



Среда обитания водных биологических ресурсов

Динамика гидрометеорологических условий в Северной Атлантике и Западной Арктике в эпоху глобальных климатических изменений

Е.В. Сентябов, А.Г. Трофимов

Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича), ул. Академика Книповича, 6, г. Мурманск, 183038

E-mail: sentyab@pinro.vniro.ru

SPIN-коды: Е.В. Сентябов – 7620–8430; А.Г. Трофимов – 6762–9699

Цель работы: охарактеризовать особенности изменений условий среды в различных районах Северной Атлантики и Западной Арктики на протяжении последних 40 лет.

Материалом исследования послужили океанографические данные, собранные в ходе экспедиций Полярного филиала ВНИРО в Баренцево море, и другая доступная информация о гидрометеорологических условиях в районах Северной Атлантики и Западной Арктики за 1981–2022 гг.

Используемые методы: сравнительный анализ данных, методы описательной статистики, корреляционный и спектральный анализы.

Результаты: в работе проанализированы изменения среднегодовых значений температуры воздуха и поверхности океана, ледовитости, теплосодержания водных масс и штормовой активности в Баренцевом, Норвежском и Карском морях, районах моря Ирмингера, банки Рокколл и Северо-Западной Атлантики за последний 40-летний период. Показано, что с начала 1980-х гг. в Северной Атлантике и Западной Арктике на фоне повышающейся штормовой активности наблюдается тренд на увеличение температуры воздушных и водных масс и уменьшение площади льда, что наиболее отчетливо прослеживается с начала XXI века. При этом изменения теплового состояния воды и воздуха, а также ледовитости и штормовой активности носят циклический характер. Отмечено, что с 2016 г. в Баренцевом и Норвежском морях наблюдается тенденция на похолодание воздушных и водных масс и увеличение ледовитости.

Практическая значимость: полученные результаты позволят лучше понимать климатические процессы, происходящие в Северной Атлантике и Западной Арктике в последние 40 лет, и могут быть использованы для оценки влияния изменений климата на основные объекты российского рыболовства в этих районах.

Ключевые слова: Северная Атлантика, моря Западной Арктики, изменения климата, температура, штормовая активность, ледовитость.

Dynamics of hydrometeorological conditions in the North Atlantic and West Arctic in the age of global climate changes

Evgeniy V. Sentyabov, Alexander G. Trofimov

Polar branch of VNIRO (N.M. Knipovich «PINRO»), 6, Academician Knipovich St., Murmansk, 183038, Russia

The aim of the paper is to characterize the features of changes in environmental conditions in various regions of the North Atlantic and West Arctic over the past 40 years.

The material for the study was oceanographic data obtained during surveys in the Barents Sea by the Polar branch of VNIRO. In addition, other available information on hydrometeorological conditions of the North Atlantic and West Arctic in 1981–2022 was used.

Methods of descriptive statistics as well as comparative, correlation and spectral analyses were applied.

Results: In the paper, changes in annual mean air and sea surface temperatures, ice extent, heat content of water masses, and storm activity in the Barents, Norwegian, Irminger, Kara seas, the Rockall Bank, and the North-west Atlantic are analyzed over the last 40-year period. It is shown that there have been an increasing trend in air and water temperatures and a decreasing trend in ice extent in the North Atlantic and West Arctic since the early 1980s, against the background of increasing storm activity. The trends have been most clearly seen since the beginning of the 21st century. At the same time, variability in air and water temperatures as well as in ice extent and storm activity has a cyclical character. It is noted that there have been a cooling tendency in air and water temperatures and an increasing one in ice extent in the Barents and Norwegian seas since 2016.

Practical significance: The obtained results are useful for better understanding the climatic processes occurring in the North Atlantic and West Arctic over the past 40 years and can be used to assess the influence of climate changes on the main objects of Russian fisheries in these regions.

Keywords: North Atlantic, West Arctic seas, climate changes, temperature, storm activity, ice coverage.

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько десятилетий в Северной Атлантике и Арктике наблюдается потепление климата [Ingvaldsen et al., 2003; Polyakov et al., 2005; Boitsov et al., 2012; Карсаков и др., 2016; Трофимов и др., 2018; González-Pola et al., 2022]. Оно оказывает значительное влияние на водные биологические ресурсы, поскольку условия среды играют важную роль в жизни гидробионтов, обуславливая особенности их нагула, зимовки, нереста, сезонных миграций [Dalpadado et al., 2014, Eriksen et al., 2015, 2017]. А это, в итоге, влияет на урожайность поколений гидробионтов и промысловые запасы [Jakobsen, Ozhigin, 2011; Johannesen et al., 2012; Ingvaldsen, Gjørseter, 2013].

В свете современных глобальных изменений климата всё более актуальной становится задача мониторинга и всестороннего изучения океанографических условий, играющих важную роль в функционировании морских экосистем.

В работе исследована межгодовая изменчивость гидрометеорологических параметров за период с 1981 по 2022 гг. в различных промысловых районах Северной Атлантики и Западной Арктики (рис. 1),

важее окунь-клювач, в районе банки Рокколл – путассу, пикша и другие ценные глубоководные рыбы [Винниченко, Сентябов, 2005]. В Норвежском море, особенно в его южной части, активно облавливаются такие массовые пелагические рыбы как сельдь, скумбрия и путассу [The Norwegian Sea..., 2004]. Промысловое значение Баренцева моря не подвергается сомнению [Jakobsen, Ozhigin, 2011]. Юго-западная часть Карского моря, в силу потепления климата, обращает на себя всё большее внимание как район перспективного промысла сайки, наваги, краба-стригуна опилио и как окраина ареалов трески и пикши [Экосистема Карского ..., 2008; Долгов и др., 2011; Орлов и др., 2020].

Цель настоящей работы – охарактеризовать особенности изменений условий среды в актуальных для отечественного рыболовства районах Северной Атлантики и Западной Арктики на протяжении последних 40 лет.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для характеристики условий среды и оценки их изменений использовались следующие данные за 1981–2022 гг.:

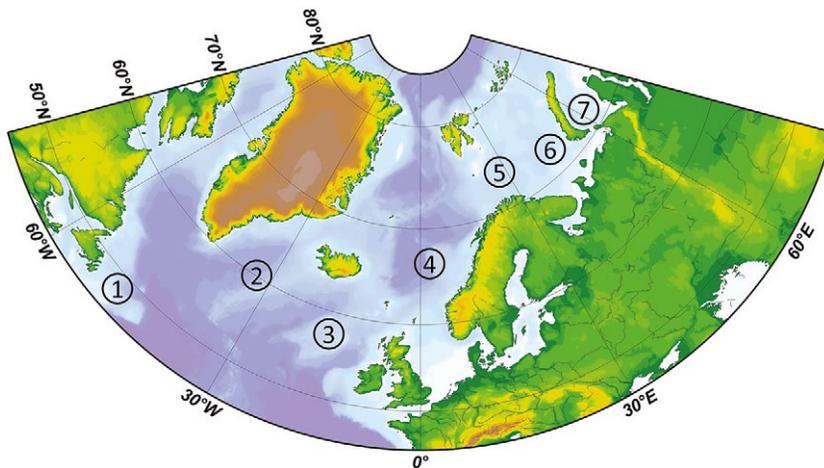


Рис. 1. Карта Северной Атлантики и Западной Арктики с положением регионов, описанных в работе: Большая Ньюфаундлендская банка (1), море Ирмингера (2), банка Рокколл (3), Норвежское море (4), западная (5) и восточная (6) части Баренцева моря, юго-западная часть Карского моря (7)

Fig. 1. Map of the North Atlantic and West Arctic with positions of regions described in the paper: Great Newfoundland Bank (1), Irminger Sea (2), Rockall Bank (3), Norwegian Sea (4), western (5) and eastern (6) Barents Sea, south-western Kara Sea (7)

включающих район Большой Ньюфаундлендской банки, море Ирмингера, район банки Рокколл, Норвежское и Баренцево моря, а также юго-западную часть Карского моря. Выбор этих регионов обусловлен их важным промысловым значением для отечественного флота [Соколов, 2022]. Так, в районе Большой Ньюфаундлендской банки ведётся активный промысел окуни, палтуса и креветки, в море Ирмингера вылавли-

– индекс Атлантического мультидекадного колебания (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO);¹

– теплозапас вод Норвежского моря в слое 0–800 м;²

¹ <https://www.psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/> 10.03.2023

² ICES Report on Ocean Climate (IROC). ICES. <https://ocean.ices.dk/core/iroc#> 10.03.2023.

– штормовая активность (количество дней с ветром более 15 м/с в целом за год) в районе Большой Ньюфаундлендской банки, море Ирмингера, южной части Норвежского и центральной части Баренцева морей;³

– среднегодовая температура воздуха⁴ и температура поверхности океана (ТПО)⁵ в районе Большой Ньюфаундлендской банки, море Ирмингера, районе банки Рокколл, Баренцевом и Норвежском морях;

– средние за июнь–ноябрь значения ТПО Карского моря, исключая период (декабрь–май) полного покрытия моря льдом;

– среднегодовая ледовитость Баренцева, Карского морей и Арктики;⁶

– среднегодовая температура атлантических вод (в слое 0–200 м) на разрезе «Кольский меридиан» (70°30′–72°30′ с.ш., 33°30′ в.д.) [Карсаков и др., 2022];

– площади акватории Баренцева моря, занятые в августе–сентябре водами с разной температурой в слое 50–100 м и у дна;⁷

– климатический индекс (CI) Баренцева моря, рассчитанный как сумма нормированных аномалий температуры воздуха, воды и площади акватории, свободной ото льда, в соответствии с [Трофимов и др., 2018].

Для расчёта аномалий вышеуказанных параметров использовались среднемноголетние значения за 40-летний период (1981–2020 гг.). Нормирование аномалий выполнялось с помощью стандартного отклонения, рассчитанного за тот же период.

Достоверность трендов в исследуемых переменных оценивалась с помощью уровня значимости p -value (p -значение). Если p -value было меньше 0,05, тренд считался статистически значимым с вероятностью 95%, а если меньше 0,01, то, соответственно, с вероятностью 99% [Коросов, Горбач, 2007].

В работе использовались сравнительный анализ данных, методы описательной статистики, корреляционный и спектральный анализы [Елисеева, Юзбашев, 2004]. Спектральный анализ выполнялся для детрендрованных рядов, полученных вычитанием из исход-

ного ряда линейного или квадратичного тренда. Статистическая обработка данных и построение графиков выполнялись в программах Microsoft Excel 2016 (надстройка «Анализ данных») и Statgraphics 19.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные на рис. 2 изменения индекса АМО, отражающего тепловое состояние поверхностного слоя Северной Атлантики и рассчитываемого весовым осреднением среднемесячных аномалий ТПО от экватора до 70° с. ш., указывают на высокую температуру поверхностных вод с конца 1990-х гг. Положительные аномалии теплозапаса Норвежского моря наблюдаются стабильно с 2001 г. В обоих параметрах отмечается значимый положительный тренд ($R^2 = 0,57$, p -value = 0,000), составляющий 0,1 °С и $3,4 \times 10^8$ Дж/м² за декаду, соответственно. Помимо трендов, в этих рядах присутствуют циклические составляющие, которые были выделены с помощью гармонического анализа: в индексе АМО – циклы с периодами 8 и 21 год, объясняющие соответственно 17 и 13% изменчивости детрендрованного ряда, а в теплозапасе Норвежского моря – циклы с периодами 8, 14 и 21 год, определяющие 13, 32 и 22% дисперсии (здесь и далее доля изменчивости, объясняемая той или иной гармоникой, приводится для детрендрованного ряда).

Ранее другие исследователи [Лис и др., 2023] уже указывали на наличие в индексе АМО циклов с периодами 2,5; 3,6; 4,6; 5,3; 6,1; 7,5; 9,1 и 16,4 года, выделенных по пикам спектральной плотности за 1950–2022 гг. В нашей работе учтены лишь статистически значимые циклы (с уровнем значимости p -value < 0,05). При этом в работе [Крашенинникова С., Крашенинникова М., 2019] отмечено, что наибольший вклад в суммарную дисперсию вносят долгопериодные компоненты с периодами более 20 лет, тогда как в нашем случае компоненты с периодами 8 и 21 год оказались близки по своему вкладу в изменчивость индекса АМО.

Согласно климатическому индексу (см. рис. 2), с начала 1980-х гг. в Баренцевом море наблюдался устойчивый тренд на потепление, а с 2005 г. условия в нём были самыми тёплыми за рассматриваемый период, при этом 2016 г. характеризовался как рекордно тёплый. Тем не менее, с 2016 г. в изменениях климатического индекса отмечается тенденция на похолодание. В температуре атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» также наблюдался значимый положительный тренд (0,3 °С за декаду, $R^2 = 0,54$, p -value = 0,000) (см. рис. 2). С 2004 г. она находилась на уровне тёплых и аномально тёплых лет и лишь в 2011 г. понизилась до уровня нормальных

³ Данные ФГБУ «Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»

⁴ <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl> 10.03.2023.

⁵ http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.GLOBAL/.Reyn_SmithOlv2/.monthly/.sst/ 10.03.2023.

⁶ https://nsidc.org/data/seaice_index/data-and-image-archive 10.03.2023.

⁷ Расчёты выполнены на основе океанографической базы данных Полярного филиала ФГБНУ «ВНИРО»

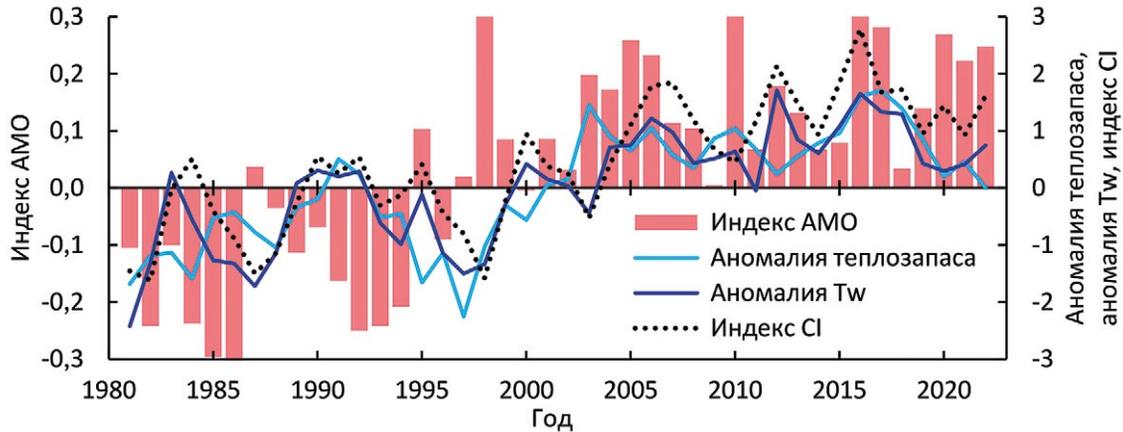


Рис. 2. Индекс Атлантического мультидекадного колебания (АМО), нормированные аномалии теплозапаса вод Норвежского моря и температуры атлантических вод (0–200 м) на разрезе «Кольский меридиан» (Tw), а также климатический индекс (CI) Баренцева моря в 1981–2022 гг.

Fig. 2. Index of Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), normalized anomalies of the Norwegian Sea heat content and Atlantic water (0–200 m) temperature in the Kola Section (Tw) as well as Climate Index (CI) of the Barents Sea in 1981–2022

лет, но уже в 2012 г. достигла рекордно высокого значения с 1900 г. (5,4 °C при норме 4,2 °C), которое повторилось в 2016 г. С 2016 г. наблюдается тенденция на понижение. И в температуре атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан», и в климатическом индексе выявлены циклические компоненты с периодами 5 лет (вклад в дисперсию 10 и 26% для температуры и индекса, соответственно), 8 лет (19 и 15%), 11 лет (10 и 13%) и 21 год (14 и 12%).

Согласно [Крашенинникова С., Крашенинникова М., 2019], в температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» обнаружены циклы с периодами 3–4, 6–8,

10–11 и более 20 лет. При этом вклад низкочастотных составляющих с периодами более 20 лет в изменчивость температуры значительно преобладал. Исследования авторов показали более значимую роль 8-летнего цикла, а 21-летний находился на втором месте по вкладу в общую дисперсию.

В 1981–2022 гг. в рассматриваемых районах в изменениях температуры воздуха и ТПО наблюдались значимые положительные тренды (табл. 1, рис. 3 и 4), лишь для температуры воздуха в районе банки Роккол он оказался статистически незначимым. При этом величина трендов увеличивалась при движении

Таблица 1. Величины трендов (жирным шрифтом) для штормовой активности, температуры воздуха, ТПО и ледовитости в различных регионах, описанных в работе, за период 1981–2022 гг. Во второй строке приведены разделённые косой чертой значения R² и p-value

Table 1. Trend values (in bold) for storm activity, air temperature, SST, and ice extent in different regions described in the paper for 1981–2022. The second line shows R² and p-value separated by a slash

Район	Шторма, дни/10 лет	Температура воздуха, °C/10 лет		ТПО, °C/10 лет		Ледовитость, 10 ⁶ км ² /10 лет
Большая Ньюфаундлендская банка	15,4 0,39/0,000	0,18 0,12/0,024		0,32 0,40/0,000		–
Море Ирмингера	11,2 0,20/0,004	0,26 0,20/0,003		0,20 0,21/0,003		–
Банка Роккол	23,3 0,31/0,007	0,07 0,03/0,273		0,16 0,24/0,001		–
Норвежское море	1,6 0,01/0,618	0,25 0,37/0,000		0,20 0,34/0,000		–
Баренцево море	16,2 0,64/0,000	0,50 0,54/0,000 <i>запад</i>	0,94 0,52/0,000 <i>восток</i>	0,34 0,60/0,000 <i>запад</i>	0,39 0,36/0,000 <i>восток</i>	–0,103 0,68/0,000
Карское море	–	1,18 0,49/0,000		0,53 0,29/0,000		–0,051 0,61/0,000

в северо-восточном направлении, в более суровые в плане климата регионы. Так, в Северной Атлантике и Норвежском море как для температуры воздуха, так и для ТПО, тренды были наименьшими и составляли 0,2–0,3 °С за декаду, а в Карском море – наибольшими (1,2 °С за декаду для температуры воздуха и 0,5 °С за декаду для ТПО) (см. табл. 1).

В последние два десятилетия XX века во всех районах преобладали отрицательные аномалии температуры воздуха и поверхности воды (см. рис. 3 и 4).

Подобная картина описывалась и другими исследователями [Polyakov et al., 2005; Мохов, 2020; González-Pola et al., 2022] относительно разных периодов для расчёта климатических норм. Наиболее раннее начало потепления (с изменением знака аномалий) отмечено в западной части района исследований: с 1996–1998 гг. в Северо-Западной Атлантике, море Ирмингера и районе банки Рокколл. В Норвежском море преобладание положительных аномалий отмечалось с 2002 г., в Баренцевом – с 2004 г.

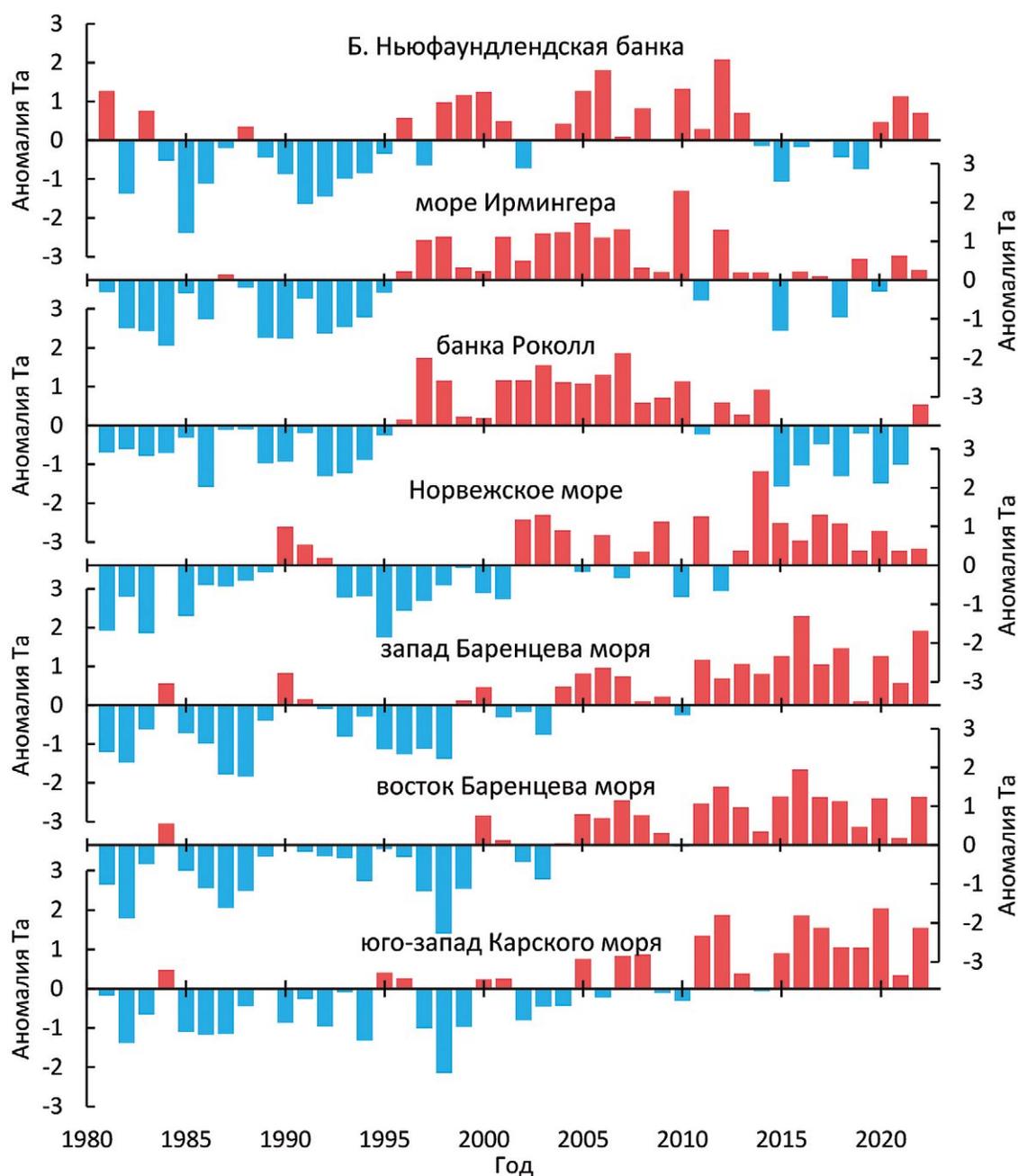


Рис. 3. Нормированные аномалии температуры воздуха (Ta) в 1981–2022 гг. в различных регионах, описанных в работе
 Fig. 3. Normalized anomalies of air temperature (Ta) in 1981–2022 in different regions described in the paper

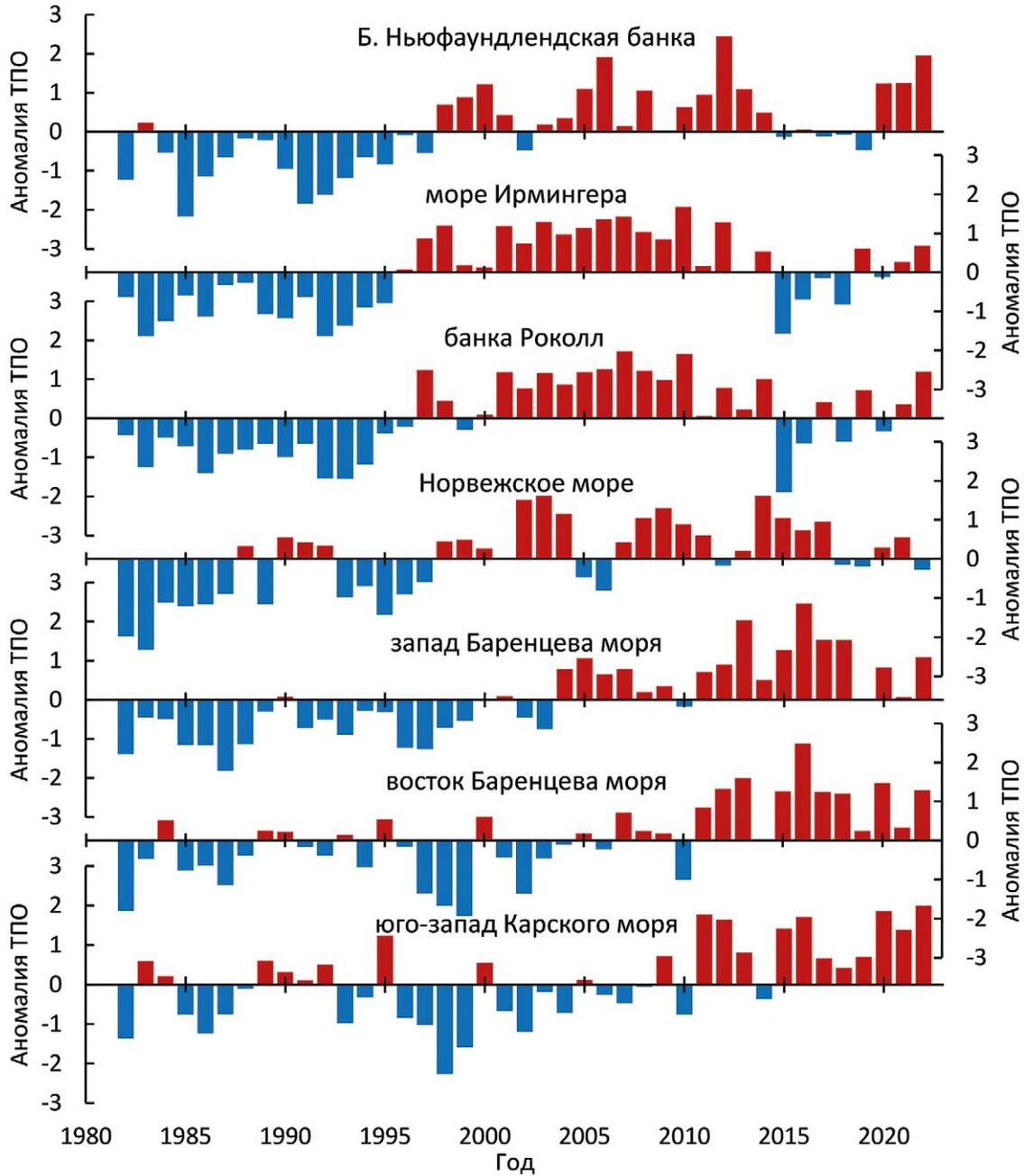


Рис. 4. Нормированные аномалии температуры поверхности океана (ТПО) в 1981–2022 гг. в различных регионах, описанных в работе

Fig. 4. Normalized anomalies of sea surface temperature (SST) in 1981–2022 in different regions described in the paper

Исторический максимум среднегодовых значений температуры воздуха и поверхности воды в море Ирмингера отмечался в 2010 г., в Норвежском море – в 2014 г., в Баренцевом – в 2016 г. В Северо-Западной Атлантике, районе банки Рокколл и Карском море максимумы температуры были «размыты» во времени и не так ярко выражены для какого-то конкретного периода. Так, в районе Большой Ньюфаундлендской банки максимальная температура воздуха

и воды отмечалась в 2006 и 2012 гг., в районе банки Рокколл – в 1997, 2003 и 2007 гг., в юго-западной части Карского моря – в 2012, 2016 и 2020 гг.

На рис. 3 и 4 отчетливо видно постепенное смещение «волны» положительных аномалий температуры из Северной Атлантики в моря Западной Арктики: вначале в Норвежское, а затем в Баренцево и Карское. И если в Северной Атлантике пик потепления пришёлся на середину 2000-х гг., то в Баренцевом

море – лишь на середину 2010-х гг., когда в море Ирмингера и районах Большой Ньюфаундлендской банки и банки Рокколл уже отчётливо прослеживался тренд на похолодание.

На фоне общего тренда на потепление в изменениях температуры воздуха и ТПО также присутствуют циклические составляющие. Так, в районе Большой Ньюфаундлендской банки в обоих параметрах с помощью спектрального анализа выделены четыре циклические компоненты с периодами 6, 8, 14 и 21 год, каждая из которых объясняет 10–15% (в сумме 49%) изменчивости температуры воздуха и 16–19% (в сумме 69%) изменчивости ТПО. В море Ирмингера и районе банки Рокколл основной вклад в изменения температуры вносит циклическая составляющая с периодом 21 год: 28 и 34% для температуры воздуха, 41 и 35% для ТПО. Вклад более высокочастотных компонент существенно меньше: для температуры воздуха это 3- и 8-летние циклы (9–10%), а для ТПО – 3- и 14-летние циклы (8–9%). В Норвежском море в температуре воздуха преобладают циклы с периодами 3 года (12%) и 14 лет (27%), а в ТПО – с периодами 6 лет (29%) и 14 лет (21%), а также более «слабые»: 6-летний цикл (9%) в температуре воздуха и 10-летний цикл (10%) в ТПО. На западе Баренцева моря в обоих параметрах отмечались циклы с периодами 5–6, 8 и 10–11 лет со вкладом 23, 19 и 12% (в сумме 54%) для температуры воздуха и 14–15% (в сумме 43%) для ТПО. На востоке Баренцева и юго-западе Карского морей в этих параметрах преобладали циклы с периодами 4–6 лет и 21 год, объясняющие в сумме 50 и 54% изменчивости температуры воздуха, а также 46 и 51% изменчивости ТПО в Баренцевом и Карском морях, соответственно.

На наличие в гидрометеорологических и астро-геофизических параметрах циклов с периодами 2–3, 3–5, 6–8, 8–13 и более 14 лет, в том числе около 20 и 50–60 лет, ранее уже указывали другие исследователи [Фролов и др., 2007; Гудкович и др., 2009; Крашенинникова С., Крашенинникова М., 2019; Лис и др., 2023]. Нами были выделены лишь статистически значимые циклы (с уровнем значимости $p\text{-value} < 0,05$), вносящие наибольший вклад в изменчивость исследуемых параметров, и приведена оценка величины их вклада.

На протяжении рассматриваемого периода ледовитость Арктики, в том числе Баренцева и Карского морей, в целом сокращалась (рис. 5), наблюдался значимый отрицательный тренд: 534 тыс. км² за декаду ($R^2 = 0,89$, $p\text{-value} = 0,000$) в Арктике, 103 и 51 тыс. км² за декаду ($R^2 = 0,68$ и $0,61$, $p\text{-value} = 0,000$) в Баренцевом и Карском морях соответственно (см. табл. 1). При этом наименьшая среднегодовая ледовитость в Баренцевом море наблюдалась в 2012 и 2016 гг., а в Карском море – в 2012, 2016 и 2020 гг. (в те же годы, когда в его юго-западной части отмечались максимальные значения температуры воздуха и ТПО). За последние 30 лет льда в Баренцевом море стало вдвое меньше. Однако с 2016 г. в этих районах наметилась тенденция к увеличению ледовитости.

Полученные нами результаты согласуются с оценками трендов ледовитости, представленными у других исследователей [Parkinson, Cavalieri, 2008; Onarheim et al., 2018; Крашенинникова С., Крашенинникова М., 2019; Тимохов и др., 2019; Wu, Wang, 2019; Лис, Егорова, 2022] и составляющих для Арктики от 417 до 526 тыс. км² за декаду, для Баренцева моря – 86 тыс. км², а для Баренцева и Карского морей вместе взятых – 106 тыс. км².

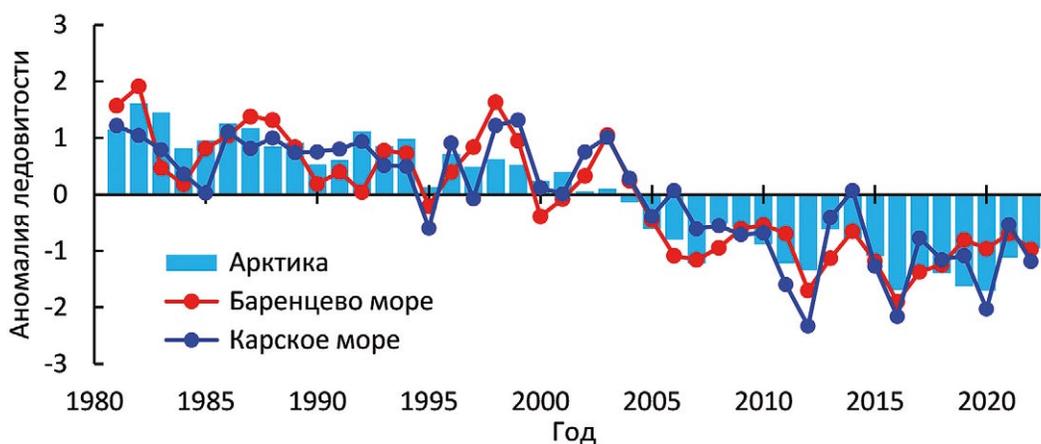


Рис. 5. Нормированные аномалии ледовитости Арктики, Баренцева и Карского морей в 1981–2022 гг.

Fig. 5. Normalized anomalies of ice extent in the Arctic, Barents and Kara seas in 1981–2022

Как уже указывалось выше, наблюдаемые в ледовитости тренды описывают большую часть её изменчивости. Тем не менее, в детрендированных рядах ледовитости Арктики, Баренцева и Карского морей были выявлены циклические составляющие с периодами 5 лет (11, 25 и 15%) и 21 год (14, 18 и 12%). Также для Баренцева моря отмечался 8-летний цикл (12%), а для Карского – 4-летний (17%).

На наличие в ледовитости Арктики, Баренцева и Карского морей циклов с периодами 2–4, 5–7, 8–14, около 20 и 50–60 лет ранее уже указывали

другие исследователи [Фролов и др., 2007; Гудкович и др., 2009; Жичкин, 2015; Крашенинникова С., Крашенинникова М., 2019; Тимохов и др., 2019; Лис и др., 2023]. Нами были выделены лишь статистически значимые циклы (с уровнем значимости p-value <0,05) с наибольшим вкладом в изменчивость ледовитости и приведена оценка величины их вклада.

Штормовая активность в 1980-е и 1990-е гг. характеризовалась большими различиями амплитуд межгодовых изменений количества штормовых дней в исследуемых районах, достигавших в Норвежском

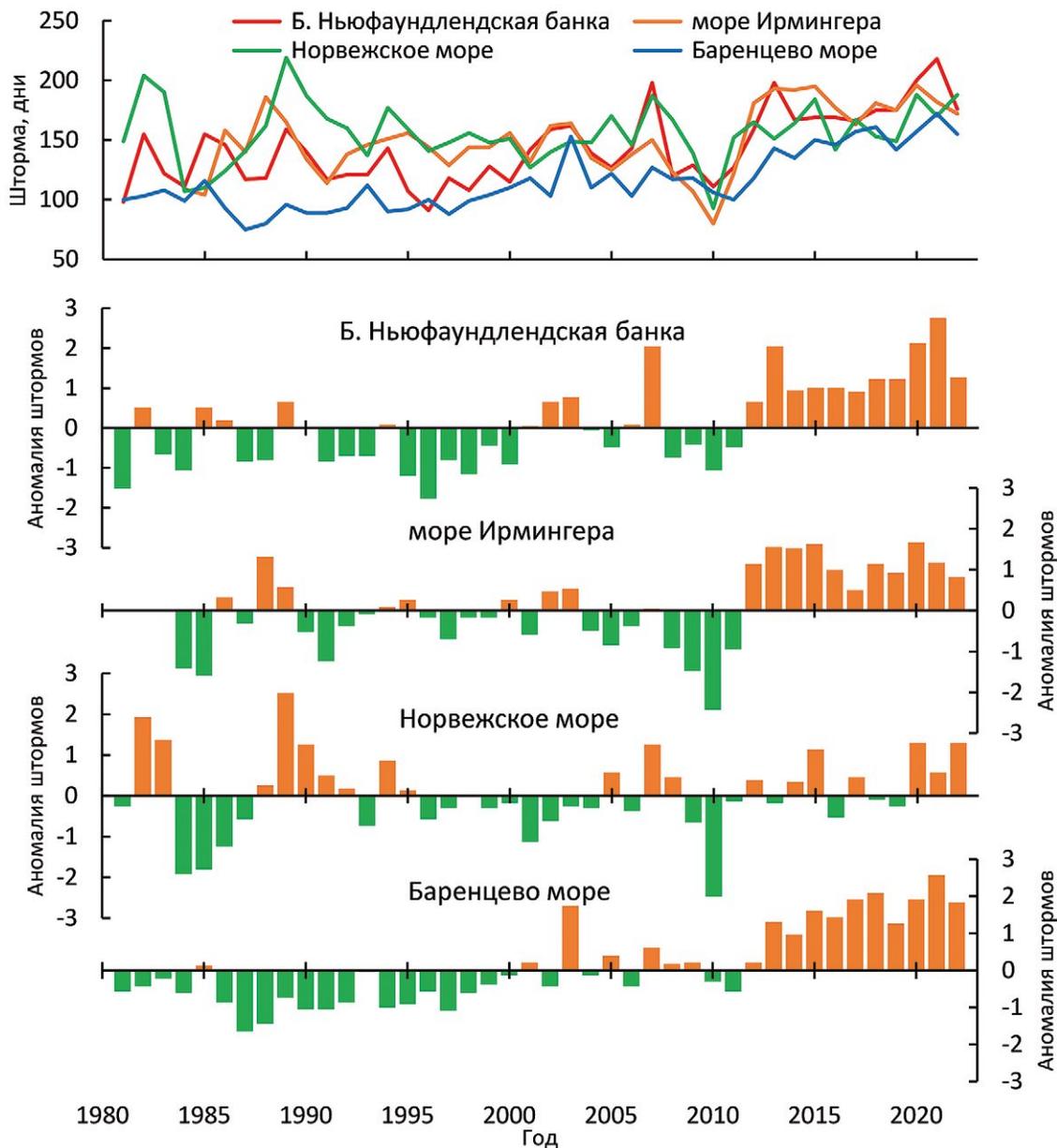


Рис. 6. Суммарное за год количество штормовых дней в различных регионах, описанных в работе, и их нормированные аномалии в 1981–2022 гг.

Fig. 6. Annual summarized number of storm days in different regions described in the paper and their normalized anomalies in 1981–2022

море 112, а в Баренцевом – всего 41 (рис. 6). С начала XXI века амплитуды межгодовых изменений количества штормовых дней примерно выровнялись, составив 72–95 дней, а сама штормовая активность, особенно с 2010 г., стала неуклонно расти. Значимые положительные тренды (R^2 от 0,20 до 0,64 при p -value < 0,01) отмечены для всех районов, кроме Норвежского моря, для которого тренд отсутствовал (см. табл. 1). На протяжении последних десяти лет (2013–2022 гг.) количество дней с ветром скоростью 15 м/с и более в районе Большой Ньюфаундлендской банки составляло в среднем 181 за год (при норме 141, рост относительно 1980-х гг. на 37%), в море Ирмингера – 183 (при норме 149, рост на 28%), а в Баренцевом море – 152 (при норме 113, рост на 58%).

В штормовой активности над Большой Ньюфаундлендской банкой и в морях Ирмингера и Норвежском выделены циклы с периодами 6–7 лет (11, 29 и 12% соответственно) и 13–14 лет (14, 23 и 11%). Помимо этого, в районе Большой Ньюфаундлендской банки имеет место 4-летняя цикличность (11%), а в Норвежском море – 8-летняя (29%). В Баренцевом море от-

мечены циклы с периодами 4 года (12%), 11 лет (16%) и 21 год (13%).

В последние десятилетия площадь атлантических вод (АВ, с температурой более 3 °С) в слое 50–100 м в Баренцевом море увеличивалась (на 36 тыс. км² за декаду, $R^2_{\text{тренда}} = 0,48$, p -value = 0,000), а площадь арктических вод (АрВ, с температурой ниже 0 °С), наоборот, уменьшалась (на 59 тыс. км² за декаду, $R^2_{\text{тренда}} = 0,59$, p -value = 0,000) (рис. 7). В 2016 г. атлантические и арктические воды занимали, соответственно, рекордно большую (52% от расчётной области) и малую (12%) площади с 1965 г. Предыдущие рекордные значения отмечались в 2012 г. (48 и 16% соответственно). Полученные оценки не противоречат результатам предыдущих исследователей [Johannesen et al., 2012; Eriksen et al., 2017; Карсаков и др., 2018; Lind et al., 2018; Трофимов, 2021].

В рассматриваемый период увеличение площади тёплых придонных вод (ТПВ, с температурой выше 1 °С) составляло 49 тыс. км² за декаду ($R^2_{\text{тренда}} = 0,40$, p -value = 0,000), а сокращение площади холодных придонных вод (ХПВ, с температурой ниже 0 °С) –



Рис. 7. Площади, занятые водами с разной температурой в слое 50–100 м (сверху) и у дна (снизу) в Баренцевом море (71–79° с. ш. 25–55° в. д.) в августе–сентябре 1981–2022 гг.

Fig 7. Areas covered by water with different temperatures in the 50–100 m layer (upper panel) and near the bottom (lower panel) in the Barents Sea (71–79°N, 25–55°E) in August–September 1981–2022

97 тыс. км² за декаду ($R^2_{\text{тренда}} = 0,54$, $p\text{-value} = 0,000$). С начала XXI века холодные придонные воды занимали максимальную площадь в 2003 г. (66% от расчётной области) и очень небольшую (3–11%) в 2007, 2008, 2012 и 2016–2018 гг. (см. рис. 7). В 2016 г. она достигла рекордно низкого (с 1965 г.) значения 3%. Площадь, занятая тёплыми придонными водами, напротив, в 2003 г. была наименьшей (18%) с 2000 г., а в 2006–2008, 2012 и 2016–2018 гг. — достаточно большой (45–59%) с максимальным значением в 2016 г. Однако, после 2016 г. наблюдается тенденция на уменьшение площади тёплых придонных вод и увеличение — холодных (см. рис. 7).

Для площадей, занятых разными водными массами, выделены циклические составляющие с периодами 5–6 лет (АрВ — 15%, ТПВ — 11%, ХПВ — 12%), 8 лет (АВ — 20%, АрВ — 13%, ТПВ — 28%, ХПВ — 30%) и 21 год (АВ — 15%, АрВ — 24%, ТПВ — 17%, ХПВ — 20%).

Современное потепление, как и в 1930–1950-е гг., было вызвано усилением переноса тёплого атлантического воздуха из Северной Атлантики в Западную Арктику, а также увеличением адвекции тепла Северо-Атлантическим и Норвежским течениями [Ingvaldsen et al., 2003, Jakobsen, Ozhigin, 2011]. В работе получены статистически значимые прямые связи климатического индекса Баренцева моря с индексом АМО ($r = 0,68$, $p\text{-value} = 0,000$, сдвиг 2 года) и теплозапасом Норвежского моря ($r = 0,76$, $p\text{-value} = 0,000$, сдвиг 1 год), что может указывать на адвективную природу изменчивости океанографических условий Баренце-

ва моря. В то же время ледовитость Баренцева, Карского морей и Арктики имеет статистически значимые обратные связи с теплозапасом Норвежского моря, штормовой активностью над Баренцевым морем, температурой воздуха и воды Баренцева моря, а также с площадями, занимаемыми в нём атлантическими и арктическими водами (с последней связь прямая) (табл. 2). Это подтверждает сделанный ранее другими исследователями [Maslowski et al., 2004; Levitus et al., 2009; Årthun et al., 2012; Boitsov et al., 2012; Крашенинникова С., Крашенинникова М., 2019; Kumar et al., 2021; Лис и др., 2023] вывод о важной роли гидрометеорологических и океанографических условий Баренцева моря в изменчивости ледовых условий не только Баренцева моря, но и Арктики в целом.

Современное длительное потепление вод морей Западной Арктики является благоприятным для многих тепловодных бореальных видов водных биологических ресурсов. Одним из следствий потепления вод Баренцева и Карского морей было обнаружение на акватории Карского моря летом 2007–2008 гг. таких тепловодных промысловых видов, как окунь-клювач, треска, пикша, мойва, зубатки [Долгов и др., 2011], продолживших встречаться в этом море и в последующие годы [Орлов и др., 2020]. В середине 2010-х гг., вследствие значительного потепления вод Норвежского течения и его ветвей, в Баренцевом море, западнее разреза «Кольский меридиан», было выловлено несколько экземпляров такого тепловодного вида, как скумбрия. Однако, наметившаяся со второй половины 2010-х гг. тенденция на похолодание вод в опи-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между ледовитостью Баренцева, Карского морей и Арктики и другими климатическими параметрами за период 1981–2022 гг. Все коэффициенты статистически значимы с вероятностью 99,9%

Table 2. Correlation coefficients between ice extent of the Barents, Kara seas and Arctic and other climatic parameters for 1981–2022. All coefficients are statistically significant with a probability of 99,9%

Параметр	Ледовитость Баренцева моря	Ледовитость Карского моря	Ледовитость Арктики
Теплозапас вод Норвежского моря	–0,77 (со сдвигом 1 год)	–0,71 (со сдвигом 2 года)	–0,80 (со сдвигом 2 года)
Штормовая активность над Баренцевым морем	–0,64	–0,69 (со сдвигом 2 года)	–0,77 (со сдвигом 2 года)
Температура воздуха над востоком Баренцева моря	–0,95	–0,83	–0,82
ТПО на западе Баренцева моря	–0,87	–0,74	–0,81
Температура атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан»	–0,89	–0,68	–0,77
Площадь атлантических вод в Баренцевом море	–0,89	–0,74	–0,74
Площадь арктических вод в Баренцевом море	+0,94	+0,75	+0,81

сываемых промыслово-значимых районах при её сохранении может помешать теплолюбивым видам рыб проникать дальше на север.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С начала 1980-х гг. в Северной Атлантике и Западной Арктике на фоне увеличивающейся штормовой активности наблюдалось значительное повышение температуры воздушных и водных масс и, как следствие, сокращение площади льдов в полярных широтах. В морях Западной Арктики устойчивый тёплый период отмечался с начала XXI века, а наиболее тёплые годы – с 2003–2005 гг. Пик потепления в море Ирмингера пришёлся на 2010 г., в Норвежском море – на 2014 г., в Баренцевом море – на 2016 г. Максимальные значения температуры воды и воздуха в Северо-Западной Атлантике отмечались в 2006 и 2012 гг., в районе банки Рокколл – в 1997 и 2007 гг., в Карском море – в 2012, 2016 и 2020 гг. Тенденция на похолодание зарегистрирована в Северной Атлантике с 2010–2012 гг., в Норвежском и Баренцевом морях – с 2014–2016 гг.

В описываемый период наблюдалось постепенное смещение потепления из Северной Атлантики в моря Западной Арктики: вначале в Норвежское, а затем в Баренцево и Карское. Пик потепления в Баренцевом море пришёлся на середину 2010-х гг., когда в море Ирмингера и районах Большой Ньюфаундлендской банки и банки Рокколл уже отчётливо прослеживался тренд на похолодание.

На фоне положительных трендов в температуре воздуха, воды, количестве штормовых дней и отрицательного тренда в ледовитости в изменениях этих параметров также присутствовали циклические составляющие. Чаще всего отмечались циклы с периодами 5–6, 8, 14 и 21 год, их вклад в дисперсию детрендрованных рядов достигал соответственно 29, 30, 32 и 40%.

Важно продолжать мониторинг условий среды и предвидеть их дальнейшие изменения, поскольку от того, какая тенденция (потепление или похолодание) будет наблюдаться в ближайшие годы, будет зависеть характер распределения в морях Западной Арктики различных гидробионтов, в том числе промысловых.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Полярного филиала ФГБНУ «ВНИРО» по теме «Оценка состояния, распределения, численности и воспроизводства водных биологических ресурсов, а также среды их обитания».

ЛИТЕРАТУРА

- Винниченко В.И., Сентябов Е.В. 2005. Распределение миграции пикши (*Melanogrammus aeglefinus*) на банке Рокколл // Вопросы рыболовства. Т. 6. № 1(21). С. 44–55.
- Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. 2009. О характере и причинах изменений климата Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. № 81. С. 15–23.
- Долгов А.В., Смирнов О.В., Сентябов Е.В., Древетняк К.В., Четыркина О.Ю. 2011. Новые данные по икhtiофауне Карского моря (по результатам исследований ПИНРО в 2007–2008 гг.) // Наземные и морские экосистемы. М.: Paulsen. С. 112–128.
- Елисеева И.И., Юзбашев М.М. 2004. Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика. 656 с.
- Жичкин А.П. 2015. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // Вестник КНЦ РАН. № 1(20). С. 55–64.
- Карсаков А.Л., Боровков В.А., Сентябов Е.В., Ившин В.А., Баякин Г.Г., Аболмасова З.В. 2016. Океанографические условия в морях Северо-Европейского бассейна и Северной Атлантики в 2014–2015 гг. и их влияние на распределение промысловых рыб // Труды ВНИРО. Т. 164. С. 5–21.
- Карсаков А.Л., Трофимов А.Г., Анциферов М.Ю., Ившин В.А., Губанищев М.А. 2022. 120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан». Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича. 145 с.
- Карсаков А.Л., Трофимов А.Г., Титов О.В. 2018. Основные особенности условий среды в Баренцевом море в 2017 г. // Труды ВНИРО. Т. 173. С. 17–32. DOI: 10.36038/2307–3497–2018–173–17–32.
- Коросов А.В., Горбач В.В. 2007. Компьютерная обработка биологических данных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ. 76 с.
- Крашенинникова С.Б., Крашенинникова М.А. 2019. Причины и особенности долговременной изменчивости ледовитости Баренцева моря // Лёд и Снег. Т. 59. № 1. С. 112–122. DOI: 10.15356/2076–6734–2019–1–112–122.
- Лис Н.А., Егорова Е.С. 2022. Климатическая изменчивость ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 68. № 3. С. 234–247. DOI: 10.30758/0555–2648–2022–68–3–234–247.
- Лис Н.А., Чернявская Е.А., Миронов Е.У., Тимохов Л.А., Егорова Е.С. 2023. Информативность факторов, формирующих долгопериодные колебания ледовитости отдельных районов Баренцева моря // Российская Арктика. Т. 5. № 2. С. 17–32. DOI: 10.24412/2658–4255–2023–2–17–32.
- Мохов И.И. 2020. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 66. № 4. С. 446–462. DOI: 10.30758/0555–2648–2020–66–4–446–462.
- Орлов А.М., Бензик А.Н., Рыбаков М.О., Носов М.А., Горбатенко К.М., Ведищева Е.В., Орлова С.Ю. 2020. Некоторые

- предварительные результаты биологических исследований в Карском море на НИС «Профессор Леванидов» в сентябре 2019 г. // Труды ВНИРО. Т. 182. С. 201–215. DOI: 10.36038/2307–3497–2020–182–201–215.
- Соколов К.М. (ред). 2022. Состояние сырьевых биологических ресурсов Баренцева, Белого и Карского морей и Северной Атлантики в 2022 г. Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича. 161 с.
- Тимохов Л.А., Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Юлин А.В. 2019. Климатические изменения сезонных и долгопериодных колебаний ледовитости Гренландского и Баренцева морей // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 65. № 2. С. 148–168. DOI: 10.30758/0555–2648–2019–65–2–148–168.
- Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Ившин В.А. 2018. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека // Труды ВНИРО. Т. 173. С. 79–91. DOI: 10.36038/2307–3497–2018–173–79–91.
- Трофимов А.Г. 2021. Современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря // Труды ВНИРО. Т. 186. № 4. С. 101–118. DOI: 10.36038/2307–3497–2021–186–101–118.
- Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. 2007. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. № 75. С. 149–160.
- Экосистема Карского моря. 2008. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 261 с.
- Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B. 2012. Quantifying the Influence of Atlantic Heat on Barents Sea Ice Variability and Retreat // J. of Climate. V. 25. Iss. 13. P. 4736–4743. DOI: 10.1175/JCLI-D-11–00466.1.
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. of Marine Science. V. 69. № 5. P. 833–840. DOI: 10.1093/icesjms/fss075.
- Dalpadado P., Arrigo K.R., Hjøllø S.S., Rey F., Ingvaldsen R.B., Sperfeld E., van Dijken G.L., Stige L.C., Olsen A., Ottersen G. 2014. Productivity in the Barents Sea – response to recent climate variability // PLoS ONE. V. 9. № 5. Art. e95273. DOI: 10.1371/journal.pone.0095273.
- Eriksen E., Ingvaldsen R.B., Nedreaas K., Prozorkevich D. 2015. The effect of recent warming on polar cod and beaked redfish juveniles in the Barents Sea // Regional Studies in Marine Science. V. 2. P. 105–112. DOI: 10.1016/j.rsma.2015.09.001.
- Eriksen E., Skjoldal H.R., Gjøsæter H., Primicerio R. 2017. Spatial and temporal changes in the Barents Sea pelagic compartment during the recent warming // Progress in Oceanography. V. 151. P. 206–226. DOI: 10.1016/j.pocan.2016.12.009.
- González-Pola C., Larsen K.M. H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. (Eds.). 2022. ICES Report on ocean climate 2020 // ICES Cooperative Research Reports. No. 356. 121 p. DOI: 10.17895/ices.pub.19248602.
- Ingvaldsen R.B., Gjøsæter H. 2013. Responses in spatial distribution of Barents Sea capelin to changes in stock size, ocean temperature and ice cover // Marine Biology Research. V. 9. № 9. P. 867–877. DOI: 10.1080/17451000.2013.775450.
- Ingvaldsen R., Loeng H., Ottersen G., Ådlandsvik B. 2003. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s // ICES Marine Science Symposia. V. 219. P. 160–168.
- Jakobsen T., Ozhigin V.K. (Eds.). 2011. The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim: Tapir Academic Press. 825 p.
- Johannesen E., Ingvaldsen R.B., Bogstad B., Dalpadado P., Eriksen E., Gjøsæter H., Knutsen T., Skern-Mauritzen M., Stiansen J.E. 2012. Changes in Barents Sea ecosystem state, 1970–2009: climate fluctuations, human impact, and trophic interactions // ICES J. of Marine Science. V. 69. № 5. P. 880–889. DOI: 10.1093/icesjms/fss046.
- Kumar A., Yadav J., Mohan R. 2021. Spatio-temporal change and variability of Barents-Kara sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications // Science of The Total Environment. V. 753. Art. 142046. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142046.
- Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. 2009. Barents Sea multidecadal variability // Geophysical Research Letters. V. 36. Art. L19604. DOI: 10.1029/2009GL039847.
- Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. 2018. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // Nature Climate Change. V. 8. P. 634–639. DOI: 10.1038/s41558–018–0205-y.
- Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J.L., Semtner A.J. 2004. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // J. of Geophysical Research. V. 109. Art. C03032. DOI: 10.1029/2001JC001039.
- Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. 2018. Seasonal and Regional Manifestation of Arctic Sea Ice Loss // J. of Climate. V. 31. Iss. 12. P. 4917–4932. DOI: 10.1175/JCLI-D-17–0427.1.
- Parkinson C.L., Cavalieri D.J. 2008. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006 // J. of Geophysical Research. V. 113. Art. C07003. DOI: 10.1029/2007JC004558.
- Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fahrbach E., Frohlov I.E., Gerdes R., Hansen E., Holfort J., Ivanov V.V., Johnson M.A., Karcher M., Kauker F., Morison J., Orvik K.A., Schauer U., Simmons H.L., Skagseth O., Sokolov V.T., Steele M., Timokhov L.A., Walsh D., Walsh J.E. 2005. One more step toward a warmer Arctic // Geophysical Research Letters. V. 32. № 17. Art. L17605. DOI: 10.1029/2005GL023740.
- The Norwegian Sea Ecosystem. 2004. Tapir Academic Press, Trondheim. 560 p.
- Wu Z., Wang X. 2019. Variability of Arctic Sea Ice (1979–2016) // Water. V. 11. Iss. 1. Art. 23. DOI: 10.3390/w11010023.

REFERENCES

- Vinnichenko V.I., Sentyabov E.V. 2005. Distribution and migrations of haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) at the Rockall Bank // Problems of Fisheries. V.6. № 1(21). P. 44–55. (In Russ.).
- Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitsky V.M., Frolov I.E. 2009. On the character and causes of the Earth's climate

- changes // Arctic and Antarctic Research. № 81. P. 15–23. (In Russ.).
- Dolgov A. V., Smirnov O. V., Sentyabov E. V., Drevetnyak K. V., Chetyrkina O. Yu. 2011. New data on the ichthyofauna of the Kara Sea (based on the results of PINRO research in 2007–2008) // Land and Marine Ecosystems. M.: Paulsen. P. 112–128. (In Russ.).
- Eliseeva I. I., Yuzbashev M. M. 2004. Common theory of statistics. M.: Finance and statistics. 656 p. (In Russ.).
- Zhichkin A. P. 2015. Dynamics of interannual and seasonal ice coverage anomalies in the Barents and Kara seas // Herald of the Kola Science Centre of RAS. № 1(20). P. 55–64. (In Russ.).
- Karsakov A. L., Borovkov V. A., Sentyabov E. V., Ivshin V. A., Balyakin G. G., Abolmasova Z. V. 2016. Oceanographic conditions in the seas of the North European Basin and the North Atlantic in 2014–2015 and their influence on the distribution of commercial fish // Trudy VNIRO. V. 164. P. 5–21. (In Russ.).
- Karsakov A. L., Trofimov A. G., Antsiferov M. Yu., Ivshin V. A., Gubanishchev M. A. 2022. 120 years of oceanographic observations along the Kola Section. Murmansk: N.M. Knipovich PINRO Publish. 145 p. (In Russ.).
- Karsakov A. L., Trofimov A. G., Titov O. V. 2018. Main features of the environmental conditions in the Barents Sea in 2017 // Trudy VNIRO. V. 173. P. 17–32. DOI: 10.36038/2307–3497–2018–173–17–32. (In Russ.).
- Korosov A. V., Gorbach V. V. 2007. Computer processing of biological data. Petrozavodsk: PetrGU Publish. 76 p. (In Russ.).
- Krasheninnikova S. B., Krasheninnikova M. A. 2019. Causes and features of the long-term variability of the ice extent of the Barents Sea // Ice and Snow. V. 59. № 1. P. 112–122. DOI: 10.15356/2076–6734–2019–1–112–122. (In Russ.).
- Lis N. A., Egorova E. S. 2022. Climatic variability of the ice extent of the Barents Sea and its individual areas // Arctic and Antarctic Research. V. 68. № 3. P. 234–247. DOI: 10.30758/0555–2648–2022–68–3–234–247. (In Russ.).
- Lis N. A., Cherniavskaya E. A., Mironov E. U., Timokhov L. A., Egorova E. S. 2023. Informativeness (information-bearing) of factors forming interannual variability of the Barents Sea and its individual areas ice cover // Russian Arctic. V. 5. № 2. P. 17–32. DOI: 10.24412/2658–4255–2023–2–17–32. (In Russ.).
- Mokhov I. I. 2020. Features of modern climate change in the Arctic and their consequences // Arctic and Antarctic Research. V. 66. No. 4. P. 446–462. DOI: 10.30758/0555–2648–2020–66–4–446–462. (In Russ.).
- Orlov A. M., Benzik A. N., Rybakov M. O., Nosov M. A., Gorbatenko K. M., Vedischeva E. V., Orlova S. Yu. 2020. Some preliminary results of biological studies in the Kara Sea on the R/V Professor Levanidov in September 2019 // Trudy VNIRO. V. 182. P. 201–215. DOI: 10.36038/2307–3497–2020–182–201–215. (In Russ.).
- Sokolov K. M. (Ed). 2022. The state of raw biological resources of the Barents, White and Kara Seas and the North Atlantic in 2022. Murmansk: N.M. Knipovich PINRO Publish. 161 p. (In Russ.).
- Timokhov L. A., Vyazigina N. A., Mironov E. U., Yulin A. V. 2019. Climatic changes of seasonal and inter-annual variability of the ice cover of the Greenland and Barents Seas // Arctic and Antarctic Research. V. 65. № 2. P. 148–168. DOI: 10.30758/0555–2648–2019–65–2–148–168. (In Russ.).
- Trofimov A. G., Karsakov A. L., Ivshin V. A. 2018. Climate change in the Barents Sea over the past half century // Trudy VNIRO. V. 173. P. 79–91. DOI: 10.36038/2307–3497–2018–173–79–91. (In Russ.).
- Trofimov A. G. 2021. The current trends in oceanographic conditions of the Barents Sea // Trudy VNIRO. V. 186. № 4. P. 101–118. DOI: 10.36038/2307–3497–2021–186–101–118. (In Russ.).
- Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Kovalev E. G., Smolyanitsky V. M. 2007. Climatic changes of ice conditions in the Arctic seas of the Eurasian shelf // Arctic and Antarctic Research. № 75. P. 149–160. (In Russ.).
- Ecosystem of the Kara Sea. 2008. Murmansk: PINRO Publish. 261 p. (In Russ.).
- Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R. B. 2012. Quantifying the Influence of Atlantic Heat on Barents Sea Ice Variability and Retreat // J. of Climate. V. 25. Iss. 13. P. 4736–4743. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.
- Boitsov V. D., Karsakov A. L., Trofimov A. G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. of Marine Science. V. 69. № 5. P. 833–840. DOI: 10.1093/icesjms/fss075.
- Dalpadado P., Arrigo K. R., Hjøllø S. S., Rey F., Ingvaldsen R. B., Sperfeld E., van Dijken G. L., Stige L. C., Olsen A., Ottersen G. 2014. Productivity in the Barents Sea – response to recent climate variability // PLoS ONE. V. 9. № 5. Art. e95273. DOI: 10.1371/journal.pone.0095273.
- Eriksen E., Ingvaldsen R. B., Nedreaas K., Prozorkevich D. 2015. The effect of recent warming on polar cod and beaked redfish juveniles in the Barents Sea // Regional Studies in Marine Science. V. 2. P. 105–112. DOI: 10.1016/j.rsma.2015.09.001.
- Eriksen E., Skjoldal H. R., Gjørseter H., Primicerio R. 2017. Spatial and temporal changes in the Barents Sea pelagic compartment during the recent warming // Progress in Oceanography. V. 151. P. 206–226. DOI: 10.1016/j.pocean.2016.12.009.
- González-Pola C., Larsen K. M. H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. (Eds.). 2022. ICES Report on ocean climate 2020 // ICES Cooperative Research Reports. No. 356. 121 p. DOI: 10.17895/ices.pub.19248602.
- Ingvaldsen R. B., Gjørseter H. 2013. Responses in spatial distribution of Barents Sea capelin to changes in stock size, ocean temperature and ice cover // Marine Biology Research. V. 9. № 9. P. 867–877. DOI: 10.1080/17451000.2013.775450.
- Ingvaldsen R., Loeng H., Ottersen G., Ådlandsvik B. 2003. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s // ICES Marine Science Symposia. V. 219. P. 160–168.
- Jakobsen T., Ozhigin V. K. (Eds.). 2011. The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim: Tapir Academic Press. 825 p.
- Johannesen E., Ingvaldsen R. B., Bogstad B., Dalpadado P., Eriksen E., Gjørseter H., Knutsen T., Skern-Mauritzen M., Stiansen J. E. 2012. Changes in Barents Sea ecosystem state, 1970–

- 2009: climate fluctuations, human impact, and trophic interactions // *ICES J. of Marine Science*. V. 69. № 5. P. 880–889. DOI: 10.1093/icesjms/fss046.
- Kumar A., Yadav J., Mohan R. 2021. Spatio-temporal change and variability of Barents-Kara sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications // *Science of The Total Environment*. V. 753. Art. 142046. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142046.
- Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. 2009. Barents Sea multidecadal variability // *Geophysical Research Letters*. V. 36. Art. L19604. DOI: 10.1029/2009GL039847.
- Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. 2018. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // *Nature Climate Change*. V. 8. P. 634–639. DOI: 10.1038/s41558-018-0205-y.
- Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J.L., Semtner A.J. 2004. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // *J. of Geophysical Research*. V. 109. Art. C03032. DOI: 10.1029/2001JC001039.
- Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. 2018. Seasonal and Regional Manifestation of Arctic Sea Ice Loss // *J. of Climate*. V. 31. Iss. 12. P. 4917–4932. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0427.1.
- Parkinson C.L., Cavalieri D.J. 2008. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006 // *J. of Geophysical Research*. V. 113. Art. C07003. DOI: 10.1029/2007JC004558.
- Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fahrbach E., Frohlov I.E., Gerdes R., Hansen E., Holfort J., Ivanov V.V., Johnson M.A., Karcher M., Kauker F., Morison J., Orvik K.A., Schauer U., Simmons H.L., Skagseth O., Sokolov V.T., Steele M., Timokhov L.A., Walsh D., Walsh J.E. 2005. One more step toward a warmer Arctic // *Geophysical Research Letters*. V. 32. № 17. Art. L17605. DOI: 10.1029/2005GL023740.
- The Norwegian Sea Ecosystem*. 2004. Tapir Academic Press, Trondheim. 560 p.
- Wu Z., Wang X. 2019. Variability of Arctic Sea Ice (1979–2016) // *Water*. V. 11. Iss. 1. Art. 23. DOI: 10.3390/w11010023.

Поступила в редакцию 09.06.2023 г.
Принята после рецензии 18.09.2023 г.