

УДК 581.526.325(268.45.02)

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЦЕНТРОВ РАННЕВЕСЕННОГО ЦВЕТЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В ПЕЛАГИАЛИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

© 2024 г. П. Р. Макаревич, В. В. Водопьянова, А. С. Булавина, П. С. Ващенко,
А. А. Намятов, И. А. Пастухов

Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Российская Федерация

E-mail: makarevich@mmbi.info

Поступила в редакцию 01.04.2022; после доработки 26.07.2022;
принята к публикации 09.10.2023; опубликована онлайн 22.03.2024.

«Атлантификация» Баренцева моря приводит к уменьшению площади ледяного покрова и увеличению периода открытой воды. Этот процесс влияет на всю пелагическую экосистему Баренцева моря, где основная часть годовой первичной продукции фитопланктона формируется во время весеннего цветения. Концентрация хлорофилла *a* отражает изменения биомассы фитопланктона и может служить показателем его продукционных характеристик. Весной 2021 г. на свободной ото льда акватории Баренцева моря были исследованы гидрологические характеристики водных масс и особенности распределения концентрации хлорофилла *a* и биогенных элементов. Этот год характеризовался отрицательными аномалиями ледовитости. Расположение и протяжённость зон повышенных (или пониженных) концентраций хлорофилла *a* совпали с чередованием водных масс. Были выявлены разобщённые 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 $1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. В это же время в баренцевоморских и арктических водах максимум концентраций не превышал $0,20 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Распределение биогенных элементов соответствовало таковому в зимний период, когда вертикальные градиенты этих параметров ещё не сформировались. Величины насыщения вод кислородом выше уровня 100 % (в разной степени на всей исследованной акватории) характеризовали активизацию процесса фотосинтеза в фитопланктонном сообществе. Анализ многолетних данных свидетельствует, что последующее активное весеннее цветение фитопланктона в годы с отрицательными аномалиями ледовитости наступало уже во второй-третьей декаде апреля в различных типах водных масс Баренцева моря — в арктических, атлантических и прибрежных водах (максимум концентраций хлорофилла *a* достигал $5,69 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ в арктических водах). В мае процесс весеннего цветения охватывал уже всю акваторию Баренцева моря и все типы водных масс (максимум концентраций хлорофилла *a* — $5,08\text{--}5,77 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$). В аномально холодные годы низкое положение ледовой кромки в марте — апреле ограничивало возможную область развития фитопланктона, а активная фаза его цветения (согласно спутниковым данным) наступала гораздо позже, в мае. «Атлантификация» Баренцева моря способствует распространению весеннего цветения фитопланктона на большей акватории, что может влиять на годовые продукционные показатели всей пелагиали.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, весеннее цветение, водные массы, «атлантификация», Баренцево море

Изменение климата оказывает и, по прогнозам, будет продолжать оказывать значительное воздействие на морские экосистемы Арктики с последствиями на различных уровнях: пелагическом, бентическом и симпагическом. Наблюдаемое резкое потепление в арктическом бассейне,

которое началось в 1980-х гг. под влиянием глобальных климатических аномалий [Barber et al., 2008; Comiso, Hall, 2014], привело к изменениям климатических и гидрологических параметров Баренцева моря. В последнее время фиксируются увеличение объёма и повышение температуры атлантических вод, поступающих в Баренцево море, а также связанные с этим беспрецедентное сокращение морского льда и увеличение периода открытой воды [Алексеев, 2015; Boitsov et al., 2012; Zhichkin, 2015].

Термин «атлантификация» впервые был использован, чтобы охарактеризовать периодическую смену вертикальной структуры вод в центральной части Баренцева моря [Reigstad et al., 2002]. В дальнейшем это понятие было расширено на всё Баренцево море и определено как возращание притока атлантических вод, приводящее к сокращению морского льда в море. В настоящее время термин применим уже ко всему бассейну Нансена. Усиление «атлантификации» Северного Ледовитого океана заключается в расширении зоны влияния атлантических вод на его гидрологический и ледовый режим [Аксенов, Иванов, 2018]. Баренцево море, являясь своеобразным теплообменником Северного Ледовитого океана, выделяет большую часть поступающего океанского тепла из Северной Атлантики. Связанный с этим теплообмен между воздухом и морем играет решающую роль как в регулировании климата, так и в определении глубинной циркуляции в Северном Ледовитом океане и за его пределами. Согласно прогнозам климатической модели, весьма вероятно, что охлаждающая роль Баренцева моря будет продолжать расширяться до Карского моря, а затем до Арктического бассейна в условиях потепления климата. В результате арктическая «атлантификация» в будущем станет усиливаться и смещаться к полюсу [Shu et al., 2021].

В настоящее время уровень знаний о том, как климат влияет на сроки начала весеннего цветения фитопланктона, его продолжительность и уровни количественного развития первичных продуцентов арктических вод, остаётся ограниченным. Предполагается, что сокращение площади морского льда в Северном Ледовитом океане приведёт к увеличению первичной продукции фитопланктона [Kahru et al., 2011; Wassmann, 2011]. Этому будут способствовать увеличение площади открытой воды, более продолжительный вегетационный период и дополнительный экспорт углерода в пелагиаль из атмосферы [Lewis et al., 2020]. Все эти факторы могут повлиять на фенологию цветения фитопланктона в Баренцевом море [Dong et al., 2020; Oziel et al., 2017]. Изменение сезонных границ морского льда, связанное с уменьшением ледяного покрова, в Баренцевом море уже привело к смещению весеннего и летнего цветения фитопланктона в северном и восточном направлениях [Oziel et al., 2017].

В арктической и субарктической зоне Мирового океана основная часть годовой первичной продукции формируется во время весеннего цветения фитопланктона; всё дальнейшее развитие экосистемы арктических морей в течение года определяется уровнем весеннего цветения. Под цветением фитопланктона понимают ежегодно повторяющееся повышение его общей биомассы. 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 [Кузнецов, Шошина, 2003; Планктон морей Западной Арктики, 1997; Biological Atlas, 2022]. Начало цветения определяется совпадением ряда физических факторов: таяния льда, количества поступающего света, стратификации водной толщи, ветрового перемешивания, обеспеченности биогенными элементами и т. д. [Fujiwara et al., 2014; Park et al., 2015; Wang et al., 2018]. Цветение начинается, по данным разных авторов, в марте-апреле [Biological Atlas, 2022; Qu et al., 2006] или апреле-мае [Кузнецов, Шошина, 2003; Планктон морей Западной Арктики, 1997]. Основными, доминирующими видами являются представители арктических диатомовых водорослей неритического происхождения [Makarevich et al., 2012]. Весеннее цветение в Баренцевом море достигает своих максимальных значений в мае на всей свободной ото льда акватории, включая зону дрейфующих льдов, и затухает в летние месяцы, а отмеченные в ряде

случаев вспышки фитопланктона летом в прикромочной ледовой зоне носят вторичный, факультативный характер [Кузнецов, Шошина, 2003; Biological Atlas, 2022; Wassmann et al., 2006]. Как правило, исследования *in situ* охватывают только небольшие участки моря (меридиональные или широтные разрезы), что не позволяет сделать выводы об остальной части акватории. Более полную картину можно найти в работах на основе спутниковых наблюдений. Однако для высоких широт получение спутниковых данных затруднено ввиду высокой облачности и связано со значительными их искажениями в результате осреднений.

В марте — апреле 2021 г. были проведены экспедиционные исследования на свободной ото льда акватории Баренцева моря. Целью работы являлось выявление центров ранневесеннего цветения фитопланктона. Для этого определяли концентрацию хлорофилла *a*, изменчивость которой в целом может отражать изменчивость биомассы фитопланктона и служить показателем общего обилия и продуктивности фитопланктонного сообщества.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Работы были проведены в ходе рейса НИС «Дальние Зеленцы» в период с 10 марта по 12 апреля 2021 г. и охватили обширную часть акватории Баренцева моря, свободную ото льда. Было выполнено 9 разрезов в широтном и меридиональном направлении, включавших 52 гидрологические станции и 34 комплексные станции (рис. 1). Нумерация станций и разрезов — в соответствии с рейсовыми записями.

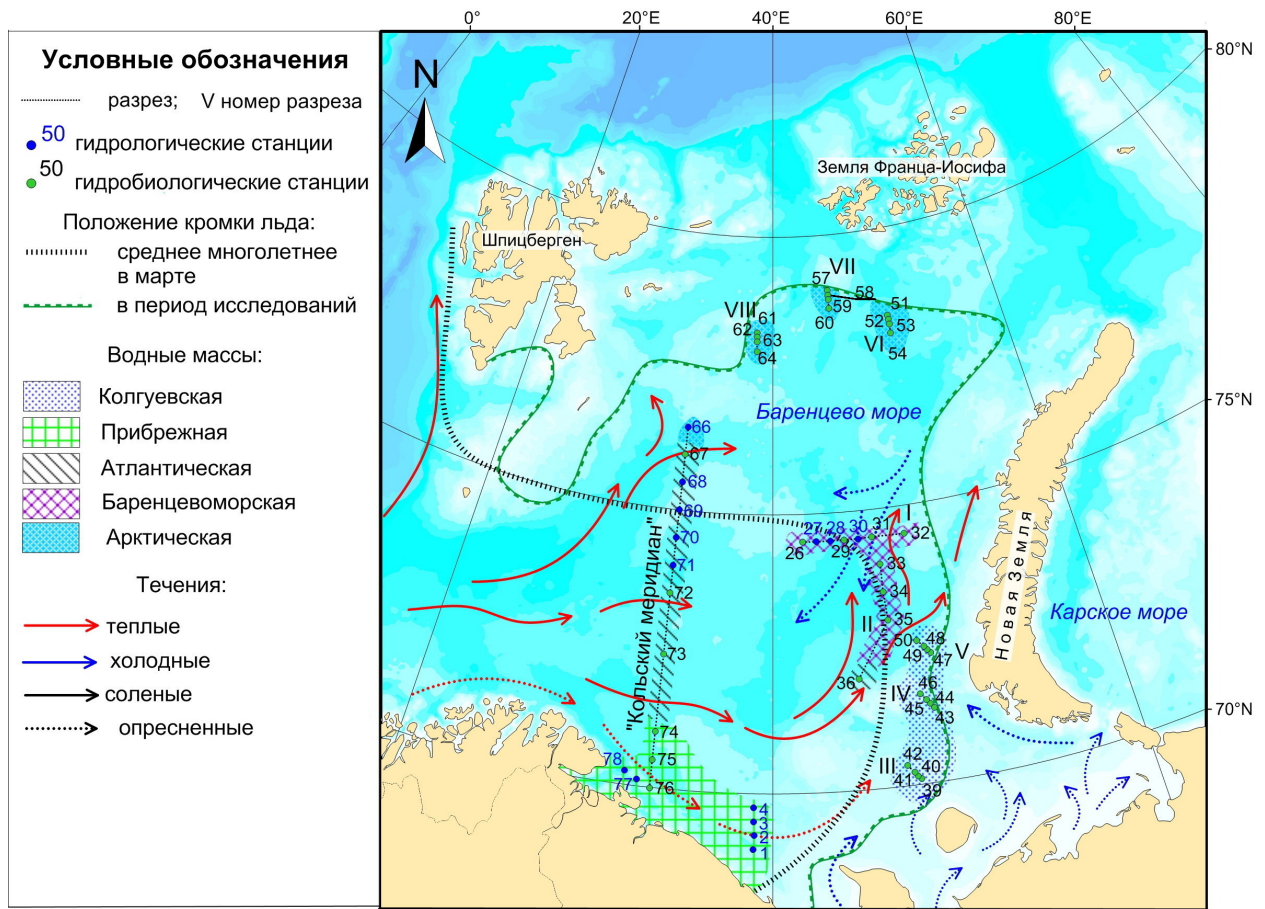


Рис. 1. Расположение станций и ледовые условия, Баренцево море, март — апрель 2021 г. Положение кромки льда по [EOSDIS Worldview, 2022; Johannessen et al., 2007]

Fig. 1. Location of stations and ice conditions, the Barents Sea, March–April 2021. The ice edge location according to [EOSDIS Worldview, 2022; Johannessen et al., 2007]

Для описания гидрологической структуры водных масс в районе исследований были использованы материалы рейсового отчёта [2021]. На 52 станциях был выполнен комплекс гидрологических работ. Температуру и солёность воды определяли с помощью STD-зонда SBE 19plus V2 SeaCAT (Sea-Bird Scientific, США). На основании полученных данных были построены изолинии температуры и солёности вдоль разрезов. Для выделения водных масс использован метод TS-анализа [Мамаев, 1987].

Отбор проб морской воды для последующего определения концентраций хлорофилла *a* (далее — Chl-*a*) ($\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) осуществляли на горизонтах 0, 25 и 50 м. Использовали батометры Нискина на 5 и 10 л (Hydro-Bios, Германия). Всего отобрано и обработано 114 проб. Мы придерживались методических рекомендаций [Aminot, Ray, 2000], основанных на классическом методе определения концентраций Chl-*a* ЮНЕСКО [Determination of Photosynthetic Pigments, 1966]. Отклонения от методики не допускались. Пробы воды объёмом 5 л для каждого горизонта фильтровали немедленно на вакуумной установке в судовой лаборатории. Использовали мембранные фильтры «Владипор» диаметром 47 мм и размером пор 0,6 мкм. После фильтрации фильтры, сложенные пополам осадком внутрь, хранили в морозильной камере в эксикаторе с силикагелем при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дальнейшую обработку образцов проводили в стационарной гидрохимической лаборатории. Осадок экстрагировали 90%-ным ацетоном. После гомогенизации проводили центрифугирование образцов при $8000\text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$. Концентрацию Chl-*a* в экстракте определяли на спектрофотометре Nicolet Evolution 500 (Spectronic Unicam, Великобритания).

Для анализа пространственного распределения концентраций Chl-*a* по всей акватории моря привлекали данные спутникового дистанционного зондирования. Использовали дешифрованные снимки NASA [Ocean Color NASA, 2022]. К анализу привлекали суточные и осреднённые (за месяц) данные. Использовали Level-3 CHL со спутников SeaWiFS (материал за 1998 г.) и MODIS-Aqua (материал за 2021 г.). Данные с сайта NASA импортировали в ГИС-приложение ArcMAP и формировали растровые изображения пространственного распределения Chl-*a* за определённый период.

Для гидрохимических исследований образцы морской воды были отобраны на горизонтах 0, 10, 25, 50 и 100 м и в придонном слое. Концентрации растворённого кислорода (O_2) ($\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$) определяли с помощью анализатора кислорода МАРК-303 (ВЗОР, Россия). Показатель кислотно-щелочного равновесия (рН) измеряли в нефильтрованных пробах воды на иономере И-500 («Аквилон», Россия) с приведением к значению *in situ*. Неорганический растворённый фосфор (P-PO_4) определяли методом Мёрфи и Райли, растворённый кремний (Si-SiO_3) — методом Королёва, нитриты (N-NO_2) и нитратный азот (N-NO_3) — методом Бендшнайдера и Робинсона [Руководство по химическому анализу, 2003; Chemical Methods, 1983; Methods of Seawater Analysis, 1999]. Показатели измеряли на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ («Экротхим», Россия).

При анализе данных использовали значения содержания атлантических (fa, %) и речных (fr, %) вод, а также вод, трансформированных в результате ледообразования/ледотаяния (fi, %). Эти величины получены расчётным путём по представленным в работе А. А. Намятова [2021a] зависимостям.

Эти зависимости получены при анализе 2200 результатов параллельных определений солёности и изотопного параметра $\delta^{18}\text{O}$ в период с 1978 по 2014 г. в Баренцевом море разными авторами, в различные времена года и на различных горизонтах. Обоснование возможности использования данных зависимостей за пределами имеющегося ряда наблюдений солёность — $\delta^{18}\text{O}$ рассмотрено А. А. Намятовым [2021b].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Водные массы на выполненных разрезах. Баренцевоморская водная масса. Разрезы I и II были выполнены 21–26 марта в районе Центральной котловины Баренцева моря. Поверхность воды в этом районе не охлаждается зимой так сильно, как в юго-восточной части моря, благодаря действию тёплых атлантических течений. На станциях разреза I водная толща была хорошо перемешана от поверхности до дна и занята баренцевоморскими водами, которые имели температуру 0...–0,5 °C и солёность 34,72–34,83 PSU (рис. 2).

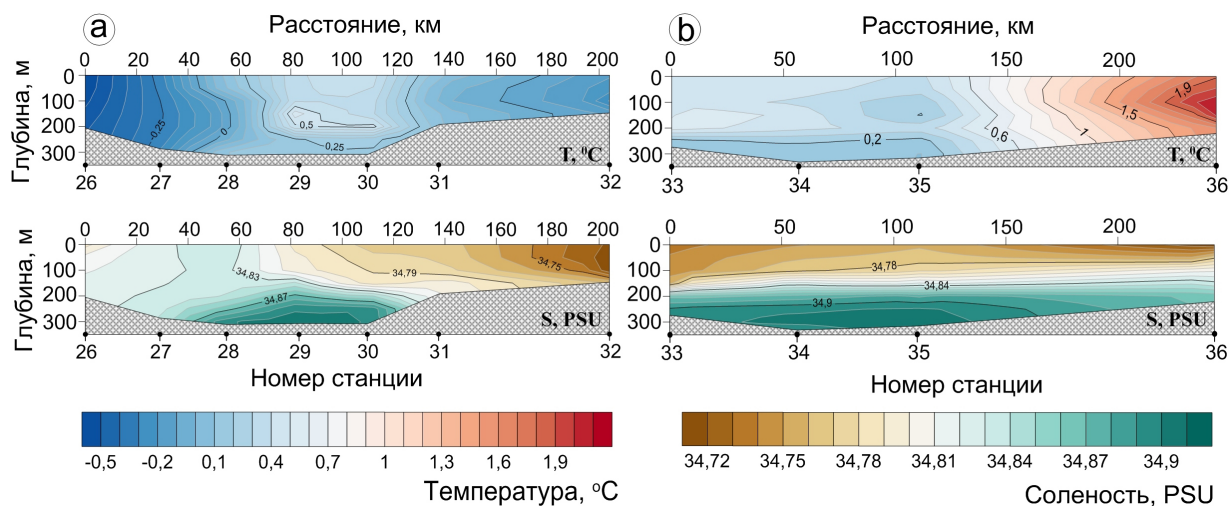


Рис. 2. Температура (T, °C) и солёность (S, PSU) на разрезах: а — разрез I; б — разрез II

Fig. 2. Temperature (T, °C) and salinity (S, PSU) at the transects: a, transect I; b, transect II

В наиболее глубоководной части разреза (ст. 28–30) на глубинах более 150 м ощущалось влияние атлантических течений, выраженное незначительным повышением температуры (до +0,5 °C) и солёности (до 34,91 PSU). На ст. 33–35 разреза II перемешанный слой воды распространялся до глубины 100–150 м. Его характеристики температуры и солёности соответствовали баренцевоморским. Под перемешанным слоем температура несколько снижалась, а солёность возрастала. На ст. 36 на глубине около 100 м обнаруживалась тёплая (+2,2 °C) струя трансформированных атлантических вод Новоземельского течения, сохранивших свою идентичность только в поле температур (не в поле солёностей).

На ст. 32 разреза I, наиболее приближенной к кромке льда, зарегистрировано максимальное значение насыщенности воды растворённым кислородом — 102 %. Величина в более западной части разреза не превышала 100 %.

Колгуевская водная масса. Съёмка с высоким пространственным разрешением (расстояние между станциями от 5 до 10 морских миль) была проведена вблизи кромки льда в северной и юго-восточной частях моря. Разрезы III, IV и V располагались в юго-восточной части Баренцева моря. В эту часть с Беломорским течением поступает вода из Белого моря с солёностью около 33 PSU. Наибольшая солёность в данном районе наблюдается в период с ноября по февраль. Понижение солёности, связанное с поступлением опреснённых вод из Белого моря, начинается уже в марте и затрагивает не только поверхностный слой, но и промежуточный и даже придонный [Ожигин и др., 2016]. В течение зимних месяцев свободная ото льда акватория Баренцева моря интенсивно охлаждается. Под действием конвективного и ветрового перемешивания в этот период образуется относительно однородный по температуре и солёности слой толщиной 100–150 м. В мелководных районах моря перемешивание может достигать дна. Структура водной толщи усложняется весной в связи с началом таяния льда. Работы здесь были

выполнены 27–29 марта, когда весеннее таяние льда ещё не началось. На разрезах III и IV температура и солёность с глубиной монотонно росли. Температура поверхности воды составляла $-1,8...-1$ °C, у дна была близка к 0 °C, а на некоторых станциях достигала положительных значений (рис. 3).

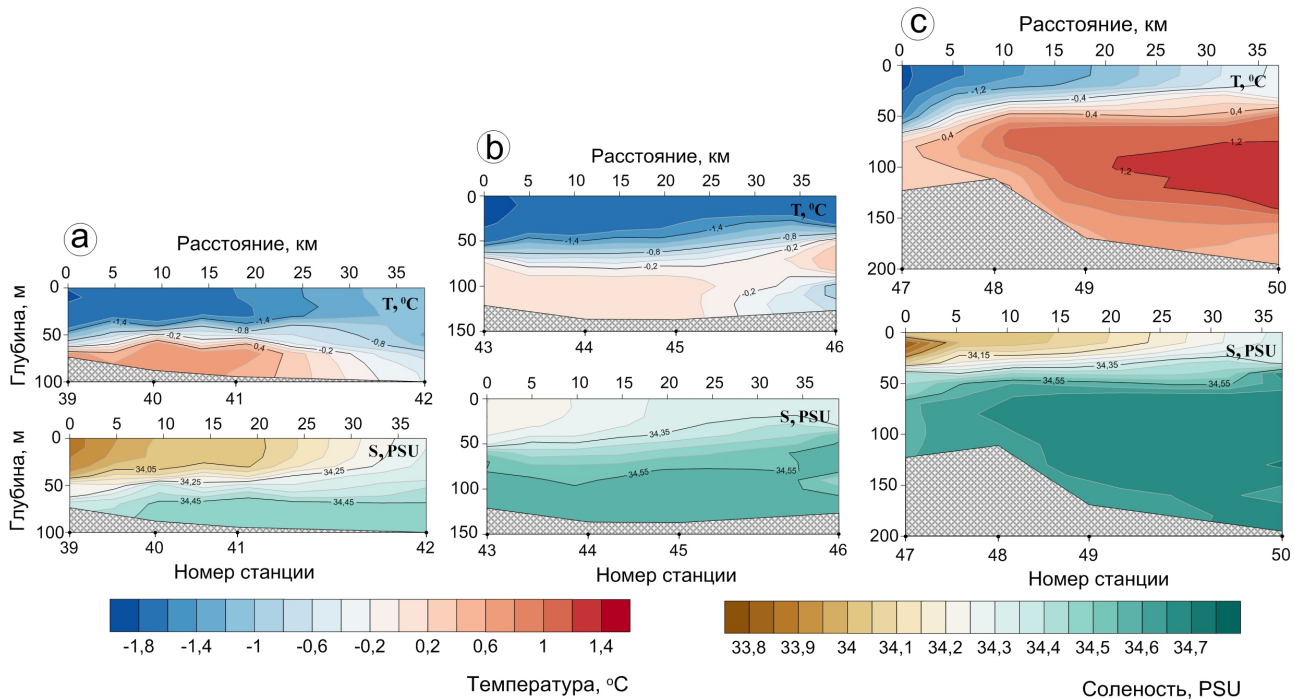


Рис. 3. Температура (T, °C) и солёность (S, PSU) на разрезах: а — разрез III; б — разрез IV; с — разрез V

Fig. 3. Temperature (T, °C) and salinity (S, PSU) at the transects: a, transect III; b, transect IV; c, transect V

Минимальное значение солёности на поверхности составляло 33,9 PSU. Максимальное было зафиксировано у дна — 34,6 PSU. На разрезе V (ст. 49 и 50) на глубине 100 м была обнаружена струя тёплых вод ($+1,4$ °C) с солёностью 34,7 PSU. Эти станции приурочены к Северо-Новоземельскому жёлобу, являющемуся одним из путей распространения трансформированных атлантических вод Новоземельского течения. В общем виде станции разрезов III, IV и V могут быть отнесены к колгуевской структуре водных масс. В районе этих разрезов характеристики и структура водной толщи определяются преимущественно поступлением опреснённых вод из Белого моря, большим объёмом речного стока в юго-восточную часть Баренцева моря и интенсивным перемешиванием вод до дна в осенне-зимний период.

Восточные станции этих разрезов были выполнены в непосредственной близости от кромки льда. На данных станциях величины насыщенности вод растворённым кислородом были ниже 100 %. Однако при удалении от кромки на северо-запад было зарегистрировано превышение пороговой величины в 100 %, что указывает на положение первых весенних очагов активизации процесса фотосинтеза. На более южном разрезе III эта область приурочена к поверхностному слою ст. 42 (101 %), а на более северных разрезах IV и V область с наибольшими значениями данной величины была расположена в слое 40–60 м. Максимумы составляли 101 и 104 % соответственно. Распределение остальных биогенных элементов по разрезам было пятнообразным.

Арктическая водная масса. Разрезы VI, VII и VIII были выполнены 31 марта — 3 апреля в северной части моря вблизи ледовой кромки; талый слой в период исследований отсутствовал. На разрезах VI и VII вся водная толща была занята водой арктического происхождения.

Температура и солёность увеличивались с глубиной, у дна достигали $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $34,82\text{ PSU}$ соответственно (рис. 4). На разрезе VIII также преобладали арктические воды, однако на ст. 61 и 64 у дна ощущалось влияние атлантических вод. Температура достигала положительных значений ($+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). В этом районе существует сложная система течений, способных приносить как атлантические воды с западной границы Баренцева моря, так и сильно трансформированные атлантические воды, прошедшие через Арктический бассейн.

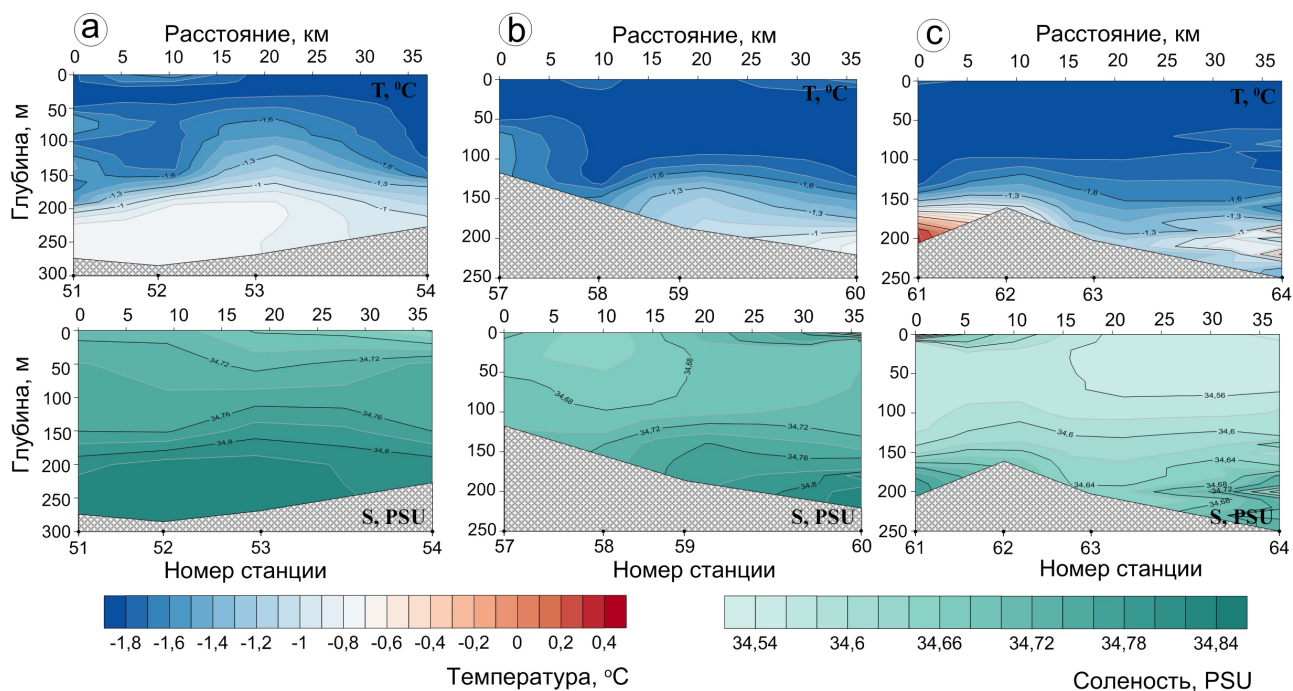


Рис. 4. Температура (T , $^{\circ}\text{C}$) и солёность (S , PSU) на разрезах: а — разрез VI; б — разрез VII; с — разрез VIII

Fig. 4. Temperature (T , $^{\circ}\text{C}$) and salinity (S , PSU) at the transects: a, transect VI; b, transect VII; c, transect VIII

Превышение насыщения воды кислородом фиксировали в поверхностном слое на протяжении почти всего разреза VIII, являющегося наиболее западным в этой группе разрезов. В поверхностном слое южной его части величина насыщения кислородом достигала 105% (ст. 64), а превышение порогового значения в 100% в поверхностном слое было отмечено фактически на протяжении всего разреза. В поверхностном слое других, более восточных разрезов в этой водной массе величины насыщения кислородом были менее 100% : значения составляли $98\text{--}99\%$.

Атлантическая и прибрежная водные массы. Работы на стандартном океанографическом разрезе «Кольский меридиан» были выполнены $8\text{--}12$ апреля. Разрез располагался на пути распространения тёплых вод Нордкапского течения и опреснённых вод Мурманского прибрежного течения. В южной части разреза (ст. 74–76) понижение солёности (до $34,44\text{--}34,65\text{ PSU}$) обусловлено пресноводным стоком рек Северной Норвегии и Кольского полуострова, переносимым Норвежским и Мурманским течениями (рис. 5). Граница распространения опреснённых прибрежных вод определялась на поверхности моря между ст. 74 и 73. В центральной части разреза (ст. 67–73) определялись атлантические воды высокой солёности ($34,95\text{ PSU}$). На ст. 66 основная водная толща была занята арктическими водами, имеющими отрицательную температуру ($-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) и пониженную солёность ($34,44\text{ PSU}$). У дна на ст. 66 определялся слой более тёплой ($+0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) и более солёной ($34,84\text{ PSU}$) трансформированной атлантической воды.

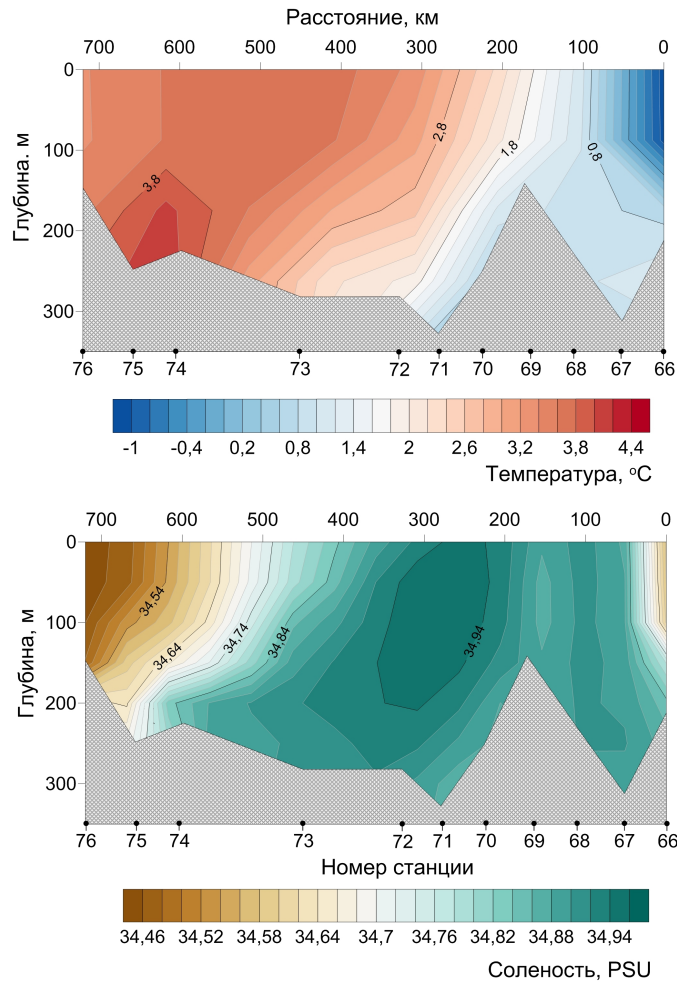


Рис. 5. Температура (T, °C) и солёность (S, PSU) на разрезе «Кольский меридиан»
Fig. 5. Temperature (T, °C) and salinity (S, PSU) at transect “Kola Meridian”

На этом разрезе, в отличие от других, в поверхностном слое от южных до северных станций насыщение вод растворённым кислородом превышало 100 %. В поверхностном слое атлантических вод величина изменялась от 100 до 102 %; значение резко возросло до 108 % в холодных арктических водах в северной части разреза.

Гидрохимические показатели водных масс. Все водные массы Баренцева моря состоят из трёх базовых вод — атлантических, речных и трансформированных в результате ледообразования/ледотаяния [Namyatov, 2021a]. Изменение соотношения этих вод в течение года в результате их адвекции из других акваторий и в результате вертикального перемешивания может значительно влиять на характер годового цикла изменчивости исследуемого элемента. В табл. 1 представлены средние значения и среднеквадратичные отклонения концентраций рассматриваемых биогенных элементов, величин температуры и солёности, а также значения содержания атлантических (fa, %) , речных (fr, %) и талых вод (fi, %) в описанных нами водных массах в марте — апреле 2021 г.

Общей чертой распределения биогенных элементов (P-PO₄, N-NO₃ и Si-SiO₃) на всех выполненных разрезах является их соответствие зимнему типу, когда вертикальные градиенты этих параметров ещё не сформировались. Придонные слои характеризовались наименьшими величинами насыщенности воды растворённым кислородом (до 94 %) и повышенными концентрациями минеральных форм фосфора, азота и кремния.

Таблица 1. Средние значения и среднеквадратичные отклонения величин температуры (Т, °С) и солёности (S, PSU), концентраций биогенных элементов, а также значения содержания атлантических (fa, %), речных (fr, %) и талых вод (fi, %) в слое 0–10 м, март — апрель 2021 г.

Table 1. Mean values and standard deviations of temperature (T, °C) and salinity (S, PSU), concentrations of nutrients, and the values of the content of Atlantic waters (fa, %), river waters (fr, %), and meltwater (fi, %) in the 0–10-m layer, March–April 2021

Водная масса	Кол		Бар		Арк		Атл	Пр
	a	b	a	b	a	b	b	b
№ ст.	39, 43, 47	40–42, 44, 46, 48–50	32	26, 29, 31	51, 57, 61, 66	52–54, 58–60, 62–64	67–73	74–76
T, °C	-1,82 ± 0,02	-1,40 ± 0,46	-0,19	-0,07 ± 0,42	-1,64 ± 0,31	-1,82 ± 0,06	2,16 ± 1,30	3,54 ± 0,05
S, PSU	34,00 ± 0,18	34,18 ± 0,14	34,72	34,8 ± 0,01	34,67 ± 0,09	34,65 ± 0,08	34,91 ± 0,04	34,49 ± 0,05
fa, %	97,0	97,5	99,1	99,2	98,9	98,8	99,6	98,4
fa, min–max, %	96,4–97,5	97,0–97,9		99,2–99,3	98,6–99,4	98,4–99,5	99,3–99,7	98,2–98,6
fr, %	2,55	2,09	0,69	0,53	0,84	0,90	0,24	1,29
fr, min–max, %	2,04–3,09	1,71–2,54		0,51–0,58	0,41–1,10	0,31–1,67	0,34–3,89	1,13–1,40
fi, %	0,49	0,43	0,23	0,21	0,26	0,29	0,16	0,33
fi, min–max, %	0,43–0,55	0,39–0,49		0,21–0,22	0,19–0,30	0,17–0,31	0,14–0,21	0,30–0,34
O ₂ , мл·л ⁻¹	8,32 ± 0,12	8,42 ± 0,09	8,16	8,02 ± 0,08	8,48 ± 0,32	8,40 ± 0,19	7,84 ± 0,42	7,42 ± 0,04
O ₂ , min–max, %	97,7–100,6	98,3–107,5	99,3–101,9	100,4	97,3–108,1	105,1	98,2–108,9	99,7–101,5
P-PO ₄ , μM	0,36 ± 0,11	0,35 ± 0,09	0,59	0,50 ± 0,10	0,53 ± 0,08	0,47 ± 0,12	0,50 ± 0,10	0,44 ± 0,10
N-NO ₃ , μM	4,61 ± 1,20	5,33 ± 0,87	7,53	8,57 ± 0,33	7,18 ± 1,58	7,14 ± 0,67	10,7 ± 0,74	7,19 ± 0,61
Si-SiO ₃ , μM	2,67 ± 0,52	1,93 ± 0,75	2,40	1,88 ± 0,41	1,95 ± 0,31	1,55 ± 0,54	3,16 ± 0,87	2,14 ± 0,33

Примечание: Кол — колгуевская водная масса; Бар — баренцевоморская водная масса; Арк — арктическая водная масса; Атл — атлантическая водная масса; Пр — прибрежная водная масса; а — станции, ближайшие к кромке льда; b — станции, расположенные на открытой воде.

Note: Кол, Kolguyev water mass; Бар, Barents Sea water mass; Арк, Arctic water mass; Атл, Atlantic water mass; Пр, coastal water mass; a, stations closest to the ice edge; b, stations located in open water.

Концентрация хлорофилла *a* на выполненных разрезах. На разрезах I и II (баренцевоморские воды) концентрации Chl-*a* составили в поверхностном слое ($0,11 \pm 0,05$) и ($0,13 \pm 0,02$) мг·м⁻³ соответственно; на глубине 25 м — ($0,15 \pm 0,04$) и ($0,16 \pm 0,01$) мг·м⁻³ соответственно; на глубине 50 м абсолютные значения были сопоставимы с таковыми поверхностного слоя (рис. 6а, б). Единственная станция разреза II, расположенная в атлантических водах (ст. 36), по концентрациям Chl-*a* не отличалась от остальных станций, выполненных в баренцевоморских водах.

Разрезы III, IV и V (рис. 6d, e, f), выполненные на юго-востоке моря, находились под влиянием колгуевской водной массы. На станциях разреза III вблизи кромки льда (ст. 39 и 40) концентрации Chl-*a* в среднем составили ($0,23 \pm 0,04$) мг·м⁻³ (0 м), ($0,18 \pm 0,09$) мг·м⁻³ (25 м) и ($0,22 \pm 0,03$) мг·м⁻³ (50 м) (рис. 6d). На ст. 41 и 42 содержание Chl-*a* значительно

увеличилось — до $1,14 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (0 м); средние показатели здесь были наиболее высокими для всей колгуевской водной массы — $(0,96 \pm 0,28) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (0 м), $(0,87 \pm 0,27) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (25 м) и $(0,60 \pm 0,40) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (50 м) (рис. 6d). Ст. 41 и 42 характеризовались незначительным увеличением температуры воды на поверхности по сравнению с таковой на ст. 39 и 40. Возможно, ст. 41 и 42 испытывали влияние прибрежных вод Кольского полуострова, переносимых Мурманским течением (см. рис. 1). Таким образом, существует вероятность адвекции фитопланктона прибрежных вод Кольского полуострова в район ст. 41 и 42. Это могло способствовать более раннему началу цветения здесь, чем на остальных станциях в юго-восточной части Баренцева моря. На разрезе IV (рис. 6e) отмечено снижение содержания Chl-*a*; при этом концентрации в слое 0–50 м изменялись незначительно, составляя $(0,36 \pm 0,13) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (0 м), $(0,32 \pm 0,10) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (25 м) и $(0,26 \pm 0,11) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (50 м). На разрезе V (рис. 6f) более высокие концентрации Chl-*a* были сосредоточены в поверхностном слое, $(0,52 \pm 0,05) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, и на 25-метровой глубине, $(0,54 \pm 0,10) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$; на глубине 50 м значение снижалось до $(0,19 \pm 0,03) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$.

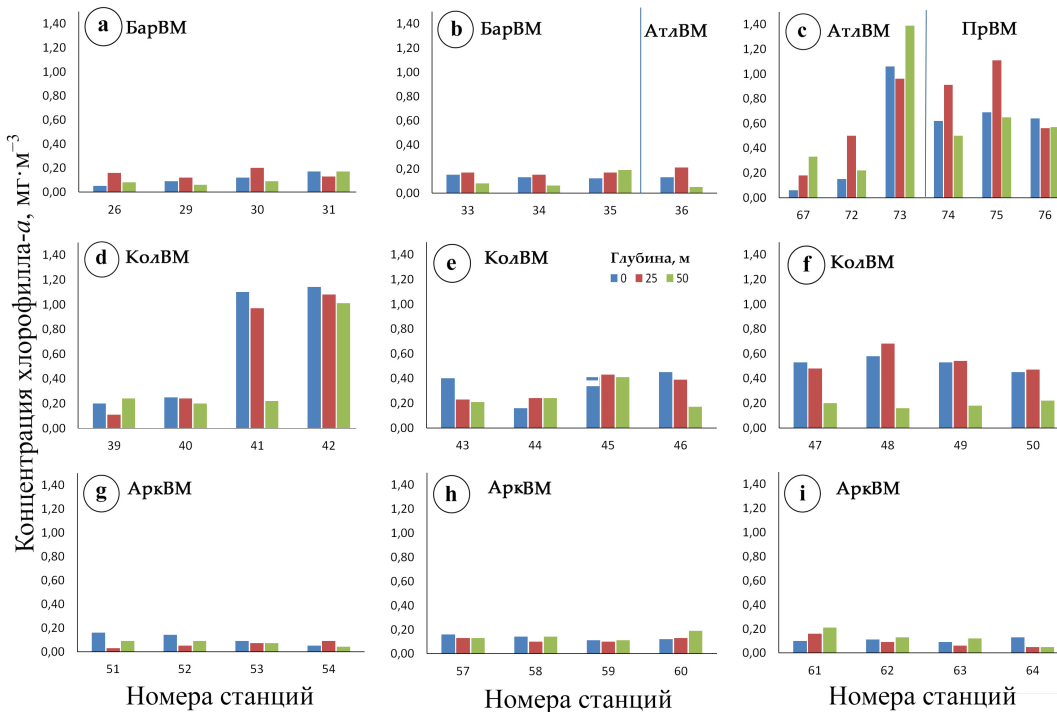


Рис. 6. Концентрация хлорофилла *a* ($\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) на разрезах: а — разрез I; б — разрез II; в — разрез «Кольский меридиан»; д — разрез III; е — разрез IV; ф — разрез V; г — разрез VI; h — разрез VII; и — разрез VIII (БарВМ — баренцевоморские воды; КолВМ — колгуевские воды; АтлВМ — атлантические воды; АркВМ — арктические воды; ПрВМ — прибрежные воды)

Fig. 6. Chlorophyll *a* concentrations ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) at the transects: a, transect I; b, transect II; c, transect “Kola Meridian”; d, transect III; e, transect IV; f, transect V; g, transect VI; h, transect VII; i, transect VIII (БарВМ, Barents Sea waters; КолВМ, Kolguyev waters; АтлВМ, Atlantic waters; АркВМ, Arctic waters; ПрВМ, coastal waters)

Прикромочные разрезы VI, VII и VIII были выполнены на севере акватории, в арктической водной массе. Низкие концентрации Chl-*a*, не более $(0,13 \pm 0,02) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, были распределены относительно равномерно как в толще воды, так и между станциями всех трёх разрезов (рис. 6g, h, i).

Наиболее протяжённый разрез — «Кольский меридиан» (рис. 6c) — включал станции, выполненные в различных водных массах. Ст. 74–76 находились в прибрежных водах. Средние значения концентрации Chl-*a* были достаточно высокими во всём слое 0–50 м — $(0,65 \pm 0,04) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (0 м), $(0,86 \pm 0,28) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (25 м) и $(0,57 \pm 0,08) \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (50 м). Максимальное

содержание Chl-*a* отмечено на горизонте 25 м для ст. 74 и 75: значения составили 0,91 и 1,11 мг·м⁻³ соответственно. Ст. 67, 72 и 73 были выполнены в атлантических водах. При этом на ст. 73 концентрации Chl-*a* были высокими — максимум 1,39 мг·м⁻³ (50 м). Обращает на себя внимание близость данной станции к области распространения прибрежных вод. Термохалинные характеристики водной толщи здесь больше соответствовали таковым атлантической воды, чем прибрежной. Однако солёностный фронт на поверхности моря проходил между ст. 74 и 73, а температурный — между ст. 73 и 72. Таким образом, ст. 73 оказалась в области интенсивного взаимодействия двух типов вод. В атлантических водах мы не обнаружили высоких концентраций Chl-*a*. Это позволяет предполагать, что причина его более высоких концентраций на ст. 73 кроется в развитии фитопланктона, поступающего из прибрежных вод. На ст. 67 и 72, расположенных в атлантических водах за пределами фронтальной зоны, средние значения концентрации Chl-*a* были низкими — не более (0,34 ± 0,23) мг·м⁻³ (25 м).

По данным нашего исследования, в конце марта — начале апреля 2021 г. пространственное распределение концентраций Chl-*a*, их абсолютные и средние значения существенно различались в разных по происхождению водах Баренцева моря (рис. 7). Как и в предыдущих исследованиях [Makarevich et al., 2021, 2022], линейной зависимости между изменениями концентраций Chl-*a* и температурными или солёностными характеристиками воды не наблюдалось. Динамика концентрации Chl-*a*, по-видимому, связана не с термохалинными характеристиками водных масс, а с их происхождением и путями миграции. Концентрации Chl-*a*, осреднённые для слоя 0–50 м, распределялись в пределах каждой из выделенных водных масс достаточно равномерно, за исключением таковых на ст. 41, 42 и 73 (рис. 7). Вероятнее всего, ст. 41 и 42 (колгуевские воды) и ст. 73 (атлантические воды) испытывали влияние мурманских прибрежных вод.

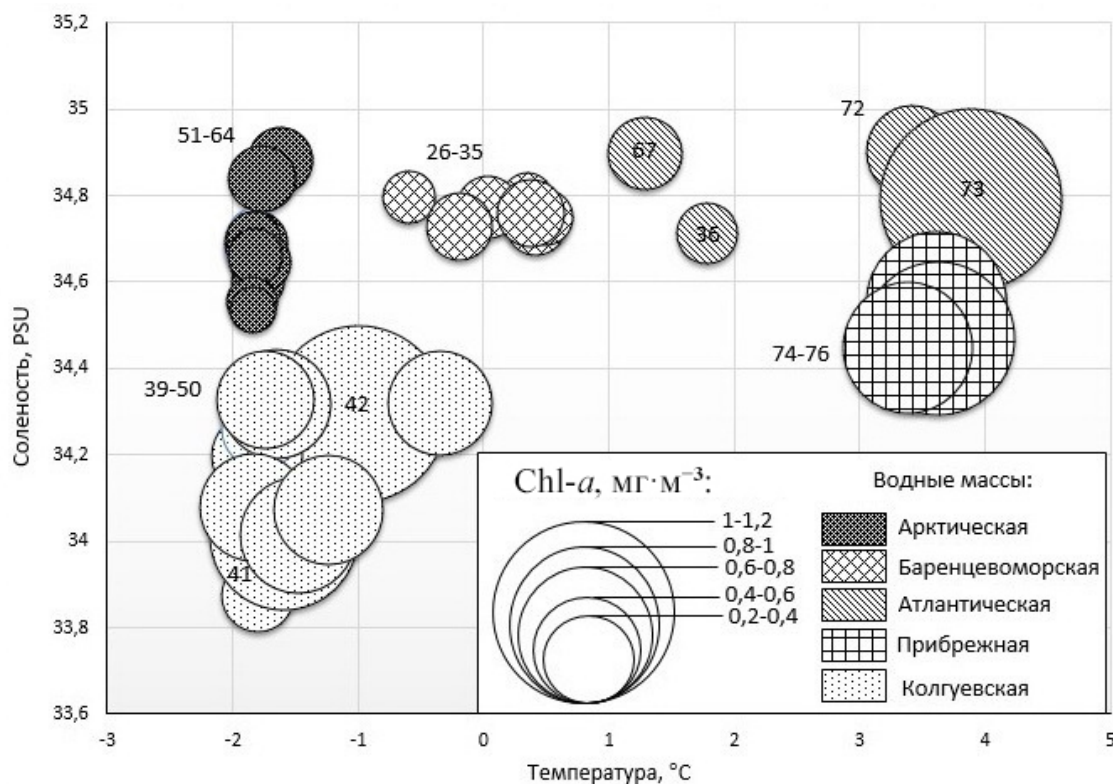


Рис. 7. Концентрации хлорофилла *a* (Chl-*a*, мг·м⁻³), осреднённые для горизонта 0–50 м, в области TS-диаграммы

Fig. 7. Concentrations of chlorophyll *a* (Chl-*a*, mg·m⁻³) averaged for a seawater horizon of 0–50 m on a TS diagram

ОБСУЖДЕНИЕ

Начало весенней вегетации фитопланктона в незамерзающих частях Баренцева моря приходится на конец марта — начало апреля и приурочено в первую очередь к мелководным районам юго-восточной части баренцевоморской акватории и к водам вблизи кромки льда [Biological Atlas, 2022]. Весенний максимум развития фитопланктона формируется в основном за счёт ранневесенних аркто-бореальных неритических диатомовых водорослей [Makarevich et al., 2012].

Цветение фитопланктона в Баренцевом море очень чувствительно к сезонным и межгодовым изменениям площади морского льда, к распределению водных масс и океанических фронтов [Oziel et al., 2017]. Основными экологическими факторами, контролирующими баренцевоморское весеннее цветение фитопланктона, являются быстро увеличивающаяся суточная суммарная освещённость, наличие максимальных концентраций питательных веществ в пелагиали, вертикальное перемешивание, положение полярного фронта и границы ледяного покрова [Kogeler, Rey, 1999; Signorini, McClain, 2009]. Дополнительный механизм, запускающий весеннее цветение на акваториях в районах таяния морского льда вдоль ледовой кромки Баренцева моря, — талые воды [Dong et al., 2020; Oziel et al., 2017]. В мелководных районах Баренцева моря важным регулирующим фактором начала весеннего цветения является вынос спор и клеток фитопланктона из донных отложений, а наличие процессов вертикального перемешивания толщи воды может способствовать цветению микроводорослей в фотическом слое пелагиали [Eilertsen et al., 1993]. Весеннее цветение — это ежегодное и кратковременное повышение биомассы фитопланктона и его численности. В открытой части Баренцева моря регистрируют один весенний максимум развития фитопланктона. В начале весеннего цветения концентрации Chl-*a* в Баренцевом море сперва достигают значений порядка $0,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, а затем резко повышаются. Они могут составлять $6\text{--}14 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ [Makarevich et al., 2022; Reigstad et al., 2002]. Максимум цветения непродолжителен, и после него происходит быстрое снижение показателей продуктивности сообществ пелагических микроводорослей. Мощное (стремительное) цветение микроводорослей приводит к быстрому падению запасов питательных веществ в верхних слоях пелагиали, а наличие резкой стратификации препятствует пополнению этого запаса из нижележащих слоёв [Кузнецов, Шошина, 2003].

По данным многолетних наблюдений, самый ледовитый месяц для Баренцева моря — март. Обычно в марте льдом покрыта вся восточная часть моря. В западной его части льды распрстраняются на юг вплоть до 75° с. ш. До середины апреля продолжается увеличение площади льда, затем начинается постепенное отступление кромки льда на север и восток. В мае ото льда освобождается вся центральная часть моря, а в конце июня и начале июля — Печорское море и побережье архипелага Новая Земля [Johannessen et al., 2007]. Сезонное положение кромки льда в разные годы может существенно отличаться от среднего многолетнего. В аномально холодные годы, последним из которых был 1998 г., в период своего максимального развития лёд занимал значительно бóльшую площадь и дольше задерживался на акватории моря. В такие годы его юго-восточная часть была полностью или частично покрыта льдом вплоть до середины июля. Согласно данным дистанционного спутникового мониторинга, низкие концентрации Chl-*a* в марте — апреле аномально холодного 1998 г. исключали стадию весеннего цветения в сукцессионном цикле фитопланктона. Только в мае были зарегистрированы максимальные концентрации Chl-*a* и активное развитие фитопланктона на всей акватории Баренцева моря, свободной ото льда (рис. 8). В аномально тёплые годы уже в конце мая побережье Новой Земли и Печорское море могут быть полностью свободны ото льда. Как в тёплые годы, так и в холодные на протяжении всего года свободна ото льда юго-западная часть Баренцева моря. В 2021 г. были отмечены отрицательные аномалии ледовитости Баренцева моря. В мае 2021 г. начало освобождаться ото льда

Печорское море, а прибрежные воды Новой Земли к середине мая были уже полностью свободны ото льда. Данные дистанционного спутникового мониторинга концентраций Chl-*a* за 2021 г. указывают на то, что в этом году, в отличие от аномально холодного года, уже в апреле было зафиксировано активное развитие фитопланктона в юго-восточной части Баренцева моря и на отдельных участках остальной акватории. В мае процесс развития фитопланктона распространился в центральном и северном направлениях, охватив практически всю акваторию моря (рис. 8).

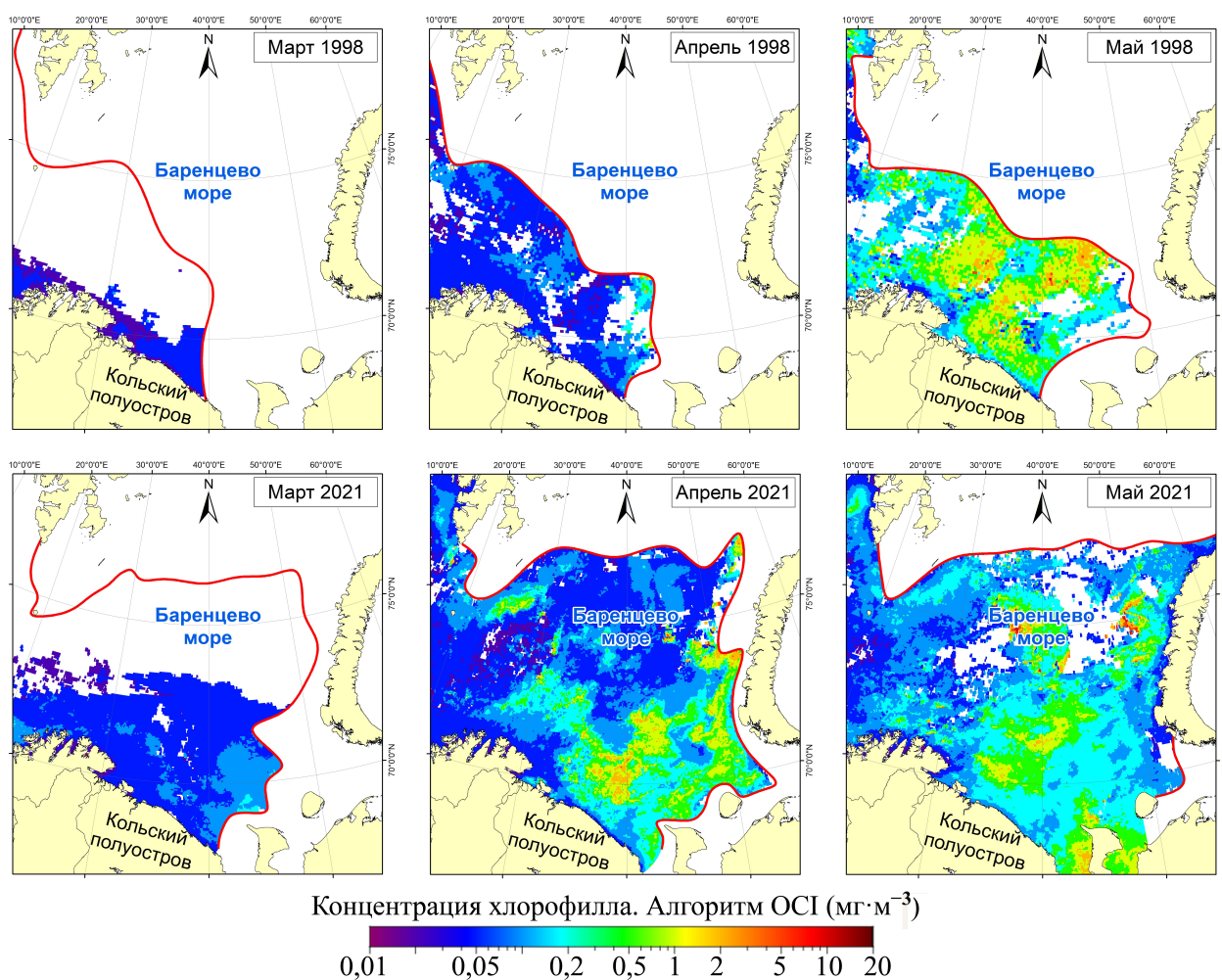


Рис. 8. Осреднённые за месяц концентрации хлорофилла *a* ($\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$), рассчитанные по спутниковым данным [Ocean Color NASA, 2022]. Красная линия — среднее положение кромки льда за месяц по данным [EOSDIS Worldview, 2022; Johannessen et al., 2007]

Fig. 8. Monthly averaged chlorophyll *a* concentrations ($\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) according to satellite data [Ocean Color NASA, 2022]. The red line is the average position of the ice edge for the month according to [EOSDIS Worldview, 2022; Johannessen et al., 2007]

Многолетние наблюдения *in situ* за особенностями распределения концентраций Chl-*a* в различных по происхождению типах вод Баренцева моря позволяют систематизировать эти данные для тёплых лет. На рис. 9 представлены осреднённые данные концентраций Chl-*a* в различных водных массах (слой 0–50 м) Баренцева моря в весенний период — в марте 2021 г., апреле 2016, 2018, 2019 [Makarevich et al., 2022] и 2021 гг., мае 2016 и 2018 гг. [Makarevich et al., 2021, 2022] и июле 2017 г. [Vodopianova et al., 2019]. Отметим, что 2016, 2017, 2018 и 2019 гг. характеризовались отрицательными аномалиями ледовитости и сопоставимы с 2021 г.

По нашим данным, в годы с отрицательными аномалиями ледовитости уже в третьей декаде марта — первой декаде апреля можно наблюдать начало весеннего цветения. Обширная акватория, свободная ото льда, способствует развитию этого процесса в нескольких разобщённых районах — на юго-западе и юго-востоке моря. Места локализации повышенных концентраций Chl-*a* отмечены в прибрежных, атлантических и колгуевских водах.

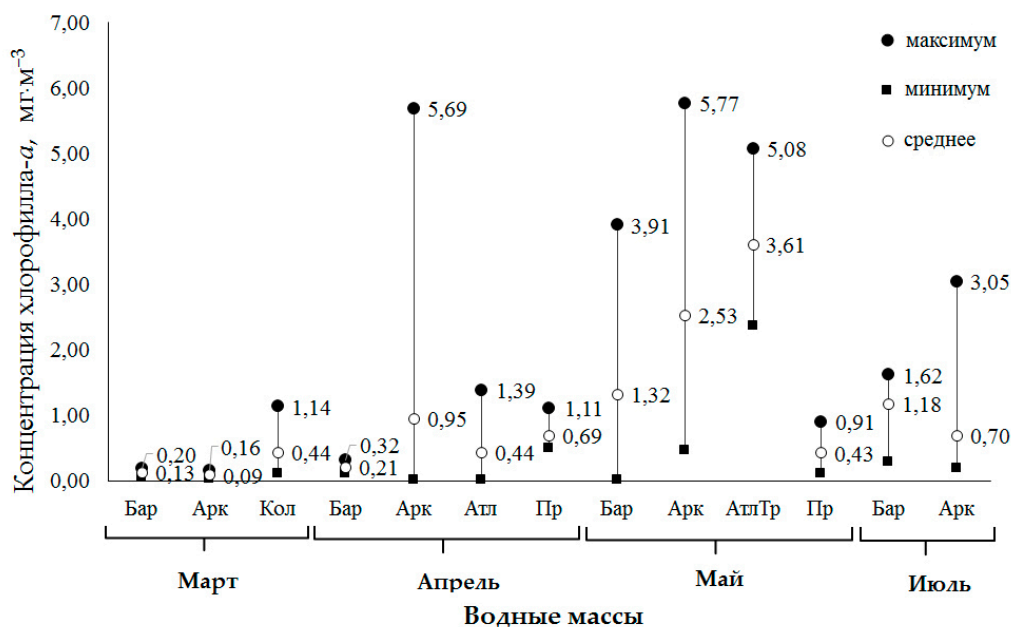


Рис. 9. Концентрации хлорофилла *a* (мг·м⁻³), осреднённые для слоя 0–50 м и водных масс Баренцева моря: март 2021 г.; апрель 2016, 2018, 2019 [Makarevich et al., 2022] и 2021 гг.; май 2016 и 2018 гг. [Makarevich et al., 2021, 2022]; июль 2017 г. [Vodopianova et al., 2019] (Бар — баренцевоморские воды; Кол — колгуевские воды; Атл — атлантические воды; АтлТр — трансформированные атлантические воды; Арк — арктические воды; Пр — прибрежные воды)

Fig. 9. Chlorophyll *a* concentrations (mg·m⁻³) averaged for 0–50-m layer and water masses in the Barents Sea: March 2021; April 2016, 2018, 2019 [Makarevich et al., 2022], and 2021; May 2016 and 2018 [Makarevich et al., 2021, 2022]; July 2017 [Vodopianova et al., 2019] (Бар, Barents Sea waters; Кол, Kolguyev waters; Атл, Atlantic waters; АтлТр, transformed Atlantic waters; Арк, Arctic waters; Пр, coastal waters)

Согласно литературным сведениям, прибрежные воды Баренцева моря характеризуются наличием нескольких вспышек развития фитопланктона (3–4) в течение вегетационного периода, однако среднее содержание Chl-*a* во время активного развития в прибрежной зоне на юго-западе Баренцева моря невысоко и составляет порядка 1 мг·м⁻³ [Кузнецов, Шошина, 2003]. По нашим данным, в марте средние показатели содержания Chl-*a* в колгуевских водах, которые являются прибрежными по своему происхождению, были выше, чем в других водных массах (среднее 0,44 мг·м⁻³). В апреле концентрация Chl-*a* в прибрежных водах на юго-западе составила в среднем 0,64 мг·м⁻³, а в мае значение снизилось до 0,43 мг·м⁻³ (рис. 9).

В арктических и баренцевоморских водах в марте содержание Chl-*a* было очень низким. В баренцевоморских водах показатель в среднем составил 0,13 мг·м⁻³. Столь же низкие концентрации Chl-*a* в баренцевоморских водах были зарегистрированы в апреле (среднее 0,21 мг·м⁻³), и лишь в мае значения достигли существенных величин (среднее 1,32 мг·м⁻³) (рис. 9). Арктические воды в марте также характеризовались крайне низкими концентрациями Chl-*a* (среднее 0,11 мг·м⁻³), однако уже в апреле было отмечено резкое увеличение его содержания (среднее 1,32 мг·м⁻³), и в мае в этих водах концентрации Chl-*a* продолжали расти (среднее 2,53 мг·м⁻³). Максимальные значения в арктических водах в апреле и мае составили

5,69 и 5,77 мг·м⁻³ соответственно. К июлю мы наблюдали снижение концентраций этого пигмента в арктических и баренцевоморских водах, однако они всё ещё оставались значительными — в среднем 0,70 мг·м⁻³ (арктические) и 1,18 мг·м⁻³ (баренцевоморские).

В атлантических водах в апреле концентрация Chl-*a* в среднем составляла 0,44 мг·м⁻³ (максимум 1,39 мг·м⁻³). В мае в трансформированных атлантических водах содержание пигмента было уже существенно выше (максимально 5 мг·м⁻³). В этом месяце установился общий высокий фон концентраций во всех типах вод (рис. 9).

По нашим данным, в марте — апреле 2021 г. вертикальные градиенты изменения минеральных форм фосфора, азота и кремния, характерные для периода активно протекающего процесса фотосинтеза, ещё не сформировались. Изменение концентраций биогенных элементов не всегда находится в прямой зависимости от изменений биомассы фитопланктона или содержания Chl-*a*. Конкретная величина концентрации биогенного элемента зависит от соотношения базовых вод, физических факторов (температуры и солёности морской воды), положения кромки льда и интенсивности процесса фотосинтеза (см. табл. 1). В арктическом районе в тёплый период года величины насыщенности воды растворённым кислородом, превышающие значение в 100 %, традиционно связывают с развитием фитопланктона [Химия океана, 1979]. Изменчивость этого показателя на исследуемой акватории и величины выше 100 % уровня насыщения вод кислородом свидетельствовали о весенней активизации процесса фотосинтеза в фитопланктонном сообществе.

Заключение. Пространственные неоднородности распределения хлорофилла *a*, наблюдаемые нами в весенний период 2021 г., были обусловлены разобщённостью центров цветения фитопланктона во времени и пространстве. Расположение и протяжённость зон повышенных (или пониженных) концентраций хлорофилла согласовались с чередованием водных масс. Его локальные максимумы были зарегистрированы в прибрежной зоне центрального Мурмана и в водах Колгуевского мелководья. На акваториях северной части Баренцева моря, примыкающих к кромке льдов, значения хлорофилла значительно уступали таковым для южной её части. Воды центральной части моря характеризовались промежуточными (средними) значениями концентраций хлорофилла.

Распределение в марте — апреле 2021 г. в различных водных массах Баренцева моря минеральных форм фосфора, азота и кремния в большей степени соответствовало зимнему типу, когда вертикальные градиенты их изменения ещё не сформировались. Величина насыщенности вод растворённым кислородом выше 100 % была зафиксирована в разных частях акватории и являлась косвенным показателем начального этапа весенней активизации процесса фотосинтеза в фитопланктонном сообществе.

Существует зависимость локализации центров ранневесеннего развития фитопланктона от площади ледяного покрова. В холодные годы (периоды с положительными аномалиями ледовитости) активное весеннее цветение наступало поздно — в мае. В годы с отрицательными аномалиями ледовитости вспышка весеннего цветения начиналась в апреле-мае в прибрежных водах Баренцева моря, однако начало этого процесса можно было наблюдать уже в третьей декаде марта. При отрицательных аномалиях ледовитости мы выявили несколько эпицентров начала весеннего развития: в прибрежных водах вдоль мурманского побережья; на юго-востоке моря в колгуевских водах, являющихся прибрежными по происхождению; частично в атлантических водах, на тех участках, где существовало влияние прибрежной водной массы. При этом общая продуктивность и абсолютные значения концентраций хлорофилла в прибрежных водах были ниже, чем при последующих вспышках развития фитопланктона в водах иного генезиса.

Мониторинг весенних уровней концентраций хлорофилла в Баренцевом море свидетельствует о влиянии на весенний сукцессионный цикл фитопланктона возрастающей «атлантификации» Баренцева моря. Именно в весенний период формируется основная часть годовой биомассы

фитопланктона и определяется вектор дальнейшего годового развития. Наблюдающееся с 1998 г. увеличение свободной ото льда площади моря позволяет реализовать несколько сценариев развития фитопланктона на акватории Баренцева моря и максимально охватить участки, благоприятные для формирования центров ранневесеннего цветения. В свою очередь, уровень продукции фитопланктона, заложенный в весенний период, может оказывать влияние на продуктивность всех остальных звеньев пелагической экосистемы Баренцева моря.

Работа выполнена в рамках государственного задания ММБИ по теме «Структурно-динамические трансформации пелагических экосистем морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды».

Благодарность. Благодарим сотрудников Мурманского морского биологического института РАН за сбор данных и отбор проб в экспедиционных условиях. Выражаем глубокую признательность рецензентам за ценные замечания и пожелания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Аксенов П. В., Иванов В. В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018. Т. 64, № 1. С. 42–54. [Aksenov P. V., Ivanov V. V. "Atlantification" as a possible cause for reducing of the sea-ice cover in the Nansen Basin in winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2018, vol. 64, no. 1, pp. 42–54. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54>
- Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 1. С. 11–26. [Alekseev G. V. Development and amplification of global warming in the Arctic. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2015, vol. 1, pp. 11–26. (in Russ.)]
- Кузнецов Л. Л., Шошина Е. В. *Фитоценозы Баренцева моря (физиологические и структурные характеристики)*. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2003. 308 с. [Kuznetsov L. L., Shoshina E. V. *Phytocenoses of the Barents Sea (Physiological and Structural Characteristics)*. Apatity : Izd-vo KNTs RAN, 2003, 308 p. (in Russ.)]
- Мамаев О. И. *Термохалинный анализ вод Мирового океана*. Ленинград : Гидрометеоздат, 1987. 296 с. [Mamaev O. I. *Termokhalinnyi analiz vod Mirovogo okeana*. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1987, 296 p. (in Russ.)]
- Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г., Карсаков А. Л., Анциферов М. Ю. *Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость*. Мурманск : ПИНРО, 2016. 260 с. [Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G., Karsakov A. L., Antsiferov M. Yu. *The Barents Sea Water: Structure, Circulation, Variability*. Murmansk : PINRO, 2016, 260 p. (in Russ.)]
- Планктон морей Западной Арктики* / отв. ред. Г. Г. Матишов. Апатиты : Мурманский морской биологический институт, 1997. 352 с. [Plankton morei Zapadnoi Arktiki / G. G. Matishov (Ed.). Apatity : Murmanskii morskoi biologicheskii institut, 1997, 352 p. (in Russ.)]
- Рейсовый отчёт комплексной экспедиции на НИС «Дальние Зеленцы» в Баренцево море (10.03–14.04.2021)* / под ред. П. Р. Макаревича. Мурманск : ММБИ, 2021. 99 с. [Reisovyi otchet kompleksnoi ekspeditsii na NIS "Dal'nie Zelentsy" v Barentsevo more (10.03–14.04.2021) / P. R. Makarevich (Ed.). Murmansk : MMBI, 2021, 99 p. (in Russ.)]
- Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана*. Москва : ВНИРО, 2003. 202 с. [Rukovodstvo po khimicheskomyu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybokhozyaistvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla raionov Mirovogo okeana. Moscow : VNIRO, 2003, 202 p. (in Russ.)]
- Химия океана* : [в 2 т.]. Т. 1: *Химия вод океана*. Москва : Наука, 1979. 518 с. (Океанология). [Khimiya okeana : [in 2 vols]. Vol. 1: *Khimiya vod okeana*. Moscow : Nauka, 1979, 518 p. (Okeanologiya). (in Russ.)]
- Aminot A., Ray F. *Standard Procedure for the Determination of Chlorophyll a by Spectroscopic Methods*. Copenhagen, Denmark : International

- Council for the Exploration of the Sea, 2000, 17 p. (ICES Techniques in Marine Environmental Sciences).
11. 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, no. 5, suppl. 1, pp. 7–26. <https://doi.org/10.14430/arctic98>
 12. *Biological Atlas of the Arctic Seas 2000: Plankton of the Barents and Kara Seas* / Murmansk Marine Biological Institute, Russia ; Ocean Climate Laboratory, NODC/NOAA, USA. URL: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/BARPLANK/start.html> [accessed: 20.03.2022].
 13. Boitsov V. D., Karsakov A. L., Trofimov A. G. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009. *ICES Journal of Marine Science*, 2012, vol. 69, iss. 5, pp. 833–840. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss075>
 14. *Chemical Methods for Use in Marine Environment Monitoring*. Paris : UNESCO, 1983, 53 p. (Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guides ; 12). <https://doi.org/10.25607/OBP-1419>
 15. Comiso J. C., Hall D. K. Climate trends in the Arctic as observed from space. *Climate Change*, 2014, vol. 5, iss. 3, pp. 389–409. <https://doi.org/10.1002/wcc.277>
 16. *Determination of Photosynthetic Pigments in Sea-Water*. Paris : UNESCO, 1966, 69 p. (Monographs on Oceanographic Methodology ; vol. 1).
 17. Dong K., Kvile Ø. K., Stenseth N. C., Stige L. C. Associations among temperature, sea ice and phytoplankton bloom dynamics in the Barents Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 2020, vol. 635, pp. 25–36. <https://doi.org/10.3354/meps13218>
 18. Eilertsen H.-C., Hansen G. A., Svendsen H., Hegseth E. N. Onset of the spring phytoplankton bloom in the Barents Sea: Influence of changing light regime and other environmental factors. *Proceedings of SPIE : Underwater Light Measurements*, 1993, vol. 2048, pp. 20–32. <https://doi.org/10.1117/12.165507>
 19. *EOSDIS Worldview* : [site]. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> [accessed: 25.03.2022].
 20. Fujiwara A., Hirawake T., Suzuki K., Imai I., Saitoh S.-I. Timing of sea ice retreat can alter phytoplankton community structure in the western Arctic Ocean. *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, iss. 7, pp. 1705–1716. <https://doi.org/10.5194/bg-11-1705-2014>
 21. Johannessen O. M., Alexandrov V. Yu., Frolov I. Ye., Sandven S., Pettersson L. H., Bobylev L. P., Kloster K., Smirnov V. G., Mironov Ye. U., Babich N. G. *Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route. Studies and Applications*. Chichester, UK : Praxis Publishing, 2007, 472 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48840-8>
 22. Kahru M., Brotas V., Manzano-Sarabia M., Mitchell B. G. Are phytoplankton blooms occurring earlier in the Arctic? *Global Change Biology*, 2011, vol. 17, iss. 4, pp. 1733–1739. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02312.x>
 23. Kogeler J., Rey F. Ocean colour and the spatial and seasonal distribution of phytoplankton in the Barents Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, vol. 20, iss. 7, pp. 1303–1318. <https://doi.org/10.1080/014311699212740>
 24. Lewis K. M., van Dijken G. L., Arrigo K. R. Changes in phytoplankton concentration now drive increased Arctic Ocean primary production. *Science*, 2020, vol. 369, no. 6500, pp. 198–202. <https://doi.org/10.1126/science.aay8380>
 25. Makarevich P., Druzhkova E., Larionov V. Primary producers of the Barents Sea. In: *Diversity of Ecosystems* / A. Mahamane (Ed.). London, UK : InTech Open, 2012, pp. 367–393. <https://doi.org/10.5772/37512>
 26. 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, iss. 1, art. no. 101 (23 p.). <https://doi.org/10.3390/w14010101>
 27. Makarevich P. R., Vodopianova V. V., Bulavina A. S., Vashchenko P. S., Ishkulova T. G. Features of the distribution of chlorophyll-*a* concentration along the western coast of the Novaya Zemlya archipelago in spring. *Water*, 2021, vol. 13, iss. 24, art. no. 3648 (14 p.). <https://doi.org/10.3390/w13243648>
 28. *Methods of Seawater Analysis* / K. Grasshoff, K. Kremling, M. Ehrhardt (Eds). Weinheim ; New York ; Chichester ; Brisbane ; Toronto : Wiley-VCH, 1999, 600 p. <https://doi.org/10.1002/9783527613984>

29. Namyatov A. A. $\delta^{18}\text{O}$ as a tracer of the main regularities of water mass mixing and transformation in the Barents, Kara, and Laptev seas. *Journal of Hydrology*, 2021a, vol. 593, art. no. 125813 (18 p.). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125813>
30. Namyatov A. A. The relationship between geophysical processes and changes in the composition of the seawater of the Barents Sea in the course of their climatic variability. *ESS Open Archive*, 2021b, 38 p. <https://doi.org/10.1002/essoar.10507159.1>
31. *Ocean Color NASA* : [site]. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/13/> [accessed: 25.03.2022].
32. 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. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2017, vol. 122, iss. 6, pp. 5121–5139. <https://doi.org/10.1002/2016JC012582>
33. Park J., Kug J., Bader J., Rolph R., Kwon M. Amplified Arctic warming by phytoplankton under greenhouse warming. *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, vol. 112, no. 19, pp. 5921–5926. <https://doi.org/10.1073/pnas.1416884112>
34. Qu B., Gabric A. J., Matrai P. A. The satellite-derived distribution of chlorophyll-*a* and its relation to ice cover, radiation and sea surface temperature in the Barents Sea. *Polar Biology*, 2006, vol. 29, iss. 3, pp. 196–210. <https://doi.org/10.1007/s00300-005-0040-2>
35. Reigstad M., Wassmann P., Riser C., Øygarden S., Rey F. Variations in hydrography, nutrients and chlorophyll *a* in the marginal ice-zone and the central Barents Sea. *Journal of Marine Systems*, 2002, vol. 38, iss. 1–2, pp. 9–29. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00167-7](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00167-7)
36. Shu Q., Wang Q., Song Z., Qiao F.-L. The poleward enhanced Arctic Ocean cooling machine in a warming climate. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, art. no. 2966 (9 p.). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23321-7>
37. Signorini S. R., McClain C. R. Environmental factors controlling the Barents Sea spring–summer phytoplankton blooms. *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36, iss. 10, art. no. L10604 (5 p.). <https://doi.org/10.1029/2009GL037695>
38. Vodopianova V. V., Vaschenko P. S., Bulavina A. S. Monitoring of chlorophyll-*a* concentration in the ice edge zone of the Barents Sea in 2017–2018. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 263, art. no. 012005 (8 p.). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/263/1/012005>
39. Wang Y., Xiang P., Kang J.-H., 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, iss. 1, pp. 295–312. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3500-0>
40. Wassmann P. Arctic marine ecosystems in an era of rapid climate change. *Progress in Oceanography*, 2011, vol. 90, iss. 1–4, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.02.002>
41. 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. *Progress in Oceanography*, 2006, vol. 71, iss. 2–4, pp. 232–287. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.10.003>
42. Zhichkin A. P. Peculiarities of interannual and seasonal variations of the Barents Sea ice coverage anomalies. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, iss. 5, pp. 319–326. <https://doi.org/10.3103/S1068373915050052>

**LOCALIZATION
OF PHYTOPLANKTON EARLY SPRING BLOOM SPOTS
IN THE PELAGIC ZONE OF THE BARENTS SEA**

**P. Makarevich, V. Vodopyanova, A. Bulavina, P. Vashchenko,
A. Namyatov, and I. Pastukhov**

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation
E-mail: makarevich@mmbi.info

Atlantification of the Barents Sea leads to a decrease in the area of ice cover and an increase in the ice-free period. This process affects the entire pelagic ecosystem of the Barents Sea, where the main part of the annual primary production of phytoplankton is formed during the spring bloom. Chlorophyll *a* concentration reflects changes in phytoplankton biomass and can serve as an indicator of its production characteristics. In the spring of 2021, hydrological characteristics of water masses, as well as the distribution of concentrations of chlorophyll *a* and nutrients, were studied in the ice-free water area of the Barents Sea. The year of 2021 was characterized by negative ice cover anomalies. The location and length of the areas of increased (or decreased) chlorophyll *a* concentrations were consistent with the alternation of water masses. Separate spots of early spring bloom were identified – in coastal waters in the southeastern and southwestern Barents Sea. In late March and early April 2021, maximum chlorophyll *a* concentrations in coastal waters reached values of about $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. At the same time, in the Barents Sea and Arctic waters, the maximum content did not exceed $0.20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. The distribution of nutrients corresponded to that for the winter period when the vertical gradients of these parameters were not formed yet. The values of water saturation with oxygen exceeding 100% (to varying degrees throughout the studied area) characterized the activation of the photosynthesis process in the phytoplankton community. Analysis of long-term data showed that the subsequent active spring phytoplankton bloom in years with negative ice cover anomalies occurred already in the second or third decade of April in the Barents Sea water masses of various types – in Arctic, Atlantic, and coastal waters (maximum chlorophyll *a* concentration reached the value of $5.69 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ in Arctic waters). In May, this process covered various types of water masses throughout the Barents Sea (maximum chlorophyll *a* content was of $5.08\text{--}5.77 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). In abnormally cold years, the low position of the ice edge in March–April limited the possible area of phytoplankton development, and the active phase of its bloom (according to satellite data) occurred much later, in May. Atlantification of the Barents Sea contributes to the formation of several bloom spots and the distribution of spring bloom over a larger area, which might affect the annual production indicators of the entire pelagic zone.

Keywords: chlorophyll *a*, spring bloom, water masses, Atlantification, Barents Sea