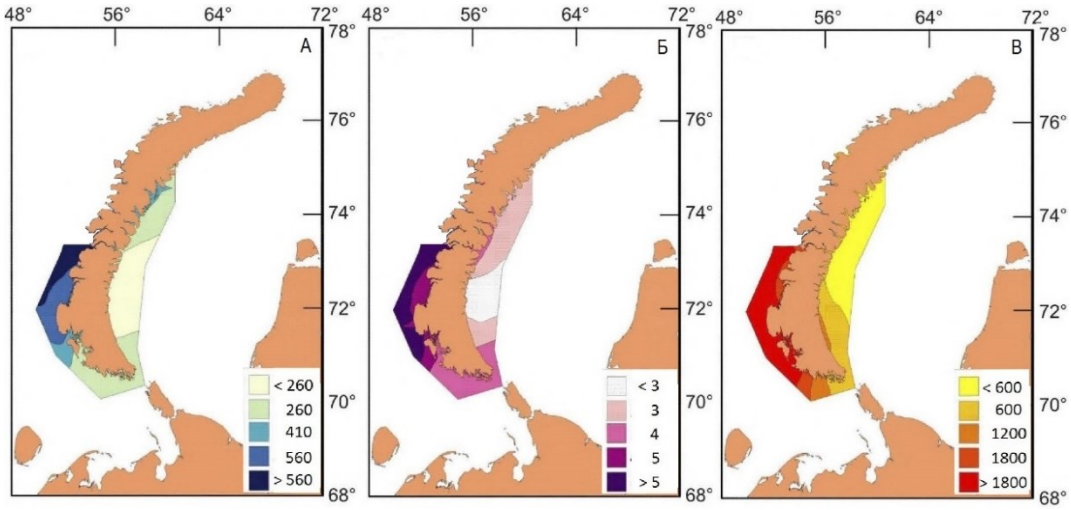

Рис. 9. Распределение количественных характеристик прокариот и вирусных частиц в прибрежных водах архипелага Новая Земля летом 2022 г.:
А – средняя численность прокариот, 10^3 кл/мл; Б – средняя биомасса прокариот, мг С/м^3; В – средняя численность вирусов, 10^3 частиц/мл
Fig. 9. Distribution of quantitative characteristics of prokaryotes and virus particles in the coastal waters of the Novaya Zemlya archipelago in the summer of 2022:
A – average number of prokaryotes, 10^3 cells/ml; Б – average biomass of prokaryotes, mg C/m^3; B – average number of viruses, 10^3 particles/ml

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

Количество вирусов изменялось от 0.6 до 3.2 млн частиц/мл, их биомасса от 0.04 до 0.11 мкг С/м^3 (рис. 9). Рассчитанное количество контактов между вирио- и прокариотопланктоном составляло 0.1–3.2 в сутки. Максимальная концентрация и биомасса вирусов отмечены в слое 0–10 м (1.5±0.2 млн частиц/мл, 0.08±0.01 мкг С/м^3), снижаясь ко дну до 1.3±0.3 млн частиц/мл и 0.07±0.01 мкг С/м^3 соответственно.

Обилие вирусных частиц значительно превышало обилие клеток прокариот (в 1–8 раз). На фоне общего снижения всех количественных показателей с глубиной, их наибольшие значения отмечены в водах западной части архипелага, наименьшие – в водах его восточной части (рис. 9). Количество контактов между вирусами и прокариотами на западе было в 3 раза выше, чем на востоке. Выявленные различия определялись как обеспеченностью прокариот (потенциальных хозяев вирусов) лабильным субстратом, так и гидрологическими особенностями районов исследования.

В восточной части архипелага численность прокариот соответствовала осенним величинам в бессточной мелководной зоне Карского моря, в западной части значения показателя находились в более узких пределах, чем в заливе Моллера летом (Влияние …, 2016; Гетеротрофный …, 2023). В приведенных для сравнения акваториях диапазоны обилия вирусов значительно превосходили значения, полученные в наших исследованиях. Эта разница может быть объяснена более высоким обилием морских бактерий, которые служат потенциальными хозяевами для вирусов.

Сезонная изменчивость гидрохимических параметров водных масс Кольского залива выполнена в 2024 г. Средние показатели изученных параметров представлены в табл. 3

Таблица 3

Средние значения гидрохимических показателей в Кольском заливе в 2024 г., мкг/л

Table 3

Average values of hydrochemical indicators in the Kola Bay in 2024, mcg/l

Район	Сезон	Нитриты	Нитраты	Фосфаты	Кремний
Северное колено	Зима	–	–	–	–
	Весна	5.1	596.7	25.5	1271
	Лето	7.7	6.8	28.7	127
	Осень	0	31.7	11.2	49
Среднее колено	Зима	14.7	292.3	65.6	610
	Весна	13.0	322.5	89.4	1414
	Лето	10.7	137.3	64.9	747
	Осень	6.7	82.6	24.7	376
Южное колено	Зима	13.4	517.7	66.0	987
	Весна	7.6	295.9	24.3	1845
	Лето	11.8	138.5	55.3	1259
	Осень	5.7	66.4	20.2	894

По большинству главных биогенных элементов за период исследований (табл. 1) от зимнего к осеннему сезону наблюдается понижение средних концентраций в водах Кольского залива. Основные причины заключаются в снижении концентраций в результате обмена вод залива с морем, потреблении этих веществ продуцентами в процессе жизнедеятельности, оседании их на дне в виде труднорастворимого органического осадка. Характерное для весеннего периода увеличение количества Si (табл. 3) является следствием таяния снега, попадания талой воды в ручьи, реки и затем в залив, а также планового весеннего спуска вод Туломского водохранилища в устье Кольского залива. Содержание в водах фосфатов, как и нитритов, лишь немногим отличается весной и летом. Приток морской воды из моря в залив, насыщенной фосфатами в начале весны, вертикальное перемешивание, которое способствует транспортировке PO_4^{3-} от дна к поверхности в зимне-весенний период, увеличивают количество фосфора в заливе. Также известно о быстром возвращении в воду фосфора в виде фосфатных ионов в результате естественных трансформационных процессов, так как скорость его оборота в природном цикле экосистемы Кольского залива составляет около 18 сут. (Бардан,

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

Ишкулова, 2010). И очень важная причина высокого содержания фосфатов в Кольском заливе – антропогенное загрязнение. В моющих средствах, попадающих в залив, присутствуют СПАВ с большим содержанием PO_4^{3-} (бытовые воды также содержат и нитриты, и аммоний, при окислении которого образуется NO_2^-). Из таблицы 3 видно, что в южном колене количество нитратов в зимний период значительное (447.7 мкг/л), вместе с тем к осени плавно уменьшается. В среднем колене залива весной наблюдается небольшое увеличение концентраций NO_3^- в результате весенних паводков, водообмена поверхность–дно и попадания в эти части залива антропогенных вод. В летний период зафиксировано резкое уменьшение данного вещества, вероятно, из-за потребления его фитопланктоном при цветении.

При сравнении с литературными данными по гидрохимии Кольского залива прошлых лет наблюдается заметное расширение диапазонов как к минимуму, так и к максимуму почти по всем элементам (Кольский …, 1997; Широкая, Овчинникова, 2011). Для фосфатов диапазон флуктуаций за год составил от значения ниже предела обнаружения метода (ст. 3, март) до 314.6 мкг/л (ст. 4, апрель). Выявленное на ст. 3 низкое значение PO_4^{3-} объясняется ее близким расположением к береговому стоку. Для нитритов минимальное количество зафиксировано на ст. 9 в сентябре (аналитический ноль), а максимум достиг в апреле на ст. 4 – 155.5 мкг/л. Этот единственный случай за год такого высокого содержания нитритов, зафиксированного нами, и он, безусловно, антропогенного происхождения. Для нитратов наименьшее количество было отмечено в июле на ст. 9 – 1.4 мкг/л, а наибольшее в марте на ст. 8 – 904.2 мкг/л. Для кремния диапазон концентраций в 2024 г. составил 20–2822 мкг/л, соответственно, в сентябре (ст. 9) и марте (ст. 2).

Таким образом, нами определены современные диапазоны концентраций главных биогенных элементов на исследованных участках Кольского залива в 2024 г. В результате антропогенного загрязнения содержание нитритного азота, по сравнению с 1990 гг., возросло примерно в 2.5 раза. Увеличилось и количество нитратов в заливе – в среднем примерно на 200 %. На момент исследований самым загрязненным по фосфатам являлось среднее колено – содержание PO_4^{3-} на этом участке стало выше в 2.3 раза по сравнению с более ранними исследованиями (Кольский …, 1997). Территориально наименее чистыми по биогенным веществам являются воды у мыса Белокаменный и в губе Ваенга.

В ходе исследований, проведенных лабораторией планктона в последний пятилетний период, определено влияние климатических флуктуаций на структурно-продукционные характеристики пелагиали как с использованием многолетних рядов данных по содержанию хлорофилла *a in situ*, так и при проведении прямого таксономического изучения пелагического фитоцена на локальных участках акватории Баренцева моря в период весенней активизации. Определены сроки начала, динамика развития и структурной организации весеннего цветения фитопланктона. Разработана методика использования изотопных соотношений $\delta^{18}O$ для оценки индивидуальных стехиометрических соотношений и первичной продукции акваторий. Получены новые сведения о весеннем пелагическом комплексе зоопланктона в районе арктического архипелага Новая Земля, где также проведены уникальные исследования бактерио- и вириопланктона.

Работа выполнена по теме «Структурно-динамические трансформации морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды» (№ госрегистрации 124013000709-9) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. *Бардан С. И., Ишкулова Т. Г.* Суточная изменчивость гидрохимических параметров в начальный период органотрофной фазы функционирования экосистемы Кольского залива (Баренцево море) // Изв. РАН. Сер. географ. 2010. № 4. С. 98–105.
2. *Биологические* компоненты сезонного льда / А. Ф. Сажин, Т. Н. Ратькова, С. А. Мошаров, Н. Д. Романова, И. В. Мошарова, Д. А. Портнова // Биологические ресурсы Белого моря: изучение и использование. СПб.: Изд. ЗИН РАН, 2012. С. 97–115.
3. *Влияние* вирусов на бактериопланктон открытой и прибрежной части Баренцева моря / М. П. Венгер, А. И. Копылов, Е. А. Заботкина, П. Р. Макаревич // Биол. моря. 2016. Т. 42, № 1. С. 19–26.

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

4. *Воды* Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. / В. К. Ожигин, В. А. Ившин, А. О. Трофимов, М. Ю. Карсаков. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2016. 260 с.
5. *Гетеротрофный* нано- и микропланктон Карского моря в осенний период / А. Ф. Сажин, Н. Д. Романова, А. И. Копылов, А. В. Романенко, Е. А. Заботкина // Океанология. 2023. Т. 63, № 2. С. 243–254.
6. *ГОСТ 17.1.4.02-90.* ВОДА. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a* // Государственный контроль качества воды. М.: Изд-во стандартов, 2001. С. 551–563.
7. *Кольский* залив: океанография, биология, экосистемы, поллютанты / Отв. ред Г. Г. Матишов. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. 265 с.
8. *Мамаев О. И.* Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 296 с.
9. *Справочни*к гидрохимика: рыбное хозяйство / А. И. Агатова, И. А. Налетова, В. Л. Зубаревич и др. / Под ред. В. В. Сапожникова. М.: Агропромиздат, 1991. 224 с.
10. *Тимофеев С. Ф.* Экология морского зоопланктона. Мурманск: Изд-во МГПИ, 2000. 216 с.
11. *Формирование* центров ранневесеннего цветения фитопланктона в Кольском заливе / Г. Г. Матишов, Н. В. Дружков, А. А. Намятов, Е. Ф. Марасаева, В. В. Ларионов, Д. В. Моисеев, И. В. Бронников, Т. Г. Ишкулова // Докл. РАН. 2000. Т. 375, № 1. С. 137–141.
12. *Широкая Т. А., Овчинникова С. И.* Гидрохимические исследования бассейна Кольского залива. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2011. 182 с.
13. *Boitsov V. D., Karsakov A. L., Trofimov A. G.* Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. Mar. Sci. 2012. Vol. 69. P. 833–840. doi:10.1093/icesjms/fss075
14. *Climate* and cyclic hydrobiological changes of the Barents Sea from the twentieth to twenty-first centuries / G. Matishov, D. Moiseev, O. Lyubina et al. // Polar Biol. 2012. Vol. 35. P. 1773–1790. URL: https://doi.org/10.1007/s00300-012-1237-9
15. *Comiso J. C.* Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover // J. Climatol. 2012. Vol. 25. P. 1176–1193. doi:10.1175/JCLI-D-11-00113.1
16. *Comiso J. C., Hall D. K.* Climate trends in the Arctic as observed from space // Climate Change. 2014. Vol. 5. P. 389–409. doi:10.1002/wcc.277
17. Ecosystem Barents Sea. Trondheim: Tapir Academic Press, 2009. 587 p.
18. *Fenchel T.* The microbial loop – 25 years later // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 2008. Vol. 366. P. 99–103.
19. *Food* webs and carbon flux in the Barents Sea / P. Wassmann, M. Reigstad, T. Haug, B. Rudels, M. L. Carroll, H. Hop, G. W. Gabrielsen, S. Falk-Petersen, S. G. Denisenko, E. Arashkevich, D. Slagstad, O. Pavlova // Prog. Oceanogr. 2006. Vol. 71. P. 232–287.
20. *Hydrochemical* basis of marine waters biological productivity, surrounding Svalbard archipelago / A. A. Namyatov, P. R. Makarevich, I. V. Tokarev, I. A. Pastuhov // Biol. Commun. 2023. Vol. 68(1). P. 30–48. URL: https://doi.org/10.21638/spbu03.2023.104
21. *IPCC* Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate / H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhal, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nikolai, A. Okem et al. (Eds.). 2019. URL: https://www.ipcc.ch/srocc/ (accessed on 08.05.2024).
22. *Legendre P., Legendre L.* Numerical ecology. Amsterdam: Elsevier, 1998. 853 p.
23. *Makarevich P. R., Vodopianova V. V., Bulavina A. S.* Dynamics of the spatial chlorophyll-*a* distribution at the Polar Front in the marginal ice zone of the Barents Sea during spring // Water. 2022. Vol. 14. P. 101. URL: https://doi.org/10.3390/w14010101
24. *Microphytoplankton* community structure in the western Arctic Ocean: Surface layer variability of geographic and temporal considerations in summer / Y. Wang, P. Xiang, J. Kang, Y. Y. Ye, G. M. Lin, Q. L. Yang, M. Lin // Hydrobiologia. 2018. Vol. 811. P. 295–312. doi:10.1007/s10750-017-3500-0
25. *Parameter* $\delta^{18}O$ in the marine environment ecosystem studies on the example of the Barents Sea / A. A. Namyatov, P. R. Makarevich, E. I. Druzhkova, I. A. Pastukhov // Water. 2023. Vol. 15. P. 328. doi:10.3390/w15020328

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

26. *Phytoplankton* biodiversity is more important for ecosystem functioning in highly variable thermal environments / E. Bestion, B. Haegeman, S. A. Codesal, A. Garreau, M. Huet, S. Barton, J. M. Montoya // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2021. Vol. 118. Article: e2019591118.
27. *Quantifying* the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat / M. Årthun, T. Eldevik, L. H. Smedsrud, Ø. Skagseth, R. B. Ingvaldsen // J. Climatol. 2012. Vol. 25. P. 4736–4743. doi:10.1175/JCLI-D-11-00466
28. *Role* for Atlantic inflows and sea ice loss on shifting phytoplankton blooms in the Barents Sea / L. Oziel, G. Neukermans, M. Ardyna, C. Lancelot, J.-L. Tison, P. Wassmann, J. Sirven, D. Ruiz-Pino, J.-C. Gascard // J. Geophys. Res.: Oceans. 2017. Vol. 122(6). P. 5121–5139. doi:10.1002/2016JC012582L
29. *Strickland J. D. H., Parsons T. R.* A practical handbook of seawater analysis // Bull. Fish. Res. Board Can. 1972. 310 p. URL: http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1791
30. The advective origin of an under-ice spring bloom in the Arctic Ocean using multiple observational platforms / G. Johnsen, M. Norli, M. Moline, I. Robbins, C. von Quillfeldt, K. Sørensen, F. Cottier, J. Berge // Polar Biol. 2018. Vol. 41. P. 1197–1216.
31. *The changing* climate of the Arctic / D. G. Barber, J. V. Lukovich, J. Keogak, S. Baryluk, L. Fortier, G. H. R. Henry // Arctic. 2008. Vol. 61(5). P. 7–26. doi:10.14430/arctic98
32. *The ecological* role of water-column microbes in the sea / F. Azam, T. Fenchel, J. G. Field et al. // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1982. Vol. 10. P. 257–263.
33. *The role* of the Barents Sea in the Arctic climate system / L. H. Smedsrud, I. Esau, R. B. Ingvaldsen, T. Eldevik, P. M. Haugan, C. Li, V. S. Lien, A. Olsen, A. M. Omar, O. H. Otterå, B. Risebrobakken, A. B. Sandø, V. A. Semenov, S. A. Sorokina // Rev. Geophys. 2013. Vol. 51(7). P. 1–35. doi:10.1002/rog.20017
34. *Zar J. H.* Biostatistical analysis. 4th ed. USA: Prentice-Hall Inc., 1999. 663 p.

References

1. Bardan S. I., Ishkulova T. G. Sutochnaya izmenchivost' gidrokhimicheskikh parametrov v nachal'nyy period organotrofnoy fazy funktsionirovaniya ekosistemy Kol'skogo zaliva (Barentsevo more) [The daily variability of the hydrochemical parameters in the initial period of the organotroph phase of the functioning of the ecosystem of the Kola Bay (Barents Sea)]. *Izvestiya RAN. Seriya: Geograficheskaya* [Izvestya RAS. Geographical Series], 2010, No. 4, pp. 98–105 (In Russ.).
2. Sazhin A. F., Ratkova T. N., Mosharov S. A., Romanova N. D., Mosharova I. V., Portnova D. A. Biologicheskie komponenty sezonnogo l'da [Biological components of seasonal ice]. *Biologicheskie resursy Belogo morya: izuchenie i ispol'zovanie* [Biological resources of the White Sea: study and use], Saint Petersburg, Publ. Zool. Inst. RAS, 2012, pp. 97–115 (In Russ.).
3. Venger M. P., Kopylov A. I., Zabotkina E. A., Makarevich P. R. Vliyanie virusov na bakterioplankton otkrytoy i pribrezhnoy chasti Barentseva morya [The effect of viruses on bacterioplankton of the open and coastal part of the Barents Sea]. *Biologiya morya* [Marine Biology], 2016, Vol. 42, No. 1, pp. 19–26 (In Russ.).
4. Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. O., Karsakov M. Yu. *Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost'* [The water of the Barents Sea: structure, circulation, variability]. Murmansk, Publ. PINRO, 2016, 260 p. (In Russ.).
5. Sazhin A. F., Romanova N. D., Kopylov A. I., Romanenko A. V., Zabotkina E. A. Geterotrofnyy nano- i mikroplankton Karskogo morya v osenniy period [Heterotrophic nano- and microplankton of the Kara Sea in autumn]. *Okeanologiya* [Oceanology], 2023, Vol. 63, No. 2, pp. 243–254 (In Russ.).
6. GOST 17.1.4.02-90. VODA. *Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya khlorofilla a. Gosudarstvennyy kontrol' kachestva vody* [GOST 17.1.4.02-90. WATER. Methodology for spectrophotometric determination of chlorophyll *a*. State Water Quality Control], Moscow, Publ. Standards, 2001, pp. 551–563. (In Russ.).
7. *Kol'skiy zaliv: okeanografiya, biologiya, ekosistemy, pollyutanty* [Kola Bay: oceanography, biology, ecosystems, pollutants]. Apatity, Publ. KSC RAS, 1997, 265 p. (In Russ.).

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

8. Mamaev O. I. *Termokhalinnyy analiz vod Mirovogo okeana* [Thermal analysis of the waters of the World Oceans]. Leningrad, Hydrometeoyzdat, 1987, 296 p. (In Russ.).
9. *Spravochnik gidrokhimika: rybnoe khozyaystvo* [Hydrochemist's Handbook: Fisheries]. Moscow, Agropromizdat, 1991, 224 p. (In Russ.).
10. Timofeev S. F. *Ekologiya morskogo zooplanktona* [Ecology of marine zooplankton]. Murmansk, Publ. MGPI, 2000, 216 p. (In Russ.).
11. Matishov G. G., Druzhkov N. V., Namyatov A. A., Marasaeva E. F., Larionov V. V., Moiseev D. V., Bronnikov I. V., Ishkulova T. G. Formirovanie tsentrov ranne-vesennego tsveteniya fitoplanktona v Kol'skom zalive [Formation of centers of the early-medium flowering of phytoplankton in the Kola Bay]. *Doklady RAN* [Doklady RAS], 2000, Vol. 375, No. 1, pp. 137–141 (In Russ.).
12. Shirokaya T. A., Ovchinnikova S. I. *Gidrokhimicheskie issledovaniya basseyna Kol'skogo zaliva* [Hydrochemical studies of the Kola Bay basin]. Murmansk, Publ. MSTU, 2011, 182 p. (In Russ.).
13. Boitsov V. D., Karsakov A. L., Trofimov A. G. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009. ICES J. Mar. Sci., 2012, Vol. 69, pp. 833–840. doi:10.1093/icesjms/fss075
14. Matishov G., Moiseev D., Lyubina O. et al. Climate and cyclic hydrobiological changes of the Barents Sea from the twentieth to twenty-first centuries. Polar Biol., 2012, Vol. 35, pp. 1773–1790. Available at: https://doi.org/10.1007/s00300-012-1237-9
15. Comiso J. C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover. J. Climatol., 2012, Vol. 25, pp. 1176–1193. doi:10.1175/JCLI-D-11-00113.1
16. Comiso J. C., Hall D. K. Climate trends in the Arctic as observed from space. Climate Change, 2014, Vol. 5, pp. 389–409. doi:10.1002/wcc.277
17. Ecosystem Barents Sea. Trondheim, Tapir Academic Press, 2009, 587 p.
18. Fenchel T. The microbial loop – 25 years later. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 2008, Vol. 366, pp. 99–103.
19. Wassmann P., Reigstad M., Haug T., Rudels B., Carroll M. L., Hop H., Gabrielsen G. W., Falk-Petersen S., Denisenko S. G., Arashkevich E., Slagstad D., Pavlova O. Food webs and carbon flux in the Barents Sea. Prog. Oceanogr., 2006, Vol. 71, pp. 232–287.
20. Namyatov A. A., Makarevich P. R., Tokarev I. V., Pastuhov I. A. Hydrochemical basis of marine waters biological productivity, surrounding Svalbard archipelago. Biol. Commun., 2023, Vol. 68(1), pp. 30–48. Available at: https://doi.org/10.21638/spbu03.2023.104
21. IPCC Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate / H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhal, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nikolai, A. Okem et al. (Eds.), 2019. Available at: https://www.ipcc.ch/srocc/ (accessed on 08.05.2024).
22. Legendre P., Legendre L. Numerical ecology. Amsterdam, Elsevier, 1998. 853 p.
23. Makarevich P. R., Vodopianova V. V., Bulavina A. S. Dynamics of the spatial chlorophyll-*a* distribution at the Polar Front in the marginal ice zone of the Barents Sea during spring. Water, 2022, Vol. 14, p. 101. Available at: https://doi.org/10.3390/w14010101
24. Wang Y., Xiang P., Kang J., Ye Y. Y., Lin G. M., Yang Q. L., Lin M. Microphytoplankton community structure in the western Arctic Ocean: Surface layer variability of geographic and temporal considerations in summer. Hydrobiologia, 2018, Vol. 811, pp. 295–312. doi:10.1007/s10750-017-3500-0
25. Namyatov A. A., Makarevich P. R., Druzhkova E. I., Pastukhov I. A. Parameter $\delta^{18}O$ in the marine environment ecosystem studies on the example of the Barents Sea. Water, 2023, Vol. 15, p. 328. doi:10.3390/w15020328
26. Bestion E., Haegeman B., Codesal S. A., Garreau A., Huet M., Barton S., Montoya J. M. Phytoplankton biodiversity is more important for ecosystem functioning in highly variable thermal environments. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2021, Vol. 118, Article: e2019591118.
27. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R. B. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. J. Climatol., 2012, Vol. 25, pp. 4736–4743. doi:10.1175/JCLI-D-11-00466

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

28. Oziel L., Neukermans G., Ardyna M., Lancelot C., Tison J.-L., Wassmann P., Sirven J., Ruiz-Pino D., Gascard J.-C. Role for Atlantic inflows and sea ice loss on shifting phytoplankton blooms in the Barents Sea. J. Geophys. Res.: Oceans, 2017, Vol. 122(6), pp. 5121–5139. doi:10.1002/2016JC012582L
29. Strickland J. D. H., Parsons T. R. A practical handbook of seawater analysis. Bull. Fish. Res. Board Can., 1972, 310 p. Available at: http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1791
30. Johnsen G., Norli M., Moline M., Robbins I., von Quillfeldt C., Sørensen K., Cottier F., Berge J. The advective origin of an under-ice spring bloom in the Arctic Ocean using multiple observational platforms. Polar Biol., 2018, Vol. 41, pp. 1197–1216.
31. Barber D. G., Lukovich J. V., Keogak J., Baryluk S., Fortier L., Henry G. H. R. The changing climate of the Arctic. Arctic, 2008, Vol. 61(5), pp. 7–26. doi:10.14430/arctic98
32. Azam F., Fenchel T., Field J. G. et al. The ecological role of water-column microbes in the sea. Mar. Ecol. Prog. Ser., 1982, Vol. 10, pp. 257–263.
33. Smedsrud L. H., Esau I., Ingvaldsen R. B., Eldevik T., Haugan P. M., Li C., Lien V. S., Olsen A., Omar A. M., Otterå O. H., Risebrobakken B., Sandø A. B., Semenov V. A., Sorokina S. A. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. Rev. Geophys., 2013, Vol. 51(7), pp. 1–35. doi:10.1002/rog.20017
34. Zar J. H. Biostatistical analysis. 4th ed. USA, Prentice-Hall Inc., 1999, 663 p.

Информация об авторах

Елена Ивановна Дружкова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-7891-0800
Игорь Васильевич Берченко – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-3262-2643
Анастасия Владимировна Ващенко – стажер-исследователь, https://orcid.org/0000-0003-0381-6147
Марина Павловна Венгер – научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-4433-8965
Вероника Владимировна Водопьянова – кандидат биологических наук, научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0003-1639-6452
Владимир Геннадьевич Дворецкий – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-1654-8594
Татьяна Геннадьевна Ишкулова – научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-6777-66983
Виктор Витальевич Ларионов – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0003-3945-5013
Павел Робертович Макаревич – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-7581-862X
Алексей Анатольевич Намятов – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-9276-3632
Анатолий Анатольевич Олейник – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0009-0005-2988-7180
Иван Александрович Пастухов – младший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0003-2090-0287
Дмитрий Владимирович Широколобов – техник
Татьяна Ивановна Широколобова – кандидат биологических наук, ведущий инженер, https://orcid.org/0009-0005-7280-5259

Information about the authors

Elena I. Druzhkova – PhD (Biology), Leading Researcher, https://orcid.org/0000-0002-7891-0800
Igor V. Berchenko – PhD (Biology), Senior Researcher, https://orcid.org/0000-0002-3262-2643
Anastasya V. Vashchenko – Trainee Researcher, https://orcid.org/0000-0003-0381-6147
Marina P. Venger – Researcher, https://orcid.org/0000-0002-4433-8965
Veronica V. Vodopianova – PhD (Biology), Research Associate, https://orcid.org/0000-0003-1639-6452
Vladimir G. Dvoretsky – PhD (Biology), Leading Researcher, https://orcid.org/0000-0002-1654-8594
Tatyana G. Ishkulova – Research Associate, https://orcid.org/0000-0002-6777-66983
Victor V. Larionov – PhD (Biology), Senior Researcher, https://orcid.org/0000-0003-3945-5013

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025

Pavel R. Makarevich – Dr. Sci (Biology), Professor, Chief Researcher, https://orcid.org/0000-0002-7581-862X
Alexey A. Namyatov – PhD (Geography), Leading Researcher, https://orcid.org/0000-0002-9276-3632
Anatoliy A. Oleinik – PhD (Biology), Senior Researcher, https://orcid.org/0009-0005-2988-7180
Ivan A. Pastuhov – Junior Researcher, https://orcid.org/0000-0003-2090-0287
Dmitry V. Shirokolobov – Engineer
Tatyana I. Shirokolobova – PhD (Biology), ltading Engineer, https://orcid.org/0009-0005-7280-5259

Статья поступила в редакцию 24.03.2025; одобрена после рецензирования 25.04.2025; принята к публикации 30.05.2025.
The article was submitted 24.03.2025; approved after reviewing 25.04.2025; accepted for publication 30.05.2025.

© Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И., 2025