

ОКЕАНОЛОГИЯ OCEANOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-276-294>

УДК 551.467.3:551.326.1



Тренды температуры поверхности океана отдельных районов Баренцева моря в зимний сезон и механизмы их формирования

Н.А. Лис✉, Е.А. Чернявская, Л.А. Тимохов

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

✉nalis@aari.ru

ID НАЛ, 0000-0003-0762-5188; ЕАЧ, 0000-0002-8517-1057; ЛАТ, 0009-0001-9492-2174

Аннотация. В статье на основе данных реанализа ERA-5 за период 1949–2023 гг. был проведен анализ изменений температуры поверхности океана (ТПО) в зимний сезон для западного, северо-восточного и юго-восточного районов Баренцева моря и рассмотрена связь возникающих тенденций с влиянием различных внешних факторов в современных условиях меняющегося климата. Для оценки отклика на изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы и притока атлантических вод был проведен анализ характера изменчивости приповерхностной температуры воды, температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и ТПО в указанных районах Баренцева моря с использованием метода вейвлет-когерентности. Была показана неоднородность этих изменений на протяжении трех временных периодов (1949–1969 гг., 1970–1990 гг., 1991–2023 гг.), связанная, по-видимому, с изменением характера атмосферной циркуляции.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, Баренцево море, когерентность, температура поверхности океана, тренды

Для цитирования: Лис Н.А., Чернявская Е.А., Тимохов Л.А. Тренды ТПО отдельных районов Баренцева моря в зимний сезон и механизмы их формирования. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(3):276–294. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-276-294>

Поступила 08.05.2024

После переработки 24.06.2024

Принята 27.06.2024

SST trends in certain areas of the Barents Sea in the winter season and mechanisms of their formation

Natalia A. Lis✉, Ekaterina A. Cherniavskaia, Leonid A. Timokhov

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

✉nalis@aari.ru

ID NAL, 0000-0003-0762-5188; EAC, 0000-0002-8517-1057; LAT, 0009-0001-9492-2174

Abstract. The climate changes observed over the past few decades are most clearly manifested in the Arctic Ocean. Sea surface temperature (SST) is one of the most reliable indicators of climate change. In this paper we analyze the changes of winter SST for the western, northeastern and southeastern regions of the Barents Sea and examine the relationship of the emerging STS trends with the influence of various external factors. The working data set is represented by average monthly SST values taken from the ERA-5 reanalysis for the period 1949–2023 with a spatial resolution of $0.25 \times 0.25^\circ$ and average water temperature values on the Kola Meridian section in the 0–50 m layer. Additionally, the Arctic Oscillation (AO), Arctic Dipole (AD) and Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) indices were used as external factors that may affect SST variability. The time series analyzed was divided into three periods: 1949–1969, 1970–1990, 1991–2023, where the variability of the analyzed parameters was different. Thus, in the first period the trend in SST changes was negative, for the second period it was slightly negative or neutral, and for the third period it was positive. It is shown that SST in all the regions of the Barents Sea has undergone significant changes, which were most noticeable in the “warm” period of 1991–2023, when the rate of SST increasing was up to $10 \cdot 10^{-2}^\circ\text{C}/\text{year}$ in areas under the warm Atlantic water influence. The analysis of SST variability in the Barents Sea shows that the positive anomalies observed in the recent years are most likely associated with the changes in the atmospheric circulation. The Wavelet coherence analysis showed the closest agreement between the changes in the sea surface temperature and the AD index in the winter season, and with the AMO index.

Keywords: atmospheric circulation, Barents Sea, coherence, ocean surface temperature, trend

For citation: Lis N.A., Cherniavskaia E.A., Timokhov L.A. SST trends in certain areas of the Barents Sea in the winter season and mechanisms of their formation. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(3):276–294. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-276-294>

Received 08.05.2024

Revised 24.06.2024

Accepted 27.06.2024

Введение

В Северном Ледовитом океане (СЛО) наиболее ярко проявляются изменения климата, наблюдаемые несколько последних десятилетий [1, 2]. В частности, в период с 1979 по 2018 г. доля многолетних льдов возрастом не менее пяти лет в составе морского ледяного покрова СЛО сократилась примерно на 90 %. Из-за сезонного сокращения площади ледяного покрова, благодаря усиленному поглощению солнечной радиации, более интенсивному взаимодействию океана с атмосферой и увеличению с 2000-х гг. затора тепла из более низких широт, температура верхнего перемешанного слоя СЛО в летние месяцы повышалась со скоростью около $0,5^\circ\text{C}$ в декаду за период 1982–2017 гг. [2]. А температура воздуха в Арктике увеличивалась в 2 раза быстрее, чем в других регионах планеты [3], — феномен, названный эффектом «арктического усиления» [4].

Наблюдаемые климатические изменения сказываются не только на гидрологических условиях района, они оказывают комплексное влияние на биоразнообразие и продуктивность как непосредственно СЛО, так и прилегающих акваторий. Бенефициаром биогеографических изменений является Баренцево море как связующий район между Атлантическим океаном и Арктическим бассейном. Здесь с 1994 года отмечается увеличение видового разнообразия арктической и субарктической морской фауны практически в 2 раза [5].

Температура поверхности океана (ТПО), наряду с ледовитостью, является одним из наиболее надежных индикаторов изменений климата. Ледовитость Баренцева моря рассматривалась ранее в нескольких работах [6, 7]. Поэтому в данной работе была исследована межгодовая изменчивость температуры поверхности океана отдельных районов Баренцева моря в зимний сезон.

Оценка изменчивости и тенденции ТПО в арктическом регионе в последнее время находятся в центре внимания. Так, Линд с соавторами [8] на временном периоде 1970–2016 гг. исследовали связь роста температуры воды в северной части Баренцева моря с уменьшением импорта морского льда. Отмечается, что именно северные районы Баренцева и Карского морей испытывают наиболее сильные изменения температуры, которые охватывают всю толщу воды. Так происходит, по мнению авторов, из-за дефицита поступления пресной воды за счет снижения импорта льдов в эти районы и, как следствие, ослабления стратификации между поверхностным слоем и слоем теплых атлантических вод. Это, в свою очередь, приводит к активации теплообмена между слоями и росту ТПО.

Во многих работах отмечается, что после 2004 г. на всей акватории Баренцева моря наблюдался значительный климатический сдвиг с ускорением тенденции роста ТПО в северной и южной частях Баренцева моря [8, 9]. Анализ ТПО, ледовитости и метеорологических параметров (температура воздуха, зональные и меридиональные компоненты ветра) в Баренцевом море с 1982 по 2020 г. показал, что скорость повышения ТПО в этот период составила около $0,35 \pm 0,04$ °C/десятилетие и $0,40 \pm 0,04$ °C/десятилетие в покрытых льдом и свободных ото льда районах соответственно [10]. Было также показано, что на протяжении 39-летнего периода исследования изменчивость ТПО и ледовитости можно было отнести на счет атлантической мультидекадной осцилляции (АМО), а атмосферные изменения были обусловлены климатическими режимами восточно-атлантической формы циркуляции.

В настоящей статье для оценки тенденций долгопериодной изменчивости проводится анализ изменений ТПО в зимний сезон для трех районов Баренцева моря на основе данных реанализа за период 1949–2023 гг. [11] и исследуется связь возникающих тенденций с влиянием различных внешних факторов.

Материалы и методы

Данные по температуре поверхности океана, давлению на уровне моря и приповерхностной температуре воздуха (ПТВ) взяты из реанализа ERA-5 [12] за период 1949–2023 гг. с дискретностью в месяц в узлах сетки $0,25 \times 0,25^\circ$. При анализе изменений ТПО в качестве вспомогательных характеристик использовались значения ПТВ, средней температуры воды основной ветви Мурманского течения на разрезе «Кольский меридиан» в слое 0–50 м (предоставлена авторами работ [13, 14]).

Дополнительно, в качестве наиболее вероятных факторов, формирующих изменчивость ТПО, были использованы индексы арктического колебания (АК), арктического диполя (АД) и атлантической мультидекадной осцилляции (АМО). АК определялся как ведущая эмпирическая ортогональная функция аномалий давления на высоте 1000 гПа в Северном полушарии к полюсу от 20° с. ш. [15] и характеризует обмен атмосферной массой между Арктикой и средними широтами. Данные по индексу были взяты с сайта Национального центра экологической информации (NOAA) [16]. АД был рассчитан как вторая мода разложения по естественным ортогональным функциям полей давления на уровне моря от 70° с. ш. к полюсу. Этот индекс характеризуется сменой областей высокого и низкого давления над Карским морем и Канадским Арктическим архипелагом, способствуя либо препятствуя поступлению теплых воздушных масс из средних широт в моря Северо-Европейского бассейна [17–19]. Индекс АМО отражает периодическую изменчивость ТПО в Северной Атлантике [20] и был взят из электронного ресурса NOAA [21].

Границы районов Баренцева моря для удобства соответствуют границам районов однородного ледового режима [11].

Линейный тренд рассчитывался по формулам [22]:

$$y = a_1 t + a_0, \quad a_1 = \frac{\sigma_y}{\sigma_t} R, \quad a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{t}, \quad (1)$$

где σ — стандартное отклонение, а R — коэффициент корреляции:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N [(y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})]}{N \cdot \sigma_y \cdot \sigma_t}. \quad (2)$$

Для оценки связи между ТПО, температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» и гидрометеорологическими индексами рассчитывалась вейвлет-когерентность r^2 . Данная функция интерпретируется как локализованный коэффициент корреляции в квадрате в частотно-временном пространстве [23] и рассчитывается следующим образом:

$$r^2(t_1, t_2) = \frac{|S(t_1^{-1} W(t_1, t_2))|^2}{S(t_1^{-1} |W(t_1)|^2) \cdot S(t_1^{-1} |W(t_2)|^2)}, \quad (3)$$

где t_1 и t_2 — временные ряды, между которыми рассчитывается когерентность; S — сглаживающий оператор по времени и частоте; $W(t_1, t_2)$ — перекрестное вейвлет-преобразование; $W(t_1)$ и $W(t_2)$ — локальный вейвлет первого и второго ряда соответственно.

Расчеты по разложению по естественным ортогональным функциям и вейвлет-когерентности выполнялись с помощью языка программирования R, предназначенного для статистической обработки данных в среде RStudio [24]. В качестве основной библиотеки для расчета вейвлет-когерентности использовалась функция `wtc()` из пакета `biwavelet`, в качестве материнского вейвлета использовался вейвлет Морле, разложения по естественным ортогональным функциям выполнялись с помощью функции `rgsomp()`.

Также для каждого узла сетки был рассчитан линейный тренд и проверен на значимость по критерию Стьюдента на уровне значимости 0,05.

Результаты

Пространственные изменения ТПО Баренцева моря

Важным этапом при расчете трендовых составляющих является выбор временного интервала. В разных работах предлагаются различные варианты выделения периодов в зависимости от рассматриваемых процессов. Так, в одной из работ [25] для Баренцева моря на основе полученных авторами индексов, в которые входит и температура воды, были установлены два периода с разными термическими условиями: холодный — 1965–1989 гг. и теплый — 1990–2017 гг.

В работе В.В. Иванова и др. [26] выделены периоды (а) относительного потепления 1921–1960 гг. с доминированием форм атмосферной циркуляции Е + С (восточная и центральная атмосферная циркуляция по классификации Вангенгейма–Гирса); (б) относительного похолодания 1961–1987 гг. с преобладанием формы атмосферной циркуляции Е (восточная атмосферная циркуляция); (в) относительного потепления 1988–2018 гг. с доминированием формы атмосферной циркуляции W (западная атмосферная циркуляция).

Что касается морской среды, В.И. Бышев с соавторами [27] показали, что с 1970-х до 1990-х гг. теплосодержание верхнего слоя в ряде океанических районов уменьшалось, а средняя поверхностная температура повысилась в Северном полушарии по данным IPCC [28].

С учетом результатов аналитического обзора анализируемый временной ряд был разделен на три периода: 1949–1969 гг. («условно холодный»), 1970–1990 гг. («условно стабильный»), 1991–2023 гг. («условно теплый»). В каждом узле сетки для ТПО Баренцева моря рассчитан линейный тренд за выделенные периоды и оценена его значимость. Величина тренда представлена на рис. 1.

Наиболее высокие значения величины тренда в межгодовых изменениях ТПО (как отрицательные в 1949–1969 гг., так и положительные в 1991–2023 гг.) наблюдаются в районе Центрального плато и Медвежинского желоба, где происходит основное поступление тепла атлантических вод с центральной и северной ветвями Нордкапского течения (см. рис. 1а). Рассмотрим каждый период более подробно.

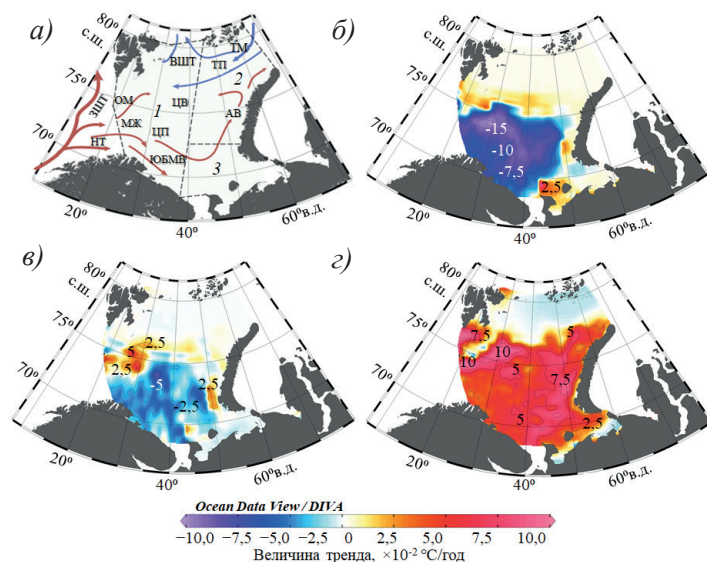


Рис. 1. Схема основных течений и подводные географические объекты Баренцева моря с нанесенными границами районов (а) и пространственное распределение величины линейного тренда ТПО в зимний сезон (декабрь–апрель) за периоды: б) 1949–1969 гг.; в) 1970–1990 гг.; г) 1991–2023 гг.

1 — западный, 2 — северо-восточный, 3 — юго-восточный районы Баренцева моря; НТ — Нордкапское течение; ЗШТ — Западно-Шпицбергенское течение; ОМ — остров Медвежий; ВШТ — Восточно-Шпицбергенское течение; ТМ — течение Макарова; ТП — течение Персея; АВ — Адмиралтейский вал; ЦП — Центральное плато; ЮБМП — Южно-Баренцевоморская впадина; ЦВ — Центральная возвышенность; МЖ — Медвежинский желоб; КМ — разрез «Кольский меридиан»

Fig. 1. Scheme of the Barents Sea main currents and underwater geographical objects with marked boundaries of the regions (a) and the spatial distribution of the linear SST trend in the winter season (December–April) for the periods: б) 1949–1969; в) 1970–1990; г) 1991–2023.

1 — western, 2 — northeastern, 3 — southeastern regions of the Barents Sea; НТ — North Cape Current; ЗШТ — West Spitsbergen Current; ОМ — Bear Island; ВШТ — East Spitsbergen Current; ТМ — Makarov current; ТП — Perseus Current; АВ — Admiralty Wall; ЦП — Central Plateau; ЮБМП — South Barents Sea Depression; ЦВ — Central Uplands; МЖ — Medvezhinsky Trench; КМ — “Kola Meridian” section

Первый период (1949–1969 гг.) характеризуется наличием отрицательного линейного тренда в наиболее холодные месяцы (март–апрель). Зона отрицательных трендов распространяется через Центральное плато, Южно-Баренцевоморскую впадину вплоть до Центральной возвышенности и ограничивается на западе Адмиралтейской возвышенностью (см. рис. 1б). В основном данные области относятся к южной и центральной частям западного района, а также немного затрагивают южную часть северо-восточного района. Наибольшая величина тренда составляет более $-15 \cdot 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в районе Центрального плато.

Для второго периода (1970–1990 гг.) характерно отсутствие в зимний сезон линейного тренда на всей акватории моря (рис. 1в).

Третий, «условно теплый», период 1991–2023 гг. характеризуется статистически значимым линейным трендом практически на всей акватории, с наибольшей величиной тренда более $10 \cdot 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, лишь севернее 77° с. ш. тренд не выделяется.

В «условно теплый» период увеличивается не только ТПО, но и дисперсия. За первый (1949–1969 гг.) и второй (1970–1990 гг.) периоды в западном и северо-восточном районах среднеквадратическое отклонение (СКО) значительно меньше, чем за третий (1991–2023 гг.) период. В 1949–1969 гг. максимальное СКО в северо-восточном районе наблюдается в августе — $0,69 \text{ }^{\circ}\text{C}$, за 1970–1990 гг. СКО несколько больше — $0,73 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в августе (и $0,77 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в июле), а максимальные значения отмечаются в 1991–2023 гг. и составляют $1,06 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В других районах ситуация аналогична: СКО ТПО за 1949–1969 гг. в западном и юго-восточном районах составляет соответственно $0,52 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; в 1970–1990 гг. — $0,70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $2,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$; в 1991–2023 гг. — $1,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $2,04 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Межгодовые изменения ТПО отдельных районов Баренцева моря

Межгодовая изменчивость среднегодовых значений ТПО в западном, северо-восточном и юго-восточном районах Баренцева моря приведена на рис. 2.

Визуально отмечаются периоды различной направленности изменений ТПО. Так, во всех трех районах Баренцева моря наиболее четко выделяется период повышения температуры воды с 1990–1992 до 2023 г., отмеченные красными линиями (см. рис. 2а, в).

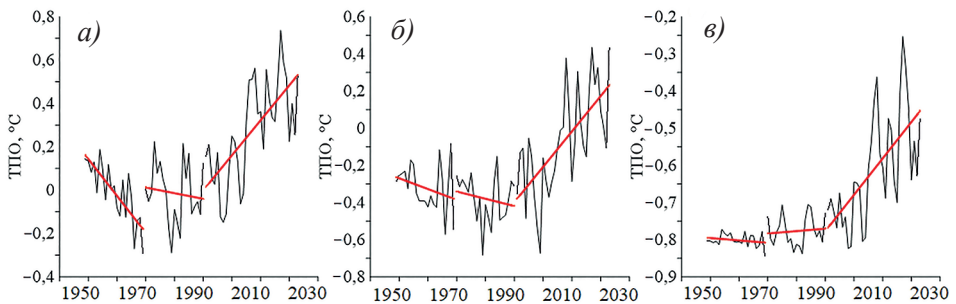


Рис. 2. Межгодовая изменчивость ТПО в отдельных районах Баренцева моря с нанесенным линейным трендом.

а) западный, б) северо-восточный, в) юго-восточный районы Баренцева моря; красными линиями обозначен линейный тренд

Fig. 2. Interannual SST variability in certain areas of the Barents Sea with a plotted linear trend.

а) western, б) northeastern, в) southeastern regions of the Barents Sea; red lines indicate a linear trend

В интервале с 1949 до 1989 г. направленность изменений ТПО более неоднородная. В северо-восточном районе (см. рис. 2б) отчетливо наблюдалось понижение температуры в период 1949–1990 гг., а в юго-восточном районе (см. рис. 2в) в этот же период температура воды вначале слабо понижалась в период 1949–1970 гг. и затем, в 1971–1991 гг., незначительно повышалась. В западном районе (см. рис. 2а) очень четко наблюдалось значительное понижение температуры в период 1949–1970 гг., сменившееся более медленным понижением температуры вод в период 1971–1991 гг. Наиболее ярко выражены периоды в западном районе, наименее — в северо-восточном, когда первые два периода не имеют значимых трендов.

За выделенные периоды было выполнено осреднение по районам и рассчитаны характеристики линейного тренда для параметров, связанных с ТПО: ПТВ, температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и ТПО отдельных районов Баренцева моря (см. таблицу).

Период 1949–1969 гг. в западном районе Баренцева моря характеризуется наличием значимого отрицательного линейного тренда ТПО (величина тренда составила $-0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$; $R^2 = 0,62$) со средним значением ТПО $-0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица

Характеристики трендов Баренцева моря и его отдельных районов
 в зимний сезон (декабрь–апрель) за период 1949–2023 гг.

Table

Trend characteristics in the Barents Sea and in its separate areas
 in the winter season (December–April) for the period 1949–2023

Показатель	Период	Среднее	Величина тренда, $^{\circ}/\text{год}$	R^2
ТПО западного района, $^{\circ}\text{C}$	1949–1969	–0,02	–0,03	0,62
	1970–1990	–0,03	–0,01	0,01
	1991–2023	0,55	0,03	0,46
ТПО северо-восточного района, $^{\circ}\text{C}$	1949–1969	–1,60	–0,001	0,05
	1970–1990	–1,55	0,001	0,01
	1991–2023	–1,22	0,02	0,40
ТПО юго-восточного района, $^{\circ}\text{C}$	1949–1969	–0,64	–0,01	0,08
	1970–1990	–0,76	–0,01	0,04
	1991–2023	–0,15	0,04	0,44
«Кольский меридиан», $^{\circ}\text{C}$	1951–1969	3,47	–0,04	0,25
	1970–1990	3,33	–0,01	0,03
	1991–2023	4,13	0,03	0,36
ПТВ, $^{\circ}\text{C}$	1949–1969	–12,67	–0,14	0,21
	1970–1990	–11,36	0,02	0,01
	1991–2023	–7,97	0,17	0,42

Примечание. «Кольский меридиан» — средняя температура воды основной ветви Мурманского течения на разрезе «Кольский меридиан» в слое 0–50 м. Полуужирным шрифтом выделены периоды при значимом линейном тренде (при уровне значимости 0,05).

Note. “Kola Meridian” — average water temperature of the main branch of the Murmansk Current on the “Kola Meridian” section in the layer 0–50 m. Periods with a significant linear trend (at a significance level of 0.05) are highlighted in bold.

Для всех рассматриваемых характеристик период 1970–1990 гг. характеризуется отсутствием значимых линейных трендов, тогда как для периода 1991–2023 гг. значимый линейный тренд выделяется во всех анализируемых временных рядах. Также стоит отметить, что увеличение ТПО в 1991–2023 гг. происходит не равномерно. Резкое увеличение ТПО происходит в 1991–2005 гг., а после 2010 г. происходит замедление увеличения. Приведенные характеристики подтверждают качество определения временных выборок для расчетов трендов.

Анализ связи изменений ТПО и смены фаз индексов атмосферной циркуляции

Несомненно, атмосферная циркуляция оказывает существенное влияние на изменения ТПО [29]. Один из важнейших показателей для климата Арктического региона — это индекс арктического колебания. Его также называют кольцевой модой. АК содействует крупномасштабной циркуляции вод и льдов СЛО. В последние десятилетия над Арктикой сложилась дипольная структура поля давления, которая стала оказывать существенное влияние на крупномасштабные погодные условия в данном регионе посредством регулирования потоков из Северной Атлантики через пролив Фрама и Баренцево море, тем самым, в зависимости от фазы, способствуя либо препятствуя процессам «атлантификации» [18]. Таким образом, АД играет важную роль в формировании изменчивости ТПО Баренцева моря.

В интерпретации физических процессов основную роль играют фазы индексов: положительная и отрицательная. В зависимости от фазы атмосферного индекса можно судить о барической обстановке в регионе и ее последствиях для рассматриваемых процессов. Положительной фазе индекса АК соответствует высокое атмосферное давление над средними широтами, что вынуждает циклоны перемещаться по более северным маршрутам, обуславливая тем самым поступление теплых вод Северной Атлантики в Баренцево море. В отрицательную фазу АК над СЛО усиливается антициклоническая деятельность, что приводит к ослаблению поступления теплых воздушных масс из Северной Атлантики и, как следствие, к уменьшению ТПО. АД в положительную фазу способствует увеличению экспорта льда через пролив Фрама [19]. В отрицательную фазу механизм обратный. Также, по последним оценкам, АД играет решающую роль в механизме переключения пути поступления тепла в Арктику, либо проходящего через пролив Фрама с Западно-Шпицбергенским течением (отрицательная фаза), либо поступающего с северной и центральной ветвями Нордкапского течения (положительная фаза) [18]. Процент случаев положительной и отрицательной фаз индексов АД и АК за выделенные периоды представлен на рис. 3.

При подсчете частоты случаев величина индекса, близкая к нулевому значению (менее 0,00), рассматривалась как нейтральная и случай не относился ни к положительной, ни к отрицательной фазе. В результате отмечается выраженная сезонность смены фаз индекса АД (см. рис. 3а, в). Начиная с февраля, когда за период 1949–2023 гг. наблюдалось в среднем 15 % случаев, происходит увеличение частоты повторяемости положительной фазы АД. В апреле в среднем за 1949–2023 г. частота случаев достигает 62 %, в мае — 79 % и доходит до максимума в июне — 82 %. Затем, к концу года, происходит уменьшение случаев положительной фазы индекса. Частота случаев отрицательной фазы АД минимальна с апреля по июнь и меняется в пределах 11–23 % соответственно за анализируемый период. Рост повторяемости

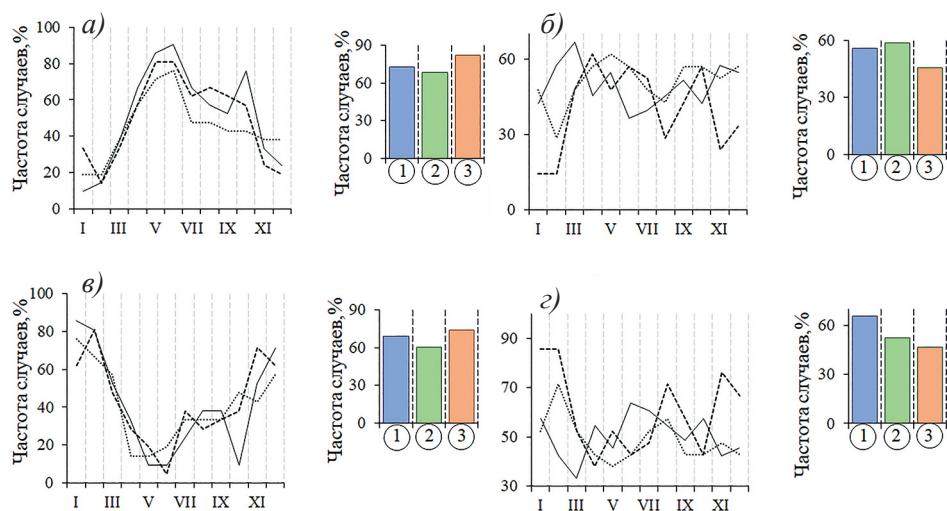


Рис. 3. Частота случаев положительной и отрицательной фазы индексов АД и АК за периоды: пунктирная линия — 1949–1969 гг.; точечная линия — 1970–1990 гг.; сплошная линия — 1991–2023 гг.

Левая часть — частота случаев положительной (а) и отрицательной (в) фаз индекса АД и гистограммы за апрель–июнь и ноябрь–февраль соответственно; правая часть — частота случаев отрицательной (б) и положительной (з) фаз индекса АК и гистограммы за апрель–июнь и ноябрь–февраль соответственно. Числами и цветом обозначены периоды: ① синие колонки — 1949–1969 гг., ② зеленые — 1970–1990 гг., ③ оранжевые — 1991–2023 гг.

Fig. 3. Positive and negative phase cases of the AD and AO indices for the periods: dotted line — 1949–1969; short dotted line — 1970–1990; solid line — 1991–2023.

The left part shows cases of events in the positive (a) and negative (в) phases of the AD index and histograms for April–June and November–February, respectively; the right side is the frequency of negative (б) and positive (з) phase cases of the AO index and histograms for April–June and November–February, respectively. The periods are indicated by numbers and color: ① blue columns are for 1949–1969, ② green are for 1970–1990, ③ orange are for 1991–2023

отмечается с ноября (34 %) до февраля (78 %). В связи с подобным сезонным распределением положительных и отрицательных фаз АД для дальнейшего анализа использованы следующие периоды осреднения индекса: положительная фаза — с апреля по июнь, отрицательная — с ноября по февраль.

Сезонный ход в частоте случаев положительной и отрицательной фаз индекса АК как таковой не выделяется, кроме наибольшей частоты проявления с января по март (см. рис. 3б, з). Однако прослеживаются изменения между выделенными периодами. В 1949–1969 гг. с ноября по февраль прослеживается преобладание частоты случаев отрицательной фазы индекса АК (66 %), при которой область высокого давления над Арктикой препятствует поступлению теплых воздушных масс из Северной Атлантики и замедляет поступление теплых вод в СЛО. В свою очередь, это способствует уменьшению температуры воды Баренцева моря. В 1991–2023 гг. частота случаев отрицательной фазы значительно сокращается — до 47 %. Такой механизм воздействия подтверждается результатами расчетов трендов как для ТПО Баренцева моря, так и для ПТВ, и температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» (см. рис. 1б, 2 и табл.). Вместе с тем в рассматриваемый

период (1949–1965 гг.) преобладали меридиональная + восточная (С + Е) формы атмосферной циркуляции по Вангенгейму–Гирсу, а после — восточная форма (Е) (1966–1989 гг.) [30, 31]. Форма С способствует нарушению зонального переноса и усилению меридионального. Во время формы Е происходит вторжение в Арктику антициклонов с востока и северо-востока, которые приносят с собой холодные воздушные массы. Таким образом, барическая обстановка над СЛО способствует уменьшению температур (см. табл.). Частота случаев положительной фазы с апреля по июнь также сокращается, но в меньшей степени: 56 % (1949–1969 гг.), 58 % (1970–1990 гг.), 46 % (1991–2023 гг.).

Анализ связи аномалий ТПО и гидрометеорологических индексов

Поскольку на формирование аномалий ТПО в СЛО оказывают влияние не только атмосферные процессы, но и водообмен с соседними океанами, при исследовании изменчивости ТПО Баренцева моря нами был использован также индекс АМО, косвенно связанный с поступлением тепла в СЛО из Северной Атлантики [20].

Чтобы оценить изменения индексов за рассматриваемые периоды, были построены гистограммы аномалий относительно среднего значения, нормированные по стандартному отклонению (рис. 4). В колебаниях АД, АК и АМО выделяются

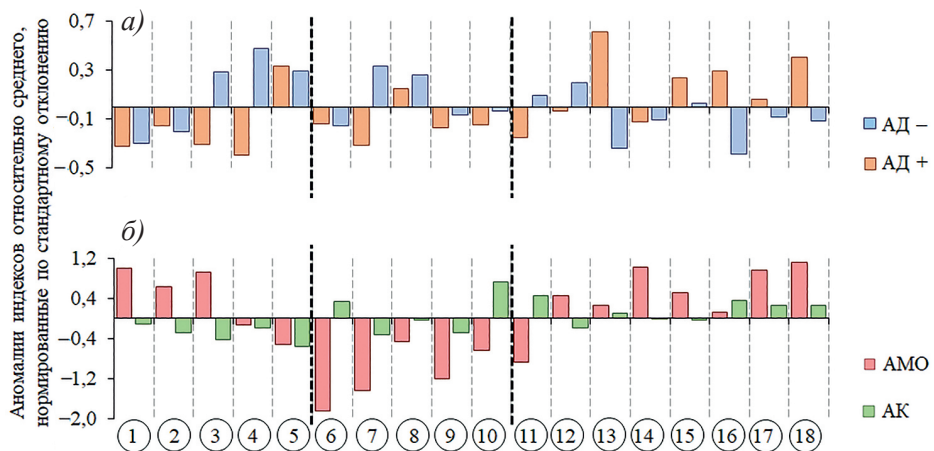


Рис. 4. Аномалии индексов относительно среднего, нормированные по стандартному отклонению, осредненные за 4 года: а) АД+ за апрель–июнь, АД– за ноябрь–февраль; б) АК и АМО за декабрь–апрель.

Полужирными пунктирными линиями обозначены границы периодов: I — 1952–1970 гг., II — 1972–1991 гг., III — 1992–2023 гг. Числами обозначены периоды лет: 1 — 1952–1955, 2 — 1956–1959, 3 — 1960–1963, 4 — 1964–1967, 5 — 1968–1971, 6 — 1972–1975, 7 — 1976–1979, 8 — 1980–1983, 9 — 1984–1987, 10 — 1988–1991, 11 — 1992–1995, 12 — 1996–1999, 13 — 2000–2003, 14 — 2004–2007, 15 — 2008–2011, 16 — 2012–2015, 17 — 2016–2019, 18 — 2020–2023

Fig. 4. Anomalies of indices relative to the average, normalized by standard deviation, averaged over 4 years: а) AD+ for April–June, AD– for November–February; б) AO and AMO for December–April.

Bold dotted lines indicate the boundaries of the periods: I — 1952–1970, II — 1972–1991, III — 1992–2023. The numbers indicate periods of years: 1 — 1952–1955, 2 — 1956–1959, 3 — 1960–1963, 4 — 1964–1967, 5 — 1968–1971, 6 — 1972–1975, 7 — 1976–1979, 8 — 1980–1983, 9 — 1984–1987, 10 — 1988–1991, 11 — 1992–1995, 12 — 1996–1999, 13 — 2000–2003, 14 — 2004–2007, 15 — 2008–2011, 16 — 2012–2015, 17 — 2016–2019, 18 — 2020–2023

четырёх- и восьмилетние циклы [32, 33], в связи с чем аномалии индексов были осреднены за 4-летние периоды.

В межгодовых изменениях аномалий АД за выделенные периоды прослеживаются некоторые особенности (см. рис. 4а). В 1949–1969 гг., когда тренд ТПО был отрицательный, частота случаев положительной фазы за апрель–июнь составляла 73 %, а отрицательной фазы за ноябрь–февраль — 69 % (см. рис. 3а, б). При этом величины индекса в положительной фазе были ниже, чем в остальные периоды, и наблюдались отрицательные аномалии АД (до $-0,35$) за апрель–июнь (см. рис. 4а).

В 1969–1970 гг. происходило уменьшение частоты повторяемости как положительной (до 68 % за апрель–июнь), так и отрицательной (до 61 % за ноябрь–февраль) фаз. При этом для величин индекса АМО наблюдались четко выраженные отрицательные аномалии (см. рис. 4б). В этот период линейный тренд ТПО, ПТВ и температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» был незначим (см. табл.).

Начиная с 1990-х гг. в арктической дипольной аномалии все чаще проявляется положительная фаза (за апрель–июнь до 82 %) и происходит смена знака аномалий АМО с отрицательного на положительный (см. рис. 4б). В этот же период выделяется положительный тренд ТПО, ПТВ Баренцева моря и на разрезе «Кольский меридиан» (см. табл.). Частота случаев отрицательной фазы АД за ноябрь–февраль также увеличивается — до 74 %. Но при этом величины значений индекса во время положительной фазы увеличиваются, тогда как в отрицательную фазу — уменьшаются (см. рис. 3 и 4). Таким образом, над Арктикой в «условно теплый» период с апреля по июнь преобладает положительная фаза, а с ноября по февраль отрицательная фаза АД. В положительную фазу (с наибольшей частотой повторяемости с апреля по июнь) давление над круговоротом Бофорта и Канадским архипелагом усиливается, а над Карским морем ослабевает, усиливается меридиональный перенос из-за возникающей дипольной структуры, располагающейся поперек полюса. Это приводит к усилению антициклонического круговорота Бофорта и трансполярного дрейфа, с одной стороны, и к усилению адвекции тепла из Северной Атлантики в Арктику — с другой, в свою очередь, способствуя повышению приповерхностной температуры воздуха и, соответственно, увеличению ТПО. При этом основное тепло поступает в СЛО с северной и центральной ветвями Нордкапского течения. В отрицательную фазу АД (с наибольшей частотой повторяемости с ноября по февраль) дрейф льда в Гренландское море через пролив Фрама сокращается. Поступление тепла с Западно-Шпицбергенским течением (ЗШТ) увеличивается, а через Баренцево-морское направление поступление атлантических вод сокращается. Таким образом, образовавшаяся дипольная структура в поле атмосферного давления на уровне моря способствует увеличению температуры воды Баренцева моря как в весенне-летние, так и в осенне-зимние месяцы, но с различными механизмами.

Наряду с доминирующим влиянием АД, «условно теплый» период характеризуется преобладанием западной формы циркуляции [34], которая дублирует усиление поступления тепла из Северной Атлантики, и положительной фазой АК (см. рис. 3б). В положительную фазу АК область высокого давления над Арктическим бассейном уменьшается и более не препятствует поступлению тепла из средних широт. Таким образом, в 1991–2023 гг. механизмы, способствующие интенсификации поступления тепла из Северной Атлантики, накладываются друг на друга, что проявляется положительными трендами температуры воды (см. табл.).

Оценка тесноты связи гидрометеорологических индексов с ТПО методом вейвлет-когерентности

С целью анализа сопряженности временных рядов для определения степени пространственно-временной синхронизации и оценки статистической взаимосвязи между температурой отдельных районов Баренцева моря и на разрезе «Кольский меридиан» был произведен анализ вейвлет-когерентности (когерентность). Когерентность является показателем тесноты связи между гармоническими составляющими на различных частотах в рассматриваемые периоды времени [23]. Коэффициенты когерентности интерпретируются как квадраты коэффициентов корреляции в области времени и частоты, и их значения варьируются в диапазоне 0–1, для минимальной и максимальной тесноты связи соответственно. Результаты представлены на рис. 5.

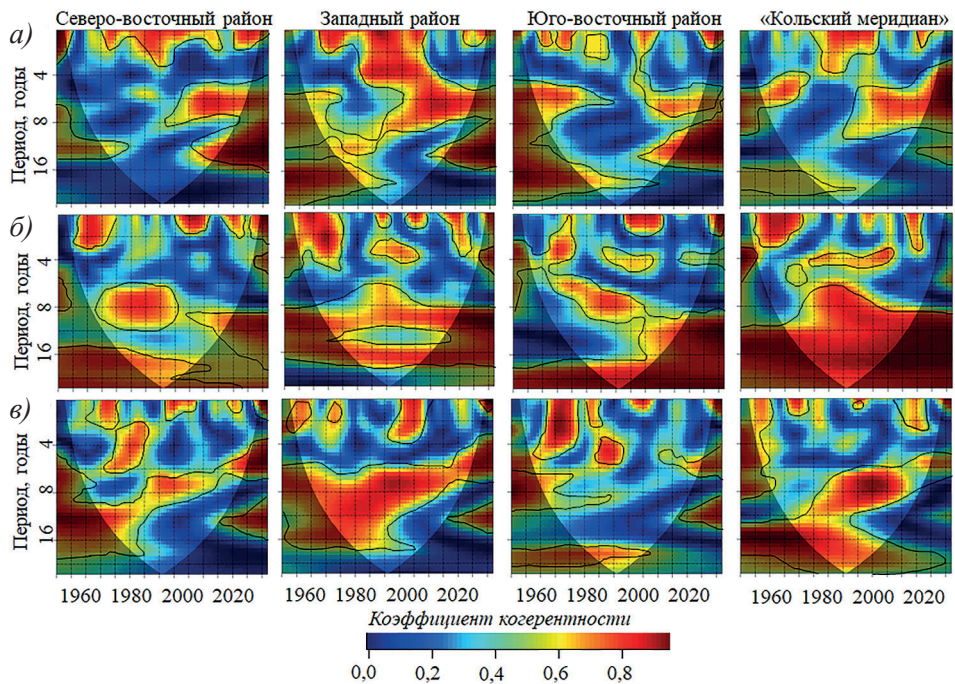


Рис. 5. Вейвлет-когерентность между ТПО северо-восточного, западного и юго-восточного районов Баренцева моря и температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» за период 1950–2023 гг. за декабрь–январь с индексами: а) арктического диполя, АД; б) арктического колебания, АК; в) атлантической мультideкадной осцилляции, АМО.

Жирной линией обозначены области значимости вейвлет-когерентности на уровне $p = 95\%$; стрелками — разница фаз (→/← — временные ряды находятся в фазе/противофазе или имеют положительную/отрицательную связь, ↑/↓ — температура опережает/запаздывает относительно гидрометеорологических индексов); затемненные края — конус влияния, за пределами которого результаты могут быть искажены

Fig. 5. Wavelet coherence between the SST of the northeastern, western and southeastern regions of the Barents Sea and water temperature on the Kola Meridian section for the period 1950–2023 for December–January with indices: а) Arctic dipole, AD; б) Arctic Oscillation, AO; в) Atlantic multidecadal oscillation, AMO.

The thick line indicates areas of wavelet coherence significance at the $p = 95\%$ level; the arrows show difference between phases (→/← — time series are in phase/antiphase or have a positive/negative relationship, ↑/↓ — temperature leads/lags relative to hydrometeorological indices); the blurred edges are the cone of influence, beyond which the results may be distorted

Наиболее тесная согласованность температуры воды с АД в зимний сезон прослеживается в западном районе Баренцева моря (см. рис. 5а). Максимальная согласованность наблюдается в диапазонах 1–4 года (период 1975–1995 гг.) и 5–7 лет (период 1995–2023 гг.). Максимум когерентности в диапазоне 1–4 года сдвигается в периоде 1990–1995 гг. к диапазону 5–7 лет, а в период 1995–2000 гг. — к диапазону 6–7 лет. Стрелки, указывающие вверх и влево, говорят о том, что изменения в ТПО следуют с запаздыванием относительно АД, а сами ряды находятся в противофазе. При усугублении отрицательной фазы АД дрейф льда через пролив Фрама из Арктического бассейна сокращается, а поступление тепла в СЛО с ЗШТ — увеличивается. Это способствует увеличению ТПО в северной части западного района Баренцева моря.

В период 2000–2023 гг. (период максимальной согласованности между АД и ТПО западного района) согласованность между АД в зимний сезон, когда преобладает отрицательная фаза индекса, и температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» несколько ниже, что согласуется с влиянием смены фаз АД через адвекцию атлантических вод. Наибольшая согласованность отмечается в диапазоне 6–7 лет за период 2000–2023 гг. В диапазоне 6–8 лет высокая согласованность в 1950–1970 гг. имеет сдвиг около 1960 г. к диапазону 4–6 лет, с 1975 по 1985 г. — сдвиг диапазона до 2–4 лет, далее до 1995 г. — до диапазона 1–2 лет, и коэффициенты когерентности значительно увеличиваются. Стоит отметить, что в указанные годы наибольшей согласованности между температурой воды и АД выделяется значимый линейный тренд в западном районе Баренцева моря (для ТПО и ПТВ) и на разрезе «Кольский меридиан» (см. табл.).

В северо-восточном районе ТПО и АД демонстрируют значительную согласованность в диапазоне 1–2 года по всей длине выборки, кроме периода 1955–1960 гг. Максимальная согласованность наблюдается в диапазонах 5–7 и 10–12 лет в период 2000–2023 гг. В диапазоне 3–6 лет в 1949–1970 гг. и в диапазоне 6–8 лет в 1965–1990 гг. корреляция очень низкая. Периоду 1949–1970 гг. соответствует «условно холодный» период, и выделяются значимые тренды (по ТПО и ПТВ) в северо-восточном районе Баренцева моря, когда происходит уменьшение ТПО и ПТВ. Стоит отметить, что распределение коэффициентов корреляции для северо-восточного и юго-восточного районов очень схоже. В обоих районах максимальная согласованность отмечается в диапазонах 5–7 лет и 10–12 лет в период 2000–2023 гг. Наименьшая согласованность наблюдается в период 1970–1990 гг. в диапазоне 4–16 лет.

В диапазоне 2 года распределения коэффициентов между изображениями когерентности северо-восточного, юго-восточного и западного районов схожи: высокая согласованность в периоде до 2 лет с периодическим ослаблением в течение не более 5 лет. Во всех районах самая высокая согласованность наблюдается в период 1990–2023 гг. в диапазоне 5–6 лет. Этому периоду соответствует значимый положительный линейный тренд ПТВ, ТПО во всех районах Баренцева моря и на разрезе «Кольский меридиан» (см. табл.).

Стоит отметить наличие согласованности в диапазоне 12–15 лет в 2000–2023 гг. Но после 2005 г. результат вейвлет-когерентности выходит за границы конуса влияния, поэтому относиться к высокой корреляции в указанные диапазон и период надо с осторожностью. Однако высокая согласованность проявляется на достаточно широком диапазоне, и весьма маловероятно, что это просто случайность. В колебаниях АД в работах [7, 18] выделяют 14–15-летние циклы, которые и проявляются в анализе вейвлет-когерентности.

Максимальная согласованность между температурой воды и индексами АК и АМО наблюдается в западном районе и на разрезе «Кольский меридиан» в диапазонах 2 года и 12–16 лет на всем рассматриваемом временном интервале (см. рис. 5б, в). Также отмечается высокая согласованность в диапазоне 0–4 года в 1950–1970 гг. как с АК (см. рис. 5б), так и с индексом АМО (см. рис. 5в). В 1975–1990 гг. отмечается сдвиг с диапазона 6–9 лет до 8–12 лет в 1990–2023 гг. в согласованности между ТПО западного района и температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» с индексом АК (см. рис. 5б). Интересно, что в этот же период происходит значительное увеличение ТПО и ПТВ в Баренцевом море. В северо-восточном и юго-восточном районах согласованность с АК значительно ниже. Высокая когерентность в диапазоне 6–10 лет отмечается в обоих районах: в период 1965–1990 гг. для северо-восточного района и в 1970–1995 гг. для юго-восточного. Стрелки вправо говорят о том, что процессы находятся в одной фазе. Между температурой воды и индексом АМО в западном районе и на разрезе «Кольский меридиан» отмечается высокая согласованность в диапазоне 6–16 лет со значительным сдвигом (см. рис. 5в). Если диапазон высокой когерентности в 1950–1985 гг. приходится на 8–16 лет, то к 2000 г. он сдвигается до 6–8 лет, а к 2010 г. — в район 5–6 лет, приближаясь в 2015 г. к диапазону в 4 года. Стрелки вниз и влево говорят о том, что изменчивость АМО предшествует изменениям температуры в Баренцевом море, а процессы являются симфазными, т. е. при увеличении температуры поверхности воды в Северной Атлантике происходит увеличение ТПО в Баренцевом море.

Заключение

ТПО во всех районах Баренцева моря претерпела значительные изменения в рассматриваемый период. Наблюдаемые изменения не равномерны как во времени, так и в пространстве. Значимый отрицательный линейный тренд ТПО наблюдался в 1949–1969 гг. только в западном районе (величина тренда $-0,03$ °C/год, коэффициент детерминации 0,62), но не на всей его площади. Область с отрицательными трендами в основном занимала южную и центральную части района: Центральное плато и Южно-Баренцевоморскую впадину, вплоть до Центральной возвышенности. Наибольшая величина тренда наблюдалась в районе Центрального плато и составляла более $-15 \cdot 10^{-2}$ °C/год. Отрицательный тренд также выделялся на разрезе «Кольский меридиан». С ноября по март 1949–1969 гг. преобладала отрицательная фаза и отрицательные аномалии индекса АК (частота случаев 72 %) в совокупности с С + Е формой циркуляции по Вангенгейму–Гирсу. При этом отмечающиеся положительные аномалии АМО к середине 1960-х гг. поменяли знак на отрицательный. Сложившаяся барическая обстановка способствовала усилению меридионального переноса, интенсификации поступления антициклонов с востока и севера-востока, с ослаблением зонального переноса теплых воздушных масс из Северной Атлантики в Баренцево море. В свою очередь, это привело к снижению температур (ТПО, ПТВ и на разрезе «Кольский меридиан»), что хорошо видно на графиках вейвлет-когерентности, где высокая согласованность спектров ТПО с АК и АМО отмечается в диапазонах 2–4 года и 12–16 лет в западном районе и на разрезе «Кольский меридиан».

Период 1970–1991 гг. характеризовался отсутствием значимого линейного тренда для всех рассматриваемых характеристик во всех районах моря. Преобладание отрицательных аномалий индекса АМО, наряду с равнозначным распределением положительных и отрицательных аномалий АК и АД, способствовало стабилизации ТПО в Баренцевом море.

Наибольшие изменения отмечались в «условно теплый» период 1991–2023 гг., когда ТПО увеличивалась во всех районах моря. Максимальное увеличение ТПО, происходившее со скоростью до $10 \cdot 10^{-2}$ °C/год, наблюдалось в областях залива теплых вод атлантического происхождения. Наиболее высокий вклад в изменчивость ТПО вносит тренд в западном районе — 46 %, чуть меньший вклад 44 % — в юго-восточном и 40 % — в северо-восточном районе. Распределение вкладов трендовых составляющих прежде всего связано с влиянием поступления теплых воздушных масс и вод из Северной Атлантики, при этом из-за круглогодичного наличия ледяного покрова севернее 77° с. ш. тренд не выделяется. В 1991–2023 гг. наблюдается увеличение частоты случаев положительной фазы индекса АД с апреля по июнь до 82 %. Также в периоды после 1980 г. в западном районе и на разрезе «Кольский меридиан», после 1995 г. в северо-восточном районе и после 2010 г. — в юго-восточном районе произошло смещение периодов наиболее высокой когерентности ТПО с АД в диапазоне 5–7 лет. Хорошо прослеживается постепенное распространение влияния АД по районам: от наиболее подверженного воздействию североатлантических вод западного района к северо-восточному и наиболее удаленному юго-восточному районам. В то же время, несмотря на увеличение частоты случаев положительной фазы, влияние АК, вероятно, ослабевает, аномалии индекса в период 2000–2011 гг. близки к нулю и переходят в слабopоложительные после 2012 г., когда скорость увеличения ТПО замедлилась. Максимальная согласованность ТПО с АМО наблюдается в западном районе и на разрезе «Кольский меридиан» в диапазоне 7–9 лет в 1991–2005 гг., когда наблюдается наиболее интенсивное увеличение ТПО при положительных аномалиях АМО.

Обращает на себя внимание сдвиг диапазонов высокой согласованности между ТПО западного района и на разрезе «Кольский меридиан» с индексом АМО по всему временному ряду с постепенным сужением диапазона высокой когерентности в сторону более высокочастотных колебаний: 1950–1985 гг. — 8–16 лет, 1986–2000 гг. — 6–8 лет, 2001–2010 гг. — 5–6 лет. Высокая согласованность с АК характерна для западного района и на разрезе «Кольский меридиан». Как и в ситуации с АМО, наблюдается сдвиг высокой когерентности, но в сторону более низкочастотных колебаний: 1950–1970 гг. — 0–4 года, 1975–1990 гг. — 6–9 лет, 1990–2023 гг. — 8–12 лет. Сдвиг высокой когерентности наблюдается и в согласованности ТПО с АД во всех районах, но наиболее выражен в западном и северо-восточном: 1975–2000 гг. — 0–3 года, 2000–2023 гг. — 5–7 лет. Выявление причин сдвигов представляет отдельный интерес для последующего исследования в данном направлении.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00221, <https://rscf.ru/project/24-27-00221/>.

Competing interests. No conflict of interests.

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-27-00221, <https://rscf.ru/project/24-27-00221/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *WMO Provisional State of the Global Climate 2022. Geneva, WMO. 2022.* URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/56335> (accessed 22.04.2023).
2. Pörtner H.O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V., Zhai P., Tignor M., Poloczanska E., Weyer N.M., editors. *The ocean and cryosphere in a changing climate.* IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate; 2019. 765 p.

3. Stroeve J., Notz D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons. *Environmental Research Letters*. 2018;13(10):103001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
4. Латонин М.М., Башмачников И.Л., Бобылёв Л.П. Явление арктического усиления и его движущие механизмы. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021;13(3):3–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P. The phenomenon of Arctic amplification and its driving mechanisms. *Fundamental and applied hydrophysics*. 2021;13(3):3–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
5. Gordó-Vilaseca C., Stephenson F., Coll M., Lavin C., Costello M.J. Three decades of increasing fish biodiversity across the northeast Atlantic and the Arctic Ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2023;120(4):e2120869120. <https://doi.org/10.1073/pnas.212086912>
6. Лис Н.А., Егорова Е.С. Климатическая изменчивость ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022;68(3):234–247. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247>
Lis N.A., Egorova E.S. Climatic variability of the ice extent of the Barents Sea and its individual areas. *Arctic and Antarctic Research*. 2022;68(3):234–247. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247>
7. Лис Н.А., Чернявская Е.А., Миронов Е.У., Тимохов Л.А., Егорова Е.С. Информативность факторов, формирующих долгопериодные колебания ледовитости отдельных районов Баренцева моря. *Российская Арктика*. 2023;5(2):17–32. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-2-17-32>
Lis N.A., Cherniavskaia E.A., Mironov E.U., Timokhov L.A., Egorova E.S. Informativeness (information-bearing) of factors forming interannual variability of the ice cover in the Barents Sea and its separate regions. *Russian Arctic*. 2023;5(2):17–32. (In Russ.). doi:10.24412/2658-4255-2023-2-17-32.
8. Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature climate change*. 2018;8(7):634–639. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0205-y>
9. Schlichtholz P. Subsurface ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming. *Scientific reports*. 2019;9(1):13692. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49965-6>
10. Mohamed B., Nilsen F., Skogseth R. Interannual and decadal variability of sea surface temperature and sea ice concentration in the Barents Sea. *Remote Sensing*. 2022;14(17):4413. <https://doi.org/10.3390/rs14174413>
11. Миронов Е.У. *Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз*. СПб.: ААНИИ; 2004. 320 с.
12. ERA5 monthly mean data on single (SST) and pressure (SLP) levels from 1940 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/> (accessed 15.03. 2024).
13. Карсаков А.Л., Трофимов А.Г., Ившин В.А., Анциферов М.Ю., Густоев Д.В., Аверкиев А.С. Восстановление данных по температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» в 2016–2017 гг. *Труды ВНИРО*. 2018;173:193–206. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2018-173-193-206>
Karsakov A., Trofimov A., Ivshin V., Antsiferov M., Gustoev D., Averkiev A. Restoration of data on water temperature in the Kola Section for 2016–2017. *Trudy VNIRO*. 2018;173:193–206. (In Russ.). <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2018-173-193-206>
14. Карсаков А.Л., Трофимов А.Г., Анциферов М.Ю., Ившин В.А., Губанищев М.А. *120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан»*. Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича; 2022. 146 с.

15. Thompson D.W.J., Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical research letters*. 1998;25(9):1297–1300. <https://doi.org/10.1029/98GL00950>
16. *AO index, obtained by projecting the AO loading pattern to the daily anomaly 1000 millibar height field over 20° N–90° N latitude*. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/ao/> (accessed 02.05.2024).
17. Watanabe E., Wang J., Sumi A., Hasumi H. Arctic dipole anomaly and its contribution to sea ice export from the Arctic Ocean in the 20th century. *Geophysical research letters*. 2006;33(23):L23703. <https://doi.org/10.1029/2006GL028112>
18. Polyakov I.V., Ingvaldsen R.B., Pnyushkov A.V., Bhatt U.S., Francis J.A., Janout M., Kwok R., Skagseth Ø. Fluctuating Atlantic inflows modulate Arctic atlantification. *Science*. 2023;381(6661):972–979. <https://doi.org/10.1126/science.adh5158>
19. Wang S., Su J. Numerical simulation of the effects of arctic dipole atmospheric circulation on arctic sea ice. *Clim. Change Res. Lett.* 2019;8:503–515. <https://doi.org/10.12677/crcl.2019.84055>
20. Schlesinger M.E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*. 1994;367(6465):723–726. <https://doi.org/10.1038/367723a0>
21. *AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index. Climate Timeseries starting at 1948 to Jan 2023*. URL: www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/ (accessed 02.05.2024).
22. Гордеева С.М. *Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации»*. СПб.: РГГМУ; 2010. 74 с.
23. Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear processes in geophysics*. 2004;11(5/6):561–566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
24. *R packages on CRAN and Bioconductor*. URL: www.rdocumentation.org/ (accessed 10.06.2024).
25. Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Ившин В.А. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека. *Труды ВНИРО*. 2018;173:79–91.
Trofimov A.G., Karsakov A.L., Ivshin V.A. Climate changes in the Barents Sea over the last half century. *Trudy VNIRO*. 2018; 173: 79–91. (In Russ.)
26. Иванов В.В., Алексеенков Г.А. Атмосферная циркуляция и развитие атмосферных процессов в морской Арктике. В: И.М. Ашик (ред.). *Моря российской Арктики в современных климатических условиях*. СПб.: ААНИИ; 2021. С. 20–35.
27. Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content. *Pure and Applied Geophysics*. 2017;174:2863–2878. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1557-3>
28. Lee H., Romero J., editors. *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC; 2023. 34 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
29. Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О. *Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана*. Л.: Гидрометеиздат; 1980. 269 с.
30. Гирс А.А., Кондратович К.В. *Методы долгосрочных прогнозов погоды: Учебное пособие*. Л.: Гидрометеиздат; 1978. 344 с.
31. Савичев А.И., Мироничева Н.П., Цепелев В.Ю. Особенности колебаний атмосферной циркуляции в Атлантико-Евразийском секторе полушария за последние десятилетия. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2015;39:120–131.
Savichev A.I., Mironicheva N.P., Tsepelev V.Yu. Features of atmospheric circulation fluctuations in the Atlantic-Eurasian sector of the hemisphere over the past decades. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2015;39:120–131. (In Russ.)

32. Rossi A., Massei N., Laignel B. A synthesis of the time-scale variability of commonly used climate indices using continuous wavelet transform. *Global and Planetary Change*. 2011;78(1–2):1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.04.008>
33. Васильев Д.Ю., Бабков О.К., Кочеткова Е.С., Семенов В.А. Вейвлет и кросс-вейвлет анализ сумм атмосферных осадков и приповерхностной температуры на Европейской территории России. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2017;6:63–77. <https://doi.org/10.7868/S0373244417060068>
- Vasilyev D.Yu., Babkov O.K., Kochetkova E.S., Semenov V.A. Wavelet and cross-wavelet analysis of precipitation and surface temperature in the European territory of Russia. *News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*. 2017;6:63–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0373244417060068>
34. Демин В.И., Священников П.Н., Иванов Б.В. Изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы и современное потепление климата на Кольском полуострове. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2014;2(17):101–105.
- Demin V.I., Priestnikov P.N., Ivanov B.V. Changes in large-scale atmospheric circulation and modern climate warming on the Kola Peninsula. *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;2(17):101–105. (In Russ.)
35. Wu B., Wang J., Walsh J.E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion. *Journal of Climate*. 2006;19(2):210–225. <https://doi.org/10.1175/JCLI3619.1>

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пространственное распределение индекса АД представлено на рис. 6а.

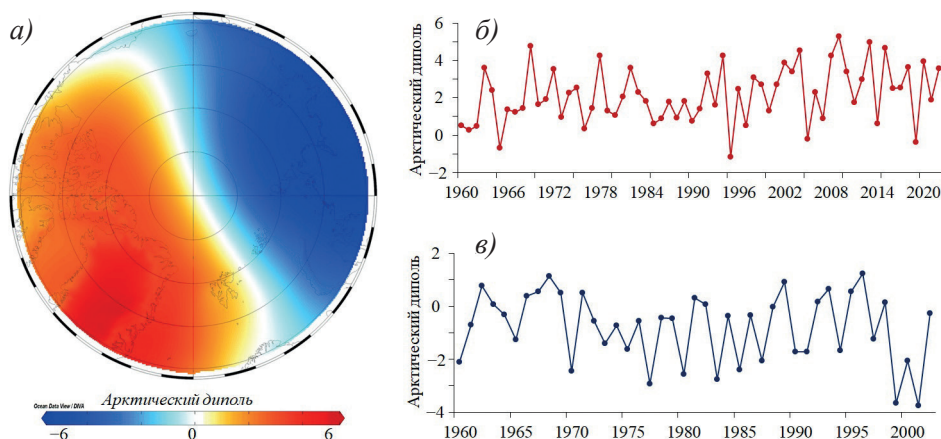


Рис. 6. Индекс арктического диполя: а) распределение в пространстве; межгодовые изменения б) за апрель–июнь в период 1960–2022 гг.; в) за октябрь–март в период 1960–2000 гг.

Fig. 6. Arctic dipole index: а) space distribution; interannual variability б) for April–June of 1960–2022; в) for October–March in the period of 1960–2000

Область отрицательных значений АД располагается над морями Российского шельфа, область положительных значений — над Гренландией и Арктическим Канадским архипелагом. Данное распределение соответствует результатам, опубликованным в работе [18]. Для сравнения полученных значений индекса со значениями,

приведенными в других публикациях, на рис. 6 представлены межгодовые изменения АД за апрель–июнь в период 1960–2022 гг. и за октябрь–март в период 1960–2000 гг.

В работе [18] разложение по естественным ортогональным функциям выполнялось от 60° с. ш. за период 1979–2021 гг. с апреля по июль, что может являться причиной некоторых отклонений в результатах. В 1965, 1990–1993, 1998, 2000, 2014, 2016, 2021 гг. отмечается незначительное занижение, а в 1968, 1985–1986, 1989, 2006, 2008, 2011 гг. — завышение результатов относительно приведенных в [18]. В работе [35] разложение по естественным ортогональным функциям выполнялось от 70° с. ш. за период 1960–2002 гг. с октября по март. В 1962, 1999 гг. отмечается незначительное занижение, а в 1977–1978, 1985, 1997 гг. — завышение результатов относительно работы [35].

В целом межгодовые изменения АД, полученные в результате наших расчетов, очень близки к результатам, представленным в работах других авторов.