

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-33-45>

УДК 551.467+551.583



Мониторинг изменений климата в морской Арктике

Г.В. Алексеев✉, Н.Е. Харланенкова, Н.Е. Иванов, Н.И. Глок

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

✉alexgv@aari.ru

GVA, 0000-0001-5630-647X; NEK, 0009-0001-8770-2894; NIG, 0000-0002-9566-4402

Аннотация. Получены репрезентативные показатели климатических изменений температурного и ледового режима морской Арктики и влияющих на них факторов в современный период. Использована среднемесячная приповерхностная температура воздуха на гидрометеорологических станциях в этой области, а также данные реанализов. Для характеристики предыстории температурного режима использованы ряды наблюдений с 1901 г. Изменения ледового режима оцениваются по значениям ледовитости на сайте ААНИИ, а влияние температуры океана — по среднемесячным значениями температуры поверхности океана из реанализа HadISST и температуры воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану. Связь параметров температурного режима и влияющих факторов характеризуется коэффициентами корреляции и корреляционными графами. Показана определяющая роль в развитии потепления в Арктике тепла и влаги с атмосферными и океанскими переносами из прилегающих и низких широт и возможность перспективной оценки климатических изменений.

Ключевые слова: индикаторы, климат, мониторинг, морская Арктика, морской лед, температура воздуха

Для цитирования: Алексеев Г.В., Харланенкова Н.Е., Иванов Н.Е., Глок Н.И. Мониторинг изменений климата в морской Арктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):33–45. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-33-45>

Поступила 23.11.2023

После переработки 27.02.2024

Принята 04.03.2024

Monitoring climate change in the marine Arctic

Geinrich V. Alekseev✉, Natalia E. Kharlanenkova, Nikolai E. Ivanov,
Natalia I. Glok

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

✉alexgv@aari.ru

GVA, 0000-0001-5630-647X; NEK, 0009-0001-8770-2894; NIG, 0000-0002-9566-4402

Abstract. Changes in the temperature regime of the marine Arctic and the influencing factors are considered based on the current knowledge of the causes of climate change and the use of new data sources. In the Arctic, the warming is developing due to such factors as the increase in the transfer of heat and moisture from the low latitudes. This, in turn, drives the feedbacks in the Arctic climate system, increasing the flow of long-wave radiation to the surface due to rising atmospheric water vapor concentrations and slowing down the growth of the sea ice thickness in winter. The increase in the atmospheric heat transfer to the Arctic is associated with changes in atmospheric circulation, in particular, under the influence of ocean surface temperature anomalies, especially in the low latitudes since the bulk of the heat influx from the from solar radiation and anthropogenic forcing is accumulated here. Analyzing the causes of warming in the Arctic in the 1930s and 40s led researchers to the conclusion that the water influx from the North Atlantic is a factor to consider. Therefore, the influx of warm and salty water is also an important influence on the formation of the climate of the marine Arctic today, which should be taken into account when monitoring the temperature and ice regime of this area. Based on the analysis of the characteristics of climate variability in the marine Arctic and its causes, the article examines representative indicators of climate change in the temperature and ice regime of the marine Arctic and the factors influencing them in the present period.

Keywords: marine Arctic, climate, monitoring, air temperature, sea ice, indicators

For citation: Alekseev G.V., Kharlanenkova N.E., Ivanov N.E., Glok N.I. Monitoring climate change in the marine Arctic. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):33–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-33-45>

Received 23.11.2023

Revised 27.02.2024

Accepted 04.03.2024

Введение

Мониторинг температурного режима как часть мониторинга климата Арктики основан на использовании данных наблюдений на метеорологических станциях, расположенных к северу от 60° с. ш. (*Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год*. М.: Росгидромет, 2023. 104 с. <https://meteoinfo.ru/images/media/climate/rus-clim-annual-report.pdf> (дата обращения: 04.11.2023)), и данных реанализов (Druckenmiller M.L., Thoman R.L., Moon T.A. (Eds.) *Arctic Report Card 2022*; 2022. <https://doi.org/10.25923/ujx6-r184> (дата обращения: 04.11.2023)), т. е., в значительной части, вне Арктики. При этом отсутствуют обоснование такого выбора и общепринятая технология оценивания параметров температурного режима. Это приводит к различающимся оценкам, в частности, так называемого «арктического усиления» современного потепления климата. Репрезентативные индикаторы изменений температурного режима Арктики и влияющих факторов могут быть предложены, исходя из современных знаний о причинах изменений климата Арктики и широкого использования новых источников данных.

Основной причиной глобального потепления считается рост концентрации парниковых газов в атмосфере в результате деятельности человека [1]. В Арктике глобальное потепление развивается с участием роста переноса тепла и влаги из низких широт [2], которое, в свою очередь, приводит в действие обратные связи в арктической климатической системе [3–5] и увеличение притока длинноволновой радиации к поверхности вследствие роста концентрации водяного пара в атмосфере, вызывающего замедление роста толщины морского льда [6].

Рост меридиональных атмосферных переносов тепла в Арктику связан с изменениями циркуляции атмосферы, в частности, в результате внешних воздействий на пространственно-временное распределение и интенсивность атмосферных циркуляционных структур. Значительное влияние на атмосферную циркуляцию и, следовательно, на атмосферный перенос тепла оказывают аномалии температуры поверх-

ности океана (ТПО) [7–9]. Особенно велика роль аномалий температуры поверхности океана в низких широтах, поскольку здесь запасается основная часть притока тепла сверху от солнечной радиации и антропогенного форсинга [10–12].

Анализ причин потепления в Арктике в 1930–1940-е гг. привел исследователей к выводу о влиянии притока воды из Северной Атлантики [13–15].

Поступление теплой и соленой воды является важным процессом и для формирования современного климата морской Арктики, который также следует учитывать при мониторинге температурного и ледового режима этой арктической области.

Цель статьи — представить на основе анализа особенностей изменчивости климата в морской Арктике, ее причин, использования обширных и новых данных репрезентативные показатели климатических изменений температурного и ледового режима морской Арктики и влияющих на них факторов в современный период.

Материалы и методы

Для оценки изменений температурного режима с 1951 г. использована среднемесячная приповерхностная температура воздуха (ПТВ) на 41 гидрометеорологической станции в области морской Арктики, собираемая на сайтах gp5.ru и pogodaiklimat.ru.

Показателями служат средние значения ПТВ на 41 станции за каждый месяц, сезон и год. Также рассчитываются средние ПТВ на 24 станциях, расположенных на островах и побережье четырех морей Северного морского пути (СМП), и средние ПТВ для отдельных морей. Для характеристики предыстории изменений температурного режима использованы наиболее продолжительные ряды наблюдений (с 1901 г.) на 7 арктических гидрометеорологических станциях.

Среднемесячная ПТВ в узлах регулярной сетки из реанализов NCEP (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>) и ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) применялась для сравнения средней температуры, рассчитанной по станциям и по значениям в узлах сетки, а также для расчета показателей влияющих факторов. Среднемесячные значения площади, покрытой морским льдом (ледовитость в км²) в Северном Ледовитом океане (СЛО), в морях СМП взяты с сайта ААНИИ (<http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/>). Для расчета показателей влияющих факторов использовались среднемесячные значения температуры поверхности океана, представленные в реанализе HadISST (<http://hadobs.metoffice.com/hadsst/>), среднемесячные значения средней температуры воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану, представленные на сайте ПИНРО (<http://www.pinro.vniro.ru/ru/razrez-kolskij-meridian/ryady-nablyudenij/>).

Оценки параметров температурного режима и показателей влияющих факторов получены путем осреднения наблюдений на арктических гидрометеорологических станциях и пространственного осреднения данных реанализов. Связь между ними характеризуется коэффициентами корреляции, а обобщение связей осуществляется с использованием корреляционных графов.

Результаты

Температура воздуха

Оценки изменений приповерхностной температуры воздуха в области морской Арктики по данным 41 станции на островах и побережье Северного Ледовитого океана зимой и летом с 1951 по 2023 г. показаны на рис. 1 (а–в). С середины 1990-х гг. по 2020 г. температура здесь повысилась зимой более чем на 4 °С, а летом — на 2 °С.

После 2018 г. ПТВ зимой понизилась к 2023 г. на 2 °С. Летом понижение ПТВ в эти годы составило 0,5 °С.

В 2010-е гг. особенно заметно потеплело на акватории сибирских арктических морей (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское моря), по которым проходит Северный морской путь. Данные метеорологических станций на побережье и островах морей (рис. 1*з–е*) показывают повышение зимней температуры воздуха с 1970-х гг. по 2018 г. на 6 °С, а летней к 2020 г. почти на 3 °С. К 2023 г. зимой температура понизилась на 3,5 °С, а летом на 2,6 °С. Замедление роста температуры воздуха и начало понижения после 2020 г. более очевидно в изменениях средней ПТВ на 7 станциях с началом наблюдений в 1901 г. (рис. 1*ж–и*).

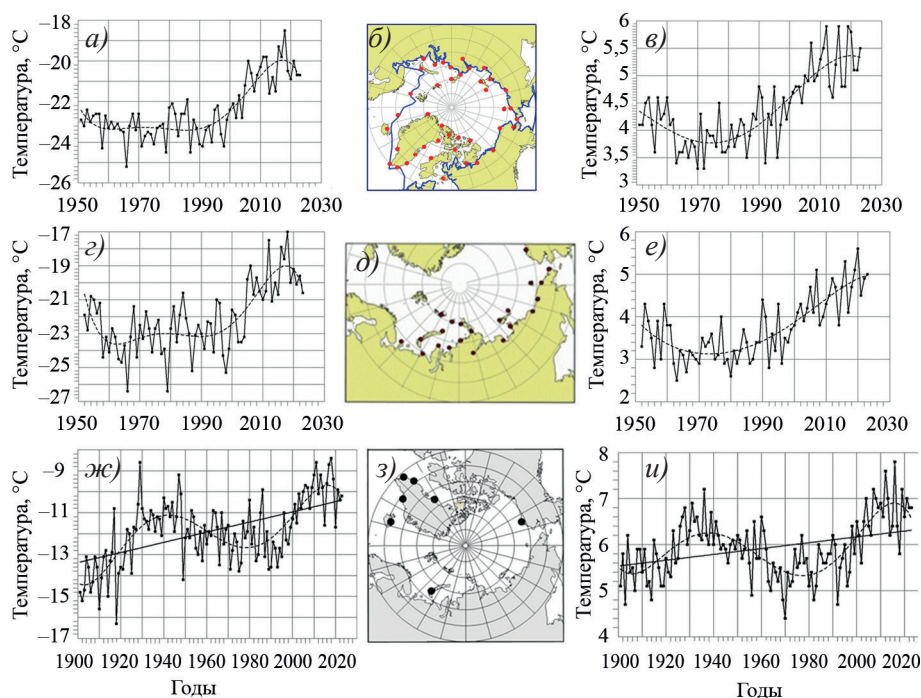


Рис. 1. Средняя температура воздуха зимой (*а, г, ж*) и летом (*в, е, и*) по данным метеорологических станций в Арктике (*б, д, з*) с 1901 по 2023 г.

Приповерхностная температура воздуха в 1951–2023 гг. средняя за декабрь–февраль (*а*) и за июнь–август (*в*) на 41 станции в морской Арктике (*б*). Средняя температура воздуха на акватории сибирских арктических морей зимой (*г*) и летом (*е*) в 1951–2023 гг. *д* — метеорологические станции на побережье и островах арктических морей. Средняя температура воздуха на 7 арктических станциях в 1901–2023 гг. зимой (*ж*) и летом (*и*); *з* — метеорологические станции в морской Арктике с длительными наблюдениями. Пунктир — полином 5-й степени

Fig. 1. Average air temperature in winter and summer in the marine Arctic.

Average surface air temperature for December–February (*a*) and June–August (*b*) at 41 stations in the marine Arctic (*b*) in 1951–2023. Average air temperature of the Siberian Arctic seas in winter (*c*) and in summer (*e*) in 1951–2023; *d* — meteorological stations on the coast and islands of the Arctic seas. Average air temperature at 7 Arctic stations in winter (*zh*) and in summer (*i*) in 1901–2023; *z* — meteorological stations in the maritime Arctic with long-term observations. The dotted line is a fifth degree polynomial

В изменениях температуры в 1901–2023 гг. очевидно присутствие на фоне тренда квазипериодического колебания с наложением межгодовой изменчивости. Происхождение этого примерно 70-летнего колебания связано с Атлантической междесятилетней осцилляцией (АМО) [8, 9, 16], выделяемой в изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике с конца XIX в. в виде 60–80-летнего колебания [17]. Воспроизведение АМО в экспериментах на глобальной модели циркуляции океана [18] подтверждает реальность и устойчивость этого феномена динамики Атлантического океана. 70-летнее квазипериодическое колебание вместе с трендом на рис. 1 образуют низкочастотное изменение, которое вносит основной вклад в изменчивость ПТВ в 1901–2023 гг., достигающий 93 % для средней за год ПТВ и 75 и 80 % для средних за осенние и зимние месяцы, что может послужить основой для экстраполяции ПТВ на следующий 70-летний цикл [16].

Сокращение морского ледяного покрова

Потепление в Арктике сопровождается сокращением площади морского льда. Тренды средней ледовитости во все месяцы отрицательны, кроме отдельных незначимых близких к нулю трендов в арктических морях с февраля по апрель (рис. 2а). Минимальные по абсолютной величине тренды приходятся на апрель, а максимальные — на октябрь. Рост трендов ледовитости с мая по июль противоположен уменьшению трендов температуры в эти месяцы (рис. 2б), что может указывать на охлаждающее влияние растущего таяния снега и льда и прогрева воды в эти месяцы.

В СЛО ледовитость в сентябре сократилась от максимума в 1980 г. до минимума в 2012 г. на 54 %, или в 2,2 раза. При этом сокращение тесно связано с ростом летней температуры воздуха (рис. 3а). На акватории морей СМП площадь морского льда (ПМЛ) в сентябре (рис. 3б) быстро сокращалась с 1996 г. вместе с ростом летней температуры воздуха и за десять лет к 2005 г. уменьшилась с 1892 тыс. км² до 234 тыс. км². В последующие годы площадь колебалась вблизи этого уровня

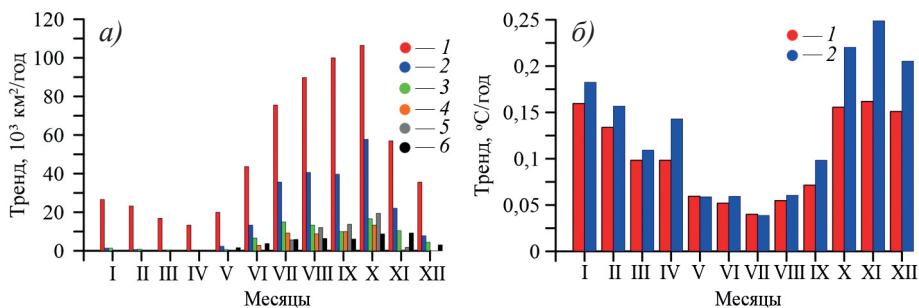


Рис. 2. Коэффициенты тренда среднемесячной ледовитости (а) и температуры воздуха (б) в морской Арктике.

а: 1 — Северный Ледовитый океан; 2 — моря Северного морского пути (3 — Карское, 4 — Лаптевых, 5 — Восточно-Сибирское и 6 — Чукотское). б: 1 — Северный Ледовитый океан; 2 — моря Северного морского пути (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское)

Fig. 2. Trend coefficients of average monthly sea ice extend (a) and air temperature (b) in the marine Arctic.

а: 1 — Arctic Ocean; 2 — seas of the Northern Sea Route (3 — Kara, 4 — Laptev, 5 — East Siberian and 6 — Chukchi Sea). б: 1 — Arctic Ocean; 2 — seas of the Northern Sea Route (Kara, Laptev, East Siberian and Chukchi Sea)

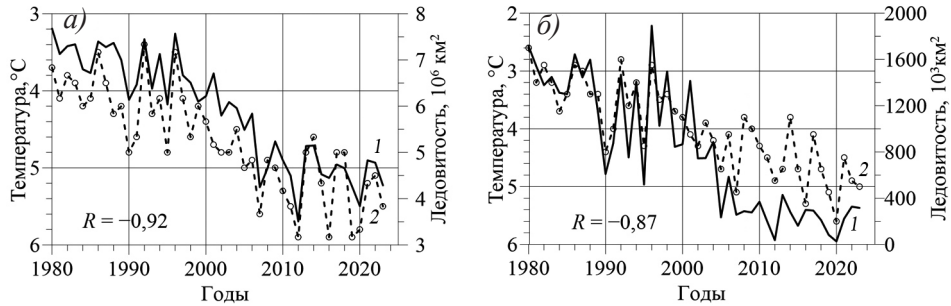


Рис. 3. Площадь, занятая морским льдом в сентябре, и летняя температура воздуха на акватории Северного Ледовитого океана (а) и морей Северного морского пути (б) в 1980–2023 гг. R — коэффициенты корреляции

Fig. 3. Sea ice extend in September and summer air temperature in the Arctic Ocean (a) and the seas of the Northern Sea Route (b) in 1980–2023. R — correlation coefficients

с минимальным значением 26,3 тыс. km^2 в 2020 г., меньшим, чем предшествующий минимум 2012 г. (37 тыс. km^2). В 2023 г. площадь льда возросла до 316 тыс. km^2 .

Зимой сокращение ледовитости много меньше, чем летом. Сокращение от максимума в марте 1982 г. до минимума в марте 2016 г. в СЛО составило 9 % при тренде — 17 тыс. km^2 в год. В морях СМП в марте сокращение ледовитости от максимума в 1979 г. до минимума в 2017 г. составило чуть более 1 %, а тренд на сокращение — 321 km^2 в год. При этом зависимость ледовитости в марте от зимней температуры воздуха характеризуется значительно более низкими коэффициентами корреляции по сравнению с зависимостью ледовитости в сентябре от летней температуры воздуха: корреляция между ледовитостью в марте и температурой в декабре–феврале в СЛО составляет $-0,72$ (летом $-0,92$), а в морях СМП $-0,48$ (летом $-0,87$).

Факторы, влияющие на потепление и сокращение морского ледяного покрова

Связь зимней температуры воздуха с ледовитостью в сентябре характеризуется более сильной корреляцией по сравнению с ледовитостью в марте: для СЛО коэффициент корреляции равен $-0,77$, а для морей СМП — $-0,67$. Еще более очевидна связь зимней температуры и ледовитости в сентябре при сопоставлении с суммой градусо-дней мороза (СГДМ) за октябрь–апрель: в СЛО коэффициент корреляции СГДМ и ледовитости в сентябре равен $-0,87$, в морях СМП — $-0,80$. Причина этого «парадокса» кроется в зависимости между СГДМ и толщиной [19, 20] или объемом льда [11], при уменьшении которых летнее сокращение ледяного покрова растет. На рис. 4а–в показаны изменения нисходящей длинноволновой радиации (НДВР), СГДМ и параметров ледяного покрова СЛО.

Из рисунка следует, что более 70 % межгодовой изменчивости максимального объема льда в апреле и ледовитости СЛО в сентябре связаны с изменениями СГДМ, которая, в свою очередь, зависит от НДВР. Изменения НДВР зимой в Арктике практически полностью зависят от изменений температуры воздуха и содержания водяного пара (СВП) в атмосфере, подверженных влиянию притоков из низких широт. Показано [11], что перенос тепла и влаги в Арктику увеличивается под влиянием повышения температуры поверхности океана, сопровождающегося ростом температуры воздуха и содержания водяного пара в атмосфере над океаном, а усилившаяся циркуляция

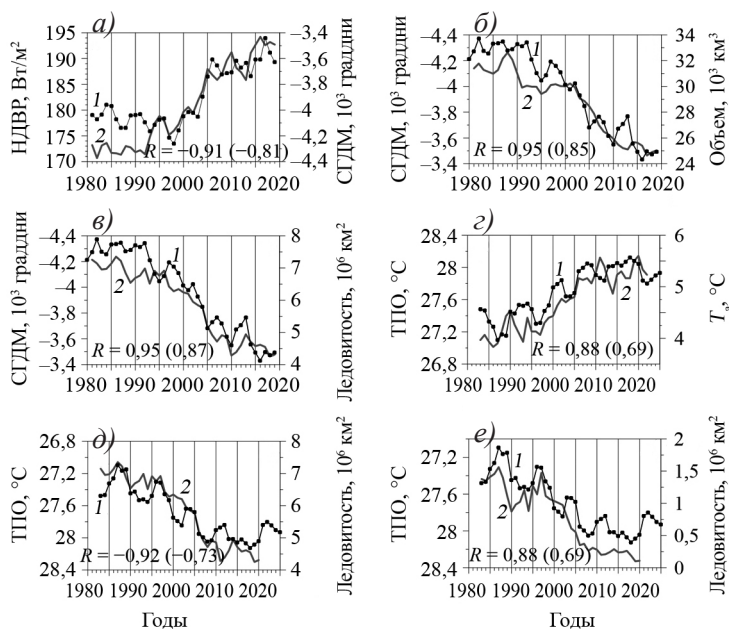


Рис. 4. Изменение параметров атмосферы и морского льда в Арктике и связь с изменениями ТПО в тропической Северной Атлантике: *a* — НДВР зимой (1) по данным ERA5 в области (70–87,5° с. ш.) и СГДМ по данным 41 станции в морской Арктике (2); *б* — СГДМ (1) и апрельский объем льда в Северном Ледовитом океане по расчету на модели AARI–IOCM (2); *в* — СГДМ (1) и ледовитость СЛО в сентябре; *г* — ТПО (1) в октябре и средняя ПТВ летом в морской Арктике (2) с запаздыванием на 3 года; *д* — ТПО (1) в октябре и ледовитость СЛО в сентябре (2) с запаздыванием 4 года; *е* — ТПО (1) в октябре и ледовитость на СМП (2) с запаздыванием 4 года. Ряды сглажены с 3-летним окном.

R — коэффициенты корреляции между (1) и (2), в скобках — между несглаженными рядами

Fig. 4. Changes in atmospheric and sea ice parameters in the Arctic and relationship with changes in SST in the tropical North Atlantic: *a* — STRD in winter (1) according to ERA5 data in the region (70–87,5° N) and SDDF according to data from 41 stations in the marine Arctic (2); *б* — SDDF (1) and April ice volume in the Arctic Ocean as calculated using the AARI–IOCM model (2); *в* — SDDF (1) and ice cover in the Arctic Ocean in September; *г* — SST (1) in October and average SAT in summer in the marine Arctic (2) with a lag of 3 years; *д* — SST (1) in October and SIE in the Arctic Ocean in September (2) with a lag of 4 years; *е* — SST (1) in October and SIE on the NSR (2) with a lag of 4 years. The series are smoothed with a 3-year window.

R — correlation coefficients between (1) and (2), in brackets — between unsmoothed series

атмосферы и океана способствует переносу теплого и влажного воздуха и нагретой воды в умеренные и высокие широты. Примеры связи между изменениями ТПО в тропической Северной Атлантике и характеристиками климата Арктики см. на рис. 4*г–е*.

Оценка влияния атмосферной циркуляции на температурный режим и усиление потепления в Арктике

Температурный режим Арктики находится под влиянием атмосферных переносов тепла и влаги из более низких широт, изменяющихся вместе с колебаниями циркуляции атмосферы. В качестве индикаторов влияния атмосферной циркуляции на температурный режим предложен [21] индекс D_M , представляющий меридио-

нальный контраст приповерхностной температуры воздуха. Основанием послужила связь между усилением переноса тепла и влаги атмосферной циркуляцией и пространственным контрастом приповерхностной температуры воздуха. Формула для расчета индекса D_M имеет вид:

$$D_M = \left\langle \left(T_\varphi - \langle T_\varphi \rangle \right)^2 \right\rangle_\varphi, T_\varphi = \langle T_{\varphi\lambda} \rangle_\lambda, \langle T_\varphi \rangle = \langle T_\varphi \rangle_\varphi, \quad (1)$$

где T — приповерхностная температура воздуха, угловые скобки означают осреднение по широте φ или по долготе λ .

Результаты расчетов индексов в сопоставлении с температурой воздуха в области $70\text{--}87,5^\circ$ с. ш. показаны на рис. 5. В левой колонке индексы и температура зимой, в правой — летом.

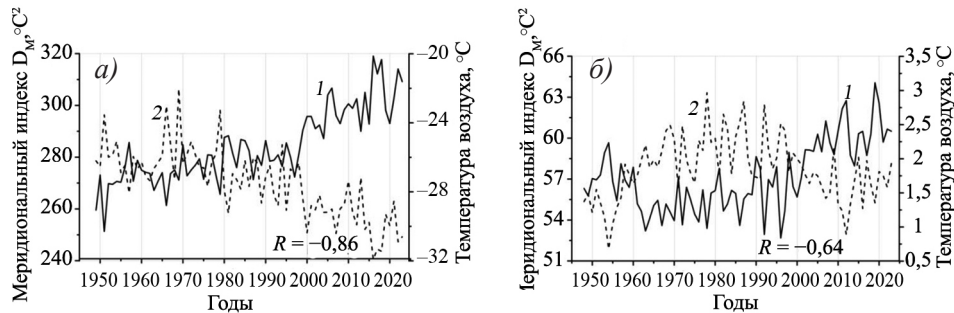


Рис. 5. Меридиональный индекс D_M и температура воздуха в области $70\text{--}87,5^\circ$ с. ш., рассчитанные по данным реанализа NCEP за 1948–2023 гг.: а — зима; б — лето

Fig. 5. Meridional index D_M and air temperature in the region of $70\text{--}87,5$ N, calculated from NCEP reanalysis data for 1948–2023: а — winter; б — summer

Меридиональный индекс отражает тренд на потепление в области $70\text{--}87,5^\circ$ с. ш. и межгодовые вариации температуры зимой и летом, но летом связь между индексом и температурой слабее.

Атмосферная циркуляция влияет и на усиление изменчивости и трендов температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария. Количественная оценка вклада атмосферных переносов в формирование изменчивости и трендов средней приповерхностной температуры воздуха в Арктике получена [22] с помощью простой модели атмосферы и данных реанализов NCEP и ERA5 за 1989–2020 гг. на основе представления о множестве событий воздухообмена между широтами.

Обмен больше влияет на усиление тренда в зимние и поздние осенние месяцы и менее всего летом с минимумом в июле. Рост вклада в августе–ноябре с максимумом в октябре, вероятно, связан с растущим влиянием осеннего охлаждения и ледообразования в арктических морях, а летний минимум кроме ослабления циркуляции атмосферы — также с таянием снега и льда в Арктике. Обменом можно объяснить 54 % усиления тренда температуры воздуха (арктического усиления) в области $60\text{--}90^\circ$ с. ш. в среднем за год и 66 % в холодную часть года относительно остальной части Северного полушария. Отсюда следует, что арктическое усиление в значительной степени является свойством изменчивости температуры воздуха на земном шаре, формируемым вихревым обменом в атмосфере в присутствии разности температуры между экватором и полюсом и тренда, которые поддерживаются внешними воздействиями.

Обсуждение и выводы

В статье рассмотрены новые репрезентативные индикаторы изменений климатического режима морской Арктики, исходя из современных знаний о причинах изменений климата с использованием новых источников данных, включая массивы реанализов. Значение исследований в этом направлении растёт, поскольку изменения климата Арктики составляют одно из актуальных и дискуссионных направлений современных климатических исследований. Потепление, происходящее с конца XX в. и усилившееся здесь в начале XXI в., привлекает особое внимание, а сокращение площади морского льда стало наиболее обсуждаемым его проявлением. Установлено, что температура воздуха в морской Арктике и на акватории морей Северного морского пути достигла максимума в десятилетие 2011–2020 гг. и намечился ее спад. Площадь, занятая морским льдом на сезонном минимуме в сентябре, стабилизировалась с 2007 г. на уровне 4500 и 200 тыс. км², соответственно в СЛО и на СМП.

Анализ причин климатических изменений в морской Арктике показал определяющую роль в развитии потепления тепла и влаги, поступающих с атмосферными и океанскими переносами из прилегающих и низких широт, и продемонстрировал возможности перспективной оценки климатических изменений. Увеличение теплового нисходящего длинноволнового излучения на поверхности под влиянием растущего притока тепла и водяного пара из прилегающих широт, прежде всего со стороны Атлантики, замедляет нарастание морского льда зимой. Индикаторами процесса являются содержание водяного пара в атмосфере (СВП), нисходящая тепловая радиация (НДВР) и сумма градусо-дней морозов (СГДМ) на поверхности, которые тесно связаны друг с другом и с параметрами ледяного покрова.

Более 70 % межгодовой изменчивости максимального объема льда в апреле и ледовитости СЛО в сентябре связаны с изменениями СГДМ, которая, в свою очередь, зависит от НДВР. Изменения НДВР зимой в Арктике практически полностью зависят от изменений температуры воздуха и содержания водяного пара в атмосфере, подверженных влиянию притоков из низких широт.

Перенос тепла и влаги в Арктику увеличивается под влиянием повышения температуры поверхности океана в низких широтах. Усиленная потеплением циркуляция атмосферы и океана способствуют переносу теплого и влажного воздуха и нагретой воды в умеренные и высокие широты. Показано, что ТПО в октябре в тропической Северной Атлантике и ледовитость СЛО и в морях СМП в сентябре связаны с запаздыванием на 4 года коэффициентами корреляции 0,91–0,92 после сглаживания рядов с окном 3 года (0,70–0,73 без сглаживания), что указывает на прогностический потенциал установленных связей. Изменения ТПО в тропиках проявляются через 3 года в поступлении теплой и соленой воды из Северной Атлантики в Северо-Европейский бассейн, индикатором которого служит температура воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану в Баренцевом море по данным ПИНРО (pinro.ru/labs/hid/kolsec22.php). Наиболее тесная связь между температурой воды на Кольском разрезе и ледовитостью Баренцева моря приходится на период с января по июнь (коэффициенты корреляции от –0,70 до –0,87 (от –0,80 до –0,95 после сглаживания по 3 года)).

Обобщающая схема установленных связей между низкими широтами, приатлантической и морской Арктикой представлена на рис. 6. Согласно схеме ТПО в экваториальной области 10° ю. ш.–10° с. ш. в августе определяет изменения температуры

воздуха и содержания водяного пара в области 0–25° с. ш. и ТПО в тропической части Северной Атлантики (5–25° с. ш., 60–10° з. д.) в октябре. ТПО в этой части Северной Атлантики влияет на изменения ТПО зимой в Норвежском, Гренландском и Баренцевом морях через 27 месяцев (на 3-й год). Индикатором изменений служит температура воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану в декабре–январе. Последующий рост температуры воздуха и содержания водяного пара в Арктике под влиянием атмосферных переносов из приатлантической части способствуют повышению притока длинноволновой радиации к поверхности снега и льда, уменьшению суммы отрицательных температур воздуха и зимнего нарастания льда, что в последующем ускоряет летнее сокращение ледяного покрова.

В качестве индикатора влияния атмосферной циркуляции предложен [21] индекс D_M , представляющий меридиональный контраст приповерхностной температуры воздуха. Индекс отражает тренд на потепление в области 70–87,5° с. ш. и межгодовые вариации температуры зимой и летом, но летом связь между индексом и температурой слабее. Оценено влияние атмосферной циркуляции на усиление изменчивости и трендов температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария, и сделан вывод, что арктическое усиление в значительной степени является свойством изменчивости температуры воздуха на земном шаре, формируемым вихревым обменом в атмосфере в присутствии разности температуры между экватором и полюсом и тренда, которые поддерживаются внешними воздействиями.

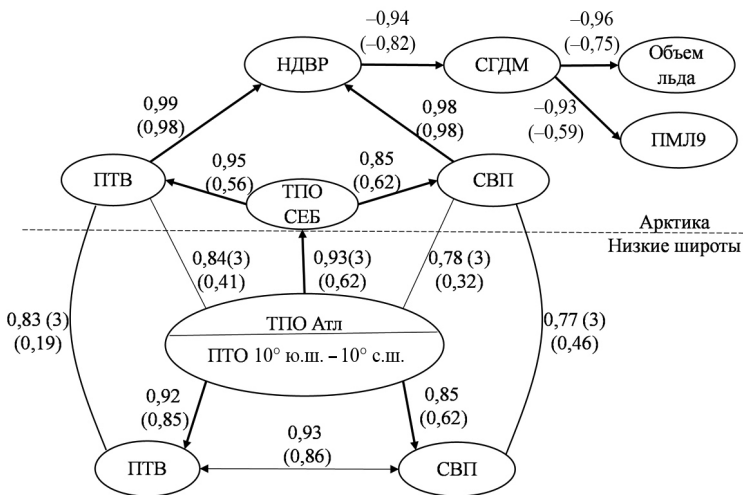


Рис. 6. Граф корреляций, связывающих ТПО в низких широтах и параметры климата и морского льда в Арктике.

В овалах указаны параметры атмосферы и океана. Связи обозначены стрелками, у которых проставлены соответствующие коэффициенты корреляции. Рядом в скобках проставлены запаздывания (в годах). Линии без стрелок отражают формальные корреляции между параметрами. Ряды коррелируемых параметров сглажены скользящим усреднением с временным окном 3 года. В скобках ниже указаны корреляции без тренда

Fig. 6. Graph of correlations linking sea surface temperature at low latitude and climate and sea ice parameters in the Arctic.

Atmospheric and oceanic parameters are shown in ovals. The arrows show the connections with corresponding correlation coefficients. Delays (in years) are shown in the brackets nearby. The lines without arrows are formal correlations between parameters. The series of correlated parameters are smoothed with a window of 3 years. Detrended correlations are shown in brackets below

В заключение перечислим параметры температурного и ледового режима и показатели влияющих факторов, предлагаемые для мониторинга изменений климата в морской Арктике:

- TmA_sm — среднемесячная приповерхностная температура воздуха летом (июнь–август) над СЛО по данным 41 ГМС, °C;
- SGDM SLO — сумма градусо-дней мороза (октябрь–апрель) над СЛО по данным 41 ГМС;
- SMP_Tsm — среднемесячная приповерхностная температура воздуха летом (июнь–август) над морями СМП, рассчитанная по данным 24 ГМС, °C;
- SGDM SMP — сумма градусо-дней мороза (октябрь–апрель) над морями СМП, рассчитанная по данным 24 ГМС;
- T7mA — средняя температура воздуха летом (июнь–август), рассчитанная по данным на 7 арктических станциях с 1901 г., °C;
- Ледовитость СЛО в сентябре, $\times 10^3$ км², по данным <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/slo/>;
- Ледовитость морей СМП, $\times 10^3$ км², по данным <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/smp/>;
- Dm_wn — индекс меридиональной циркуляции над Северным полушарием зимой, рассчитанный по данным реанализа НСЭП, (°C)²;
- Dm_sm — индекс меридиональной циркуляции над Северным полушарием летом, рассчитанный по данным реанализа НСЭП, (°C)²;
- SST_10 — среднемесячная температура поверхности океана в районе тропической Северной Атлантики (10–60° з. д., 5–25° с. ш.) в октябре, °C, рассчитанная по данным реанализа HadISST;
- ТКМ — температурой воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану (Ткм) в декабре–феврале по данным сайта <http://www.pinro.vniro.ru/ru/razrez-kolskij-meridian/gyady-nablyudenij/>.

Рассчитанные параметры и показатели заносятся в климатическую базу данных на сайте ААНИИ в виде климатических рядов (<http://old.aari.ru/main.php?lg=0&id=466>).

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Статья подготовлена на основе результатов проекта НИТР 3.2 (мониторинг температурного и ледового режима морской Арктики) и при поддержке РФФ проект 23-47-10003 (оценки влияния атмосферной циркуляции на усиление изменчивости и трендов температуры).

Competing interests. No conflict of interests.

Funding. The article was prepared based on the results of the NITR 3.2 project (monitoring the temperature and ice regime of the marine Arctic) and with the support of the Russian Science Foundation project 23-47-10003 (assessing the influence of atmospheric circulation on increasing temperature variability and trends).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Stocker T., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.) IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. 1535 p.

2. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Urazgildeeva A.V., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. *Int J Climatol*. 2019;39(8):3582–35925. <https://doi.org/10.1002/joc.6040>
3. Семенов В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера — полярные льды — океан. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015;1:232–248.
Semenov V.A. Fluctuations in modern climate caused by feedbacks in the atmosphere — polar ice — ocean system. *Fundamental and applied climatology*. 2015;1:232–248. (In Russ.)
4. Иванов В.В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова. *Гидрометеорология и экология*. 2021;64:407–434. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-64-407-434>
Ivanov V.V. Contemporary changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with a decrease in sea ice cover. *Hydrometeorology and ecology*. 2021;64:407–434. (In Russ.). <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-64-407-434>
5. Winton M. Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it? *Geophys. Res. Lett*. 2006;33:L03701. <https://doi.org/10.1029/2005GL025244>
6. Cao Y., Liang S., Chen X., He, T., Wang, D., Cheng, X. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting. *Scientific Reports*. 2017;7(8462). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08545-2>
7. Николаев Ю.В. *Крупномасштабное взаимодействие океана и атмосферы и формирование аномалий погоды*. Л.: Гидрометеоиздат; 1981. 51 с.
8. Kushnir Y. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions. *Climate*. 1994;7(1):141–157. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007<0141:IVINAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<0141:IVINAS>2.0.CO;2)
9. Robertson A.W., Mechoso C.R., Kim Y.-J. The influence of Atlantic sea surface temperature anomalies on the North Atlantic Oscillation. *Climate*. 2000;13(1):122–138. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0122:TIOASS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0122:TIOASS>2.0.CO;2)
10. Shin S.I., Sardeshmukh P.D. Critical influence of the pattern of Tropical Ocean warming on remote climate trends. *Climate Dynamics*. 2010;36(7):1577–1591. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0732-3>
11. Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E., Kulakov M.Y. Influence of SST in low latitudes on the Arctic warming and sea ice. *J. Mar. Sci. Eng*. 2021;9(10):1145. <https://doi.org/10.3390/jmse9101145>
12. Hoerling M.P., Hurrell J. W., Xu T. Tropical origins for recent North Atlantic climate change. *Science*. 2001;292(5514):90–92. <https://doi.org/10.1126/science.1058582>
13. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике. *Лед и Снег*. 2017;57(3):381–390. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390>
Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Viazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V. The Atlantic's influence on warming and shrinking sea ice in the Arctic. *Ice and Snow*. 2017;57(3):381–390. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390>
14. Årthun M., Eldevik T. On anomalous ocean heat transport toward the Arctic and associated climate predictability. *Climate*. 2016;29(2):689–704. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0448.1>
15. Семенов В. А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике. *Доклады РАН*. 2008;418(1):106–109.
Semenov V. A. The influence of ocean inflow into the Barents Sea on climate variability in the Arctic. *Reports of the Russian Academy of Sciences*. 2008;418(1):106–109. (In Russ.)

16. Алексеев Г.В., Вязилова А.Е., Глок Н.И., Иванов, Н.Е., Харланенкова, Н.Е. Влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на колебания климата Арктики и их предсказуемость. *Арктика: экология и экономика*. 2019;3(35):73–83. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-73-83>
Alekseev G.V., Viazilova A.E., Glok N.I., Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E. The influence of water temperature anomalies in low latitudes of the ocean on climate fluctuations in the Arctic and their predictability. *Arctic: ecology and economics*. 2019;3(35):73–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-73-83>
17. 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>
18. Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В., Выручалкина Т.Ю. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария. *Арктика: экология и экономика*. 2017;2(26):35–52. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-2-35-52>
Panin G.N., Dianskii N.A., Solomonova I.V., Gusev A.V., Vyruchalkina T.Iu. Assessment of climate change in the Arctic in the 21st century based on a combined forecast scenario. *Arctic: ecology and economics*. 2017;2(26):35–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-2-35-52>
19. Prokhorova U., Alekseev G., Vyazilova A. Regional and remote influence on the sea ice in the Kara Sea. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023;11(2):254. <https://doi.org/10.3390/jmse11020254>
20. Тимофеева А.Б., Шаратунова М.В., Прохорова У.В. Оценка многолетней изменчивости толщины припая в морях Российской Арктики по данным полярных станций. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(3):310–330. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330>
Timofeeva A.B., Sharatunova M.V., Prokhorova U.V. Estimation of fast ice thickness multiyear variability in the Russian Arctic seas according to polar stations data. *Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(3):310–330. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330>
21. Алексеев Г.В. Арктическое измерение глобального потепления. *Лед и Снег*. 2014;54(2):53–68. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-53-68>
Alekseev G.V. Arctic dimension of global warming. *Ice and Snow*. 2014;54(2):53–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-53-68>
22. Алексеев Г.В., Харланенкова Н.Е., Вязилова А.Е. Арктическое усиление: роль междуширотного обмена в атмосфере. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2023;9(1):13–32. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2023-1-13-32>
Alekseev G.V., Kharlanenkova N.E., Viazilova A.E. Arctic intensification: the role of interlatitudinal exchange in the atmosphere. *Fundamental and Applied Climatology*. 2023;9(1):13–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2023-1-13-32>