

Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 438—454.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(84):438—454.

Научная статья

УДК 551.526.6:551.465.4(268.45)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-39-438-454

Роль атмосферы в тепловом балансе поверхности юго-восточной части Баренцева моря

Диана Витальевна Дешова¹, Светлана Михайловна Гордеева^{1, 2}

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, d.deshova@rshu.ru

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматривается межгодовая изменчивость характеристик атмосферы, их вклад в тепловой баланс поверхности юго-восточной части Баренцева моря (Печорское море) и их связи с адвективными процессами в море. По данным реанализа ECMWF ERA5, за период с 1993 г. по 2025 г. зафиксировано значительное усиление всех потоков тепла между морем и атмосферой, особенно в холодное полугодие. Однако, начиная с середины 2010-х гг., межгодовая изменчивость потоков тепла демонстрирует признаки стабилизации на новом уровне, когда температура поверхности моря перестает расти, а ветер ослабевает, что указывает на замедление потепления в регионе. Сопоставление атмосферных процессов с переносом тепла течениями показало, что избыток адвективного тепла почти полностью компенсируется его отдачей в атмосферу, но внутригодовая структура этого обмена различна.

Ключевые слова: Баренцево море, взаимодействие океана с атмосферой, Печорское море, тепловой баланс, ECMWF ERA5.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ FSZU-2023-0002.

Для цитирования: Дешова Д. В., Гордеева С. М. Роль атмосферы в тепловом балансе поверхности юго-восточной части Баренцева моря // Гидрометеорология и экология. 2026. № 84. С. 438—454. doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-39-438-454.

Original article

The role of the atmosphere in the heat balance of the surface of the south-eastern part of the Barents Sea

Diana V. Deshova¹, Svetlana M. Gordeeva^{1, 2}

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Summary. The article considers the interannual variability of atmospheric characteristics, their contribution to the heat balance of the south-eastern part of the Barents Sea (Pechora Sea) surface and their relationship to advective processes in the sea. Based on the monthly average data of the ECMWF ERA5 reanalysis for the period from 1993 to 2025 for the cold and warm half-years for the surface of the Pechora

Sea (boundaries: longitude 50 E in the west, latitude 71 N in the north and in the Kara Gate Strait), the atmospheric pressure, sea surface temperature, wind speed and components of heat exchange with the atmosphere (radiation balance and longwave radiation, latent and sensible heat fluxes) are estimated.

It was established that atmospheric conditions over the water area are characterized by low pressure and pronounced seasonal changes in wind direction: in winter, flows from the mainland prevail, while in summer flows from neighboring seas dominate. An analysis of surface heat flux revealed that the sea actively releases heat to the atmosphere during the cold season (10.3 TW) and receives it during the warm season (6.4 TW). During the study period, a steady increase in sea surface temperature was recorded (0.13 TW/year), accompanied by increased radiation balance in summer. This is reflected in a significant increase in all heat fluxes between the sea and the atmosphere, especially during the cold half of the year. At the same time, since the mid-2010s, interannual variability has shown signs of stabilization at a new level, with surface temperatures ceasing to rise and winds weakening, indicating a possible transition of the regional climate system to a state of dynamic equilibrium.

Principal component analysis demonstrated that the majority of variability is determined by heat exchange processes directly related to surface temperature (52—54 % of variance) with exception is radiation balance, which reflects this relationship with SST only during the warm period. Variability in wind and atmospheric pressure are identified as two weaker, independent physical processes. The strong statistical correlation between surface heat fluxes allows for forecasting the thermal state of regional waters up to six months in advance.

A comparison of atmospheric processes with heat transfer by currents (for period 1993—2018) revealed that excess advective heat is almost completely offset by its release to the atmosphere. However, the intra-annual structure of this exchange is heterogeneous: advective fluxes are small compared to heat fluxes at the water surface, not exceeding 28%. An assessment of the overall heat balance revealed a change in climatic phases: while the heat content of the sea increased at the beginning of the period (1993—2006), a general cooling of the water area (2007—2018) subsequently began due to a decrease in heat influx via currents during the warm half-year and increased heat loss through the surface in winter.

Keywords: Barents Sea, sea-atmosphere interaction, Pechora Sea, heat balance, ECMWF ERA5.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № FSZU-2023-0002.

For citation: Deshova D. V., Gordeeva S. M. The role of the atmosphere in the heat balance of the surface of the south-eastern part of the Barents Sea. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(84):(438—454). doi: 10.33933/2713-3001-2026-84-39-438-454. (In Russ.).

Введение

Баренцево море является одним из самых больших по площади морей в бассейне Северного Ледовитого океана. Здесь отмечаются различные динамические процессы [1, 2]: квацистационарные циркуляции, течения синоптического масштаба и приливные течения, активный теплообмен с атмосферой. Ветвь Нордкапского течения приносит в западную часть акватории теплые и соленые атлантические воды, в южной части из Белого моря с Беломорским течением и со стоком р. Печоры приходят потоки опресненных вод, на севере и востоке вследствие водообмена с Карским морем, в Баренцево море поступают холодные арктические воды. В результате происходит активное тепловое и динамическое взаимодействие деятельного слоя моря и атмосферы. Таким образом, наблюдается приток на акваторию различных типов водных масс, а также формирование «местной» баренцевоморской водной массы в результате перемешивания и трансформации вод.

Одним из подходов к исследованию любого бассейна является балансовый метод [3], который позволяет сопоставлять и оценивать степень воздействия

отдельных источников на общий режим водного объекта за различные периоды времени, выявлять закономерности изменения гидрологических процессов, происходящих под влиянием теплообмена между соседними водными объектами и атмосферой.

Водный, тепловой и солевой балансы представляют собой количественное соотношение притока, расхода и аккумуляции (запаса) воды, тепла или соли для исследуемого объекта за определенный промежуток времени.

Все характеристики балансов для Баренцева моря рассматривались неоднократно разными исследователями. В работе [4] рассмотрено взаимодействие в системе океан—атмосфера в Баренцевом море по данным реанализов за период с 1993 г. по 2014 г. Скорость течения и температура воды, по которым рассчитывался океанический поток тепла, взяты из базы данных ARMOR-3D, где совместно используются натурные и спутниковые данные. Температура воздуха и скорость ветра взяты из базы ERA-Interim, с их помощью произведен расчет адвективных атмосферных потоков тепла. Из базы OAFflux, где использован синтез спутниковых данных и трех атмосферных реанализов (NCEP1, NCEP2 и ERA40), взяты турбулентные потоки тепла на границе океан-атмосфера.

Авторы выявили, что среднее значение океанического потока тепла на западной границе Баренцева моря за период с 1993 г. по 2014 г. равно 102 ± 16 ТВт, усиление притока тепла приводит к отступанию кромки льда в Баренцевом море и ослаблению суммарных вертикальных потоков тепла на границе океан-атмосфера в юго-западной области. В юго-восточной части Баренцева моря за период с 1993 г. по 2014 г. по результатам исследования средний рост потоков тепла в атмосферу в среднегодовом осреднении составил 48 Вт/м^2 , а при зимнем осреднении — 98 Вт/м^2 .

В работе [5] исследованы среднесуточные аномалии температуры воздуха на высоте 2 м в западной части Российской Арктики за период с 1980 г. по 2022 г. по данным реанализов MERRA-2 и ERA5, рассчитаны среднеквадратические отклонения аномалий и их распределение за год. Выявлено увеличение амплитуды, продолжительности и числа экстремальных событий с положительными аномалиями над частью акваторий Баренцева, Карского и Белого морей. При этом для отрицательных аномалий данные параметры сокращаются. Также исследователи показали, что результаты, полученные по разным реанализам (ERA5 и MERRA-2) во многом совпадают. Это свидетельствует о достоверности полученных результатов и возможности использования данных из реанализов.

М. Ортун и др. рассмотрели межгодовую и десятилетнюю изменчивость климатических процессов в Баренцевом море на основе моделирования ретроспективного прогноза на 40 лет — с 1958 г. по 1997 г. [6] и на 60 лет — с 1948 г. по 2007 г. [7] с использованием региональной сопряженной модели лед—океан HAMSUM. Показано, что изменчивость интегрального теплосодержания на акватории Баренцева моря значимо коррелирует с притоком тепла на западной границе акватории. Процессы протекают с некоторым сдвигом по времени относительно друг друга. Сначала происходит усиление океанического потока тепла на границе, затем через 1—10 месяцев увеличивается теплосодержание Баренцева

моря, а после этого рост вертикальных потоков тепла на границе океан—атмосфера через 1—5 месяцев.

Зачастую исследование больших неоднородных акваторий целесообразно проводить с разделением на отдельные участки и с учетом их локальных особенностей. Юго-восточная часть Баренцева моря по совокупности своих природных условий отличается от остальной акватории. Наиболее значительные различия обусловлены слабым влиянием Норвежского течения, заходящего в Баренцево море, вследствие чего здесь наблюдаются более суровый климат и ледовые условия [8]. Данный район Баренцева моря можно рассматривать как Печорское море. Линии условных границ данной акватории идут от мыса Чёрный на о. Южный архипелага Новая Земля до северной оконечности о. Колгуев и от южной оконечности о. Колгуев до материка по меридиану 48 в.д. Проливы Карские Ворота и Югорский Шар к Печорскому морю не относятся [2].

Печорское море как отдельную от Баренцева моря акваторию чаще всего рассматривают с точки зрения использования ресурсов. В экологическом атласе, разработанном ООО «Газпром нефть шельф» [2], Печорское море рассматривается как объект экосистемы Арктики. Здесь описана программа сохранения биоразнообразия в районе платформы «Приразломная», приведены природные и гидрологические условия. В летний период температура поверхностного слоя воды изменяется от 5 °С до 8 °С, а в зимний период — от –1,8 °С до 0 °С. В весенний и осенний периоды температура поверхности моря в среднем составляет 0—4 °С. Распределение солёности в Печорском море зависит от поступления атлантических вод, системы течений, рельефа дна, процессов образования и таяния льда, речного стока и перемешивания вод. Вследствие воздействия всех этих факторов воды Печорского моря распреснены больше, чем воды Баренцева моря. Зимой во время интенсивного ледообразования солёность моря велика и составляет около 32,5—33,0 ‰. Летом в северной части акватории Печорского моря солёность снижается до 32 ‰ из-за общего летнего понижения солёности и значительного поступления с течением Литке сильно опресненных вод Карского моря, а в южной части до 20—25 ‰ из-за паводковых стоков р. Печоры.

В проведенном ранее нами исследовании [9] за период с 1993 г. по 2018 г. определялся водный, тепловой и солевой баланс вод Печорского моря на основе адвекции вод на границах акватории, который замыкался величинами речного стока, изменения уровня моря, осадков и испарения, теплообмена с атмосферой. Использовались среднемесячные данные по температуре, солёности воды и скорости течения из реанализа MERCATOR GLORYS12V1 морской службы Copernicus [https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030]. Сумма всех основных компонентов баланса вод в среднем многолетнем усреднении составила:

- для водного баланса: приток — 0,52 Св, отток — 0,53 Св;
- для теплового баланса: приток — 7,08 ТВт, отток — 7,12 ТВт (1 ТВт = 10^{12} Вт);
- для солевого баланса: приток — 18,05 т/с, отток — 17,82 т/с.

Результаты по отдельным составляющим баланса из исследования [9] за период с 1993 г. по 2018 г. приведены на рис. 1.

В работе [9] выявлено, что адвекция через границы акватории играет главную роль в формировании всех балансов. Основной поток вод направлен с северо-запада акватории транзитом через пролив Карские Ворота в Карское море, анализ линейных трендов указал на рост данного потока. Установлено, что избыток тепла (1,82 ТВт), поступающего в акваторию Печорского моря вследствие водообмена с соседними регионами, в многолетнем усреднении почти полностью компенсируется взаимодействием с атмосферой.

Целью данной работы являлась оценка вклада отдельных характеристик атмосферы в тепловой баланс поверхности Печорского моря.

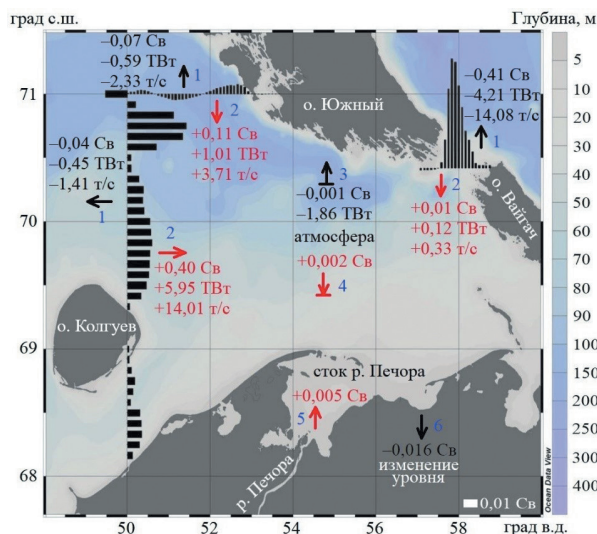


Рис. 1. Оценки компонентов водного (Св), теплового (ТВт) и солевого (т/с) баланса юго-восточной части Баренцева моря [9].

Стрелками показаны направления потоков (красные — поступление в акваторию, черные — уход из акватории. 1 — отток воды, тепла и соли за счет адвекции на границах акватории, 2 — приток воды, тепла и соли за счет адвекции, 3 — испарение воды и теплоотдача в атмосферу, 4 — атмосферные осадки; 5 — сток р. Печоры, 6 — изменение уровня моря). Черные столбцы на границах региона показывают величину интегрального по глубине потока на вертикалях сетки. Длина столбцов отражает поток в сравнении с длиной прямоугольника для масштаба 0,01 Св в правом нижнем углу.

Fig. 1. Estimates of the components of water (Sv), heat (TW) and salt (t/s) balances of the south-eastern part of the Barents Sea [9].

The arrows show the flux directions (red — into the water area, black — out one; 1 — outflow of water, heat and salt due to advection at the boundaries of the water area, 2 — inflow of water, heat and salt due to advection, 3 — evaporation of water and heat transfer to the atmosphere, 4 — atmospheric precipitation; 5 — runoff of the Pechora River, 6 — change in sea level). The black bars on the region borders show the depth-integral flow on the verticals in grid. The bar lengths reflect the flux compared to the length of the box for a scale of 0.01 Sv in the lower right corner.

Исходные данные и методы исследования

Исходными данными в работе послужили: атмосферное давление (Pa), температура поверхности моря (ТПМ), зональная (U) и меридиональная (V) компоненты ветра, а также четыре составляющих теплообмена с атмосферой — радиационный баланс (R), баланс длинноволнового излучения ($I_{\text{эф}}$), скрытый (LE) и явный (F) потоки тепла, которые были заимствованы из архива реанализа ERA5 службы климатической изменчивости Copernicus [<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means>]. ERA5 — это реанализ глобального климата и погоды пятого поколения ECMWF за последние восемь десятилетий. В реанализе доступны ежечасные и ежемесячные данные с 1940 г. по настоящее время. Разрешение сетки широта—долгота $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Выбирались среднемесячные данные в 349 точках за период с 1993 г. по 2025 г. для поверхности Печорского моря, в качестве его границ рассматривались разрезы по долготе 50 в.д. на западе, по широте 71 с.ш. на севере и в проливе Карские Ворота (рис. 1). В ходе выполнения работы для всего периода рассматривались отдельно условно холодное (октябрь—март) и теплое полугодия (апрель—сентябрь) (разделение проводилось по календарным месяцам и сезонам). Первое холодное полугодие относится к зиме 1993/94 гг., последнее — к зиме 2025/26 гг.

Каждая из составляющих теплообмена с атмосферой представляет собой суммарный поток со всей акватории моря, полученный суммированием по всем 349 точкам с учетом площади квадрата расчетной сетки в зависимости от широты. При этом оценка потоков тепла переводилась из Дж/сут в ТВт.

Влияние ледяного покрова на теплообмен Печорского моря с атмосферой напрямую нами не рассматривалось. Опосредованно оно учитывается в расчете тепловых потоков на поверхности моря в реанализе ERA5.

Внешний тепловой баланс поверхности моря (B) рассчитывался по формуле:

$$B = R + I_{\text{эф}} + LE + F, \quad (1)$$

где R — баланс коротковолновой радиации, состоящий из суммы прямой и рассеянной солнечной радиации за вычетом отраженного поверхностью Земли потока радиации с учетом альбедо; $I_{\text{эф}}$ — баланс длинноволновой радиации (эффективное излучение); представляющий собой разность между собственным длинноволновым излучением с поверхности моря и противоизлучением атмосферы, зависящим от вертикального распределения температуры, влажности воздуха, парниковых газов и облачности; LE — скрытый поток тепла с поверхности; F — явный поток тепла с поверхности. Естественно, при оценке B не учитываются адвективные потоки тепла, теплообмен с нижележащими слоями воды и изменения тепла при фазовых переходах воды в лед и обратно.

Согласно соглашению Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), вертикальные потоки считаются положительными, если они направлены вниз [10].

Результаты расчетов и их обсуждение

Прежде всего, рассмотрим оценку вкладов отдельных параметров атмосферы в тепловой баланс поверхности моря за период с 1993 г. по 2025 г., которые

представлены в табл. 1 и на рис. 2. В холодное полугодие атмосферное давление составляет 1009 гПа, а в теплое полугодие атмосферное давление выше и равно 1012 гПа. Средняя скорость ветра при этом в холодный период немного выше (2,96 м/с), чем в теплый (2,22 м/с). Наиболее часто повторяющимся в холодный период является ветер южных направлений (69 %), а в теплый период, наоборот, преобладает ветер северных и западных направлений (повторяемость в сумме 84 %). Таким образом, в холодный период года преобладают потоки воздуха с материка, а в теплый период — с соседних акваторий. Средняя температура поверхности моря в холодное полугодие около нуля (–0,03 °С), а в теплое — 3,14 °С.

Потоки тепла из моря в атмосферу в холодное полугодие выше, чем в теплое: скрытый и явный потоки тепла (–3,32 и –3,40 ТВт против –1,65 и –0,15 ТВт, соответственно), длинноволновое излучение (–4,29 ТВт против –3,52 ТВт). При этом радиационный баланс поверхности моря в теплый период (11,67 ТВт) на порядок выше по сравнению с холодным (0,76 ТВт), вследствие чего происходит суммарная значительная теплоотдача поверхности моря в холодный период (–10,3 ТВт) и некоторый нагрев в летний период (6,4 ТВт).

Таблица 1

Средние многолетние значения гидрометеорологических характеристик для холодного и теплого полугодий на акватории Печорского моря за период с 1993 г. по 2025 г.

Average long-term values of hydrometeorological characteristics for the cold and warm half-years in the Pechora Sea for 1993—2025

Параметр	Среднее значение	
	Холодное полугодие	Теплое полугодие
Давление (P_a), гПа	1009	1012
Скорость ветра (W), м/с	2,96	2,22
Повторяемость ветра	ЮЗ 27 %	СВ 35 %
	Ю 24 %	З 22 %
	ЮВ 18 %	СЗ, С 13 %
ТПМ, °С	–0,03	3,14
Скрытый поток тепла (LE), ТВт	–3,32	–1,65
Явный поток тепла (F), ТВт	–3,40	–0,15
Длинноволновое излучение (Изф), ТВт	–4,29	–3,52
Радиационный баланс (R), ТВт	0,76	11,67
Суммарный теплообмен с атмосферой (Q), ТВт	–10,26	6,35

Тренды в атмосферном давлении и скорости ветра за период с 1993 г. по 2025 г. статистически незначимы (табл. 2, рис. 2). Тренды для температуры поверхности моря в холодное и теплое полугодия положительны (0,06 и 0,13 °С/год), но в летний период температура растет быстрее. Все составляющие теплообмена с атмосферой в оба периода года значимо усиливаются (табл. 2, рис. 3). В результате общая теплоотдача с поверхности моря (напоминаем, что отрицательный тренд характеризует увеличение восходящих потоков) в холодный период со временем увеличивается сильнее (0,10 ТВт/год) в сравнении с теплым периодом (0,01 ТВт/год).

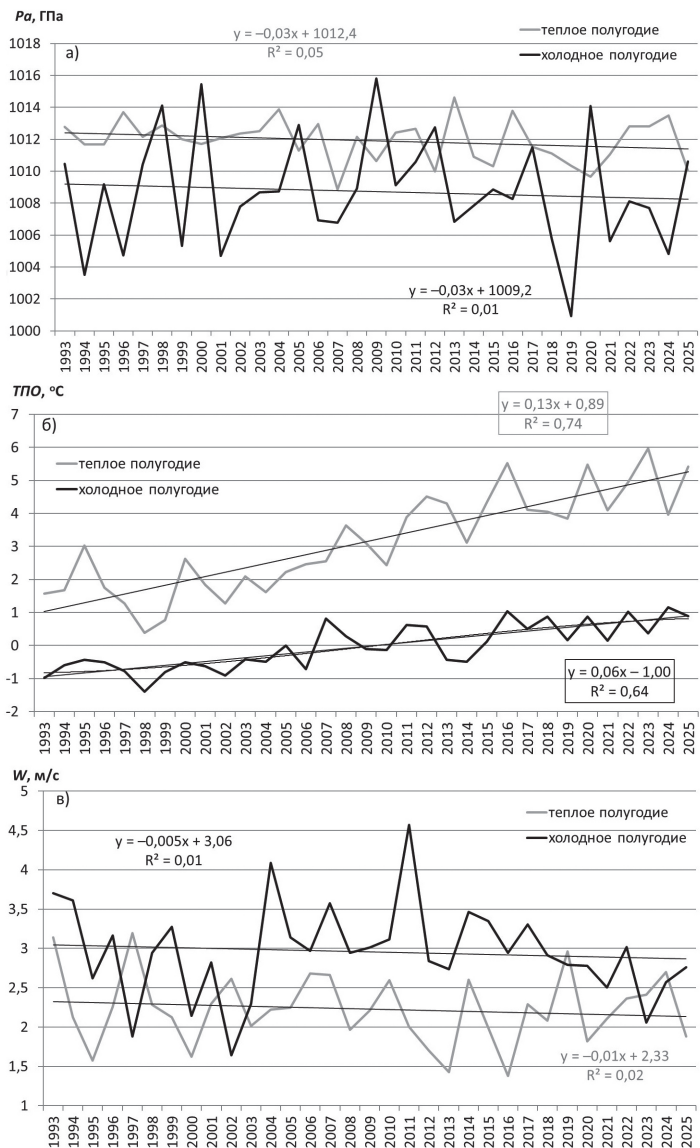


Рис. 2. Межгодовая изменчивость параметров и их линейные тренды за период с 1993 г. по 2025 г. для холодного (черный) и теплого (серый) полугодий.

Рамкой выделены уравнения со значимыми коэффициентами линейного тренда ($\alpha = 0,05$).
а) атмосферное давление P_a , б) температура поверхности моря, в) средняя скорость ветра W .

Fig. 2. Interannual variability of parameters and their linear trends for the period 1993—2025 for the cold (black) and warm (gray) halves of the year.

Equations with significant linear trend coefficients are highlighted by frame ($\alpha = 0.05$).
а) atmospheric pressure P_a , б) sea surface temperature, в) wind speed W .

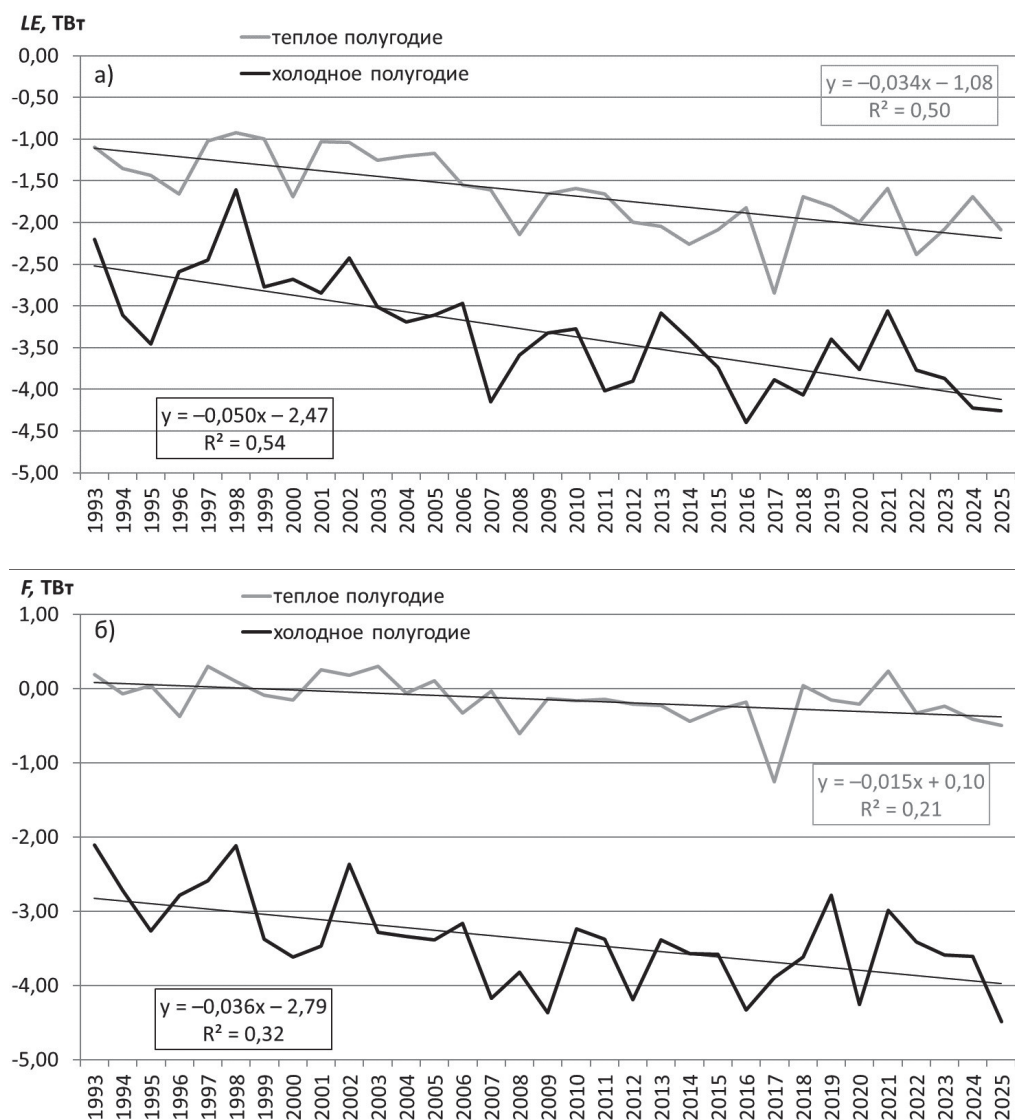


Рис. 3 (начало). Межгодовая изменчивость составляющих теплового баланса поверхности моря и их линейные тренды за период с 1993 г. по 2025 г. для холодного (черный) и теплого (серый) полугодий.

Рамкой выделены уравнения со значимыми коэффициентами линейного тренда ($\alpha = 0,05$).

а) скрытый поток тепла LE, б) явный поток тепла F.

Fig. 3 (beginning). Interannual variability of sea surface heat balance components and their linear trends for the period 1993—2025 for the cold (black) and warm (gray) halves of the year.

Equations with significant linear trend coefficients are highlighted by frame ($\alpha = 0,05$).

а) latent heat flux LE, б) sensible heat flux F.

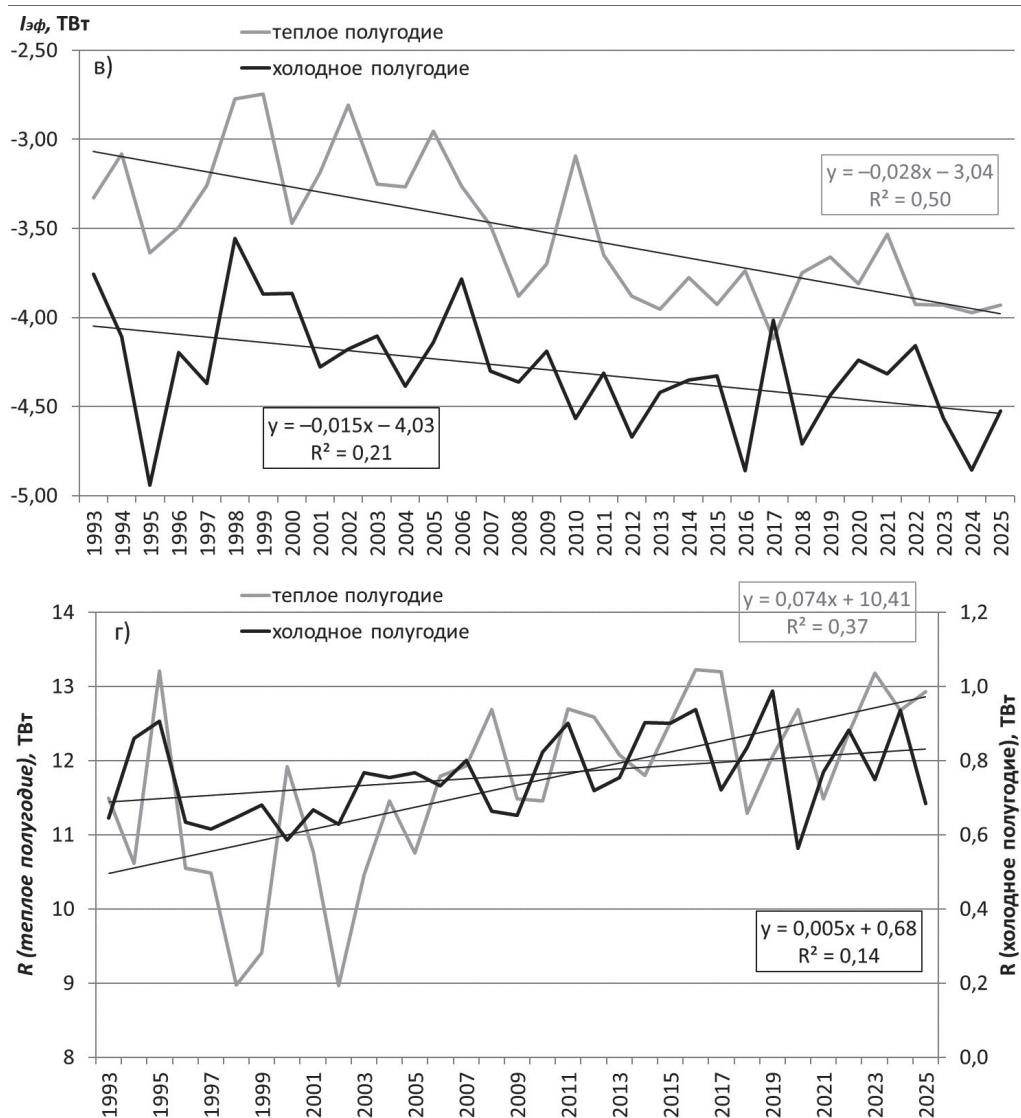


Рис. 3 (окончание). Межгодовая изменчивость составляющих теплового баланса поверхности моря и их линейные тренды за период с 1993 г. по 2025 г. для холодного (черный) и теплого (серый) полугодий.

Рамкой выделены уравнения со значимыми коэффициентами линейного тренда ($\alpha = 0,05$).

б) длинноволновое излучение $I_{эф}$, г) радиационный баланс R .

Fig. 3 (ending). Interannual variability of sea surface heat balance components and their linear trends for the period 1993—2025 for the cold (black) and warm (gray) halves of the year.

Equations with significant linear trend coefficients are highlighted by frame ($\alpha = 0,05$).

б) longwave (thermal) radiation $I_{эф}$, г) radiation balance R .

Таблица 2

Коэффициенты линейного тренда атмосферных параметров над акваторией Печорского моря для периода с 1993 г. по 2025 г. Выделены значимые коэффициенты ($\alpha = 0,05$)

Linear trend coefficients of atmospheric parameters over the Pechora Sea for the period 1993—2025. Significant coefficients are highlighted ($\alpha = 0,05$)

Параметр	Коэффициент линейного тренда, год ⁻¹					
	Холодное полугодие			Теплое полугодие		
	1993—2025	1993—2014	2015—2025	1993—2025	1993—2014	2015—2025
Давление (P_a), гПа	–0,03	0,09	–0,07	–0,03	–0,04	0,05
Скорость ветра (W), м/с	–0,01	0,02	–0,08	–0,01	–0,02	0,04
ТПМ, °С	0,06	0,05	0,04	0,13	0,12	0,06
Скрытый поток тепла (LE), ТВт	–0,05	–0,06	–0,01	–0,03	–0,04	0,01
Явный поток тепла (F), ТВт	–0,04	–0,06	–0,01	–0,02	–0,02	0,01
Длинноволновое излучение ($I_{\text{эф}}$), ТВт	–0,02	–0,02	–0,01	–0,03	–0,03	–0,01
Радиационный баланс (R), ТВт	0,01	0,01	–0,01	0,07	0,08	0,01
Суммарный теплообмен с атмосферой (B), ТВт	–0,10	–0,13	–0,04	–0,01	–0,01	0,03

На основании линейных трендов за исследуемый период в регионе выявлен значительный рост теплоотдачи в атмосферу с поверхности акватории. Это объясняется потеплением поверхности моря, так как количество солнечной радиации, приходящей на поверхность акватории летом, значимо увеличивается (0,07 ТВт за год). Усиление нагрева поверхности моря летом и усиление теплоотдачи зимой показывает тенденцию на рост вертикальной атмосферной динамики в регионе.

Однако на фоне общих линейных трендов в межгодовой изменчивости с середины 2010-х гг. видна стабилизация температуры поверхности воды на уровне 4,7 °С в теплый период и 0,7 °С — в холодный период. Кроме того, в это же время прекращается рост летом радиационного баланса, длинноволнового излучения и скрытого тепла, т.е. тепловых потоков, связанных с ТПМ. Также начинает ослабевать ветер в холодный период (см. рис. 2 и табл. 2). Это указывает на замедление потепления в регионе.

Так как все характеристики между собой физически взаимосвязаны, для выявления общих процессов выполнен анализ главных компонент (ГК). В табл. 3 приведены основные параметры ортогонального разложения, по которым видно, что по матрице характеристик выявляется по 3 основных физических процесса, в совокупности определяющих 88 % в холодный и 84 % в теплый периоды. Преобладающим (1я ГК, 52 и 54 % дисперсии) является процесс теплообмена, определяющий усиление теплоотдачи при росте ТПМ. Исключением является

радиационный баланс, который показывает рост ТПМ при его увеличении в теплый период, что естественно, а зимой (в полярную ночь), не связан с основными тепловыми потоками (2я ГК). Но поскольку в полярную ночь его значения близки к нулю, то отсутствие корреляции понятно.

Общий теплообмен с атмосферой в теплый период также не связан с потоками тепла и ТПМ (2я ГК), так как является суммой разнонаправленных потоков, что компенсирует их связи. Также выделяется в отдельный слабый процесс изменчивость скорости ветра в исследуемом регионе.

Таблица 3

Параметры разложения методом главных компонент матриц атмосферных характеристик над акваторией Печорского моря для периода с 1993 г. по 2025 г.

Выделены нагрузки переменных, большие 0,7

Principal component parameters of atmospheric characteristics matrices over the Pechora Sea for the period 1993—2025. Loadings of variables greater than 0.7 are highlighted

Параметр	Холодное полугодие			Теплое полугодие		
	Главные компоненты			Главные компоненты		
	1 ГК	2 ГК	3 ГК	1 ГК	2 ГК	3 ГК
Доля описываемой дисперсии собственными числами, %	54	21	14	52	19	13
<i>Нагрузки переменных в главных компонентах</i>						
Давление (<i>Pa</i>), гПа	-0,10	-0,86	0,22	-0,22	0,05	-0,90
Скорость ветра (<i>W</i>), м/с	0,14	0,25	0,94	-0,41	0,29	0,46
ТПМ, °С	0,91	-0,09	0,02	0,91	-0,21	0,02
Скрытый поток тепла (<i>LE</i>), ТВт	-0,98	0,00	-0,07	-0,94	-0,30	-0,03
Явный поток тепла (<i>F</i>), ТВт	-0,81	0,48	-0,09	-0,74	-0,54	0,11
Длинноволновое излучение (<i>I_{эф}</i>), ТВт	-0,77	-0,23	0,40	-0,94	-0,00	0,01
Радиационный баланс (<i>R</i>), ТВт	0,54	0,72	0,12	0,91	-0,32	-0,01
Суммарный теплообмен с атмосферой (<i>B</i>), ТВт	-0,97	0,22	0,03	0,08	-0,95	0,03

Если рассмотреть корреляции 1й ГК теплого и холодного периода, можно отметить, что процессы теплообмена в холодный период связаны с предыдущим теплым периодом с коэффициентом корреляции 0,77, а с последующим теплым периодом — с коэффициентом корреляции 0,75. С другими сдвигами коэффициент корреляции значительно меньше. Таким образом, тепловое состояние вод региона в конкретное полугодие в определенной степени зависит от его предыдущего состояния, что создает предпосылки для прогноза.

Выше были рассмотрены процессы теплового взаимодействия поверхности Печорского моря с атмосферой. Теперь можно оценить связь этих процессов с адвективной составляющей теплового состояния моря, а также оценить общий тепловой баланс вод Печорского моря. Для этого привлекался ряд так называемого «остаточного тепла», т.е. того, которое остается в море после его адвективного ухода через внешние границы рассматриваемой акватории (см. рис. 1) и вычисленный в работе [9] за период с 1993 г. по 2018 г.

Как отмечалось в работе [9], избыток тепла, поступающего в акваторию Печорского моря вследствие водообмена с соседними регионами в многолетнем усреднении почти полностью компенсируется взаимодействием с атмосферой. Как видно из табл. 4, в среднемноголетнем усреднении это утверждение подтверждается: среднее значение остаточного тепла 1,82 ТВт практически равно среднему общему теплообмену 1,85 ТВт. Однако, если посмотреть внутригодовую и межгодовую структуру потоков (рис. 4), видны значительные различия. Остаточный (адвективный) поток тепла положителен в оба полугодия и имеет небольшую величину (2,76 ТВт в холодный период и 0,85 ТВт — в теплый). Нагрев поверхности летом и её охлаждение зимой значительно превышают адвективную составляющую: в теплый период она составляет 13 % от теплового баланса поверхности и добавляет тепла в теплосодержание бассейна Печорского моря. В холодный период — лишь 28 % суммарной теплоотдачи компенсируется теплом, приходящим с адвекцией.

Таблица 4

Статистические оценки «остаточного» (адвективного) тепла [9] и общего теплообмена в акватории Печорского моря для периода с 1993 г. по 2018 г.
Выделены значимые коэффициенты ($\alpha = 0,05$)

Statistical estimates of the “residual” (advective) heat [9] and the total heat exchange in the Pechora Sea for the period 1993—2018. Significant coefficients are highlighted ($\alpha = 0.05$)

Параметр	Холодное полугодие		Теплое полугодие	
	Среднее	К-т тренда, год ⁻¹	Среднее	К-т тренда, год ⁻¹
«Остаточное» (адвективное) тепло, ТВт [9]	2,76	0,008	0,85	-0,085
Общий теплообмен через поверхность, ТВт	-10,0	-0,132	6,30	-0,015
Тепловой баланс границ бассейна, ТВт	-7,24	-0,126	7,15	-0,100

Если рассматривать в тепловом балансе Печорского моря все границы бассейна (боковые и поверхность), то накопленное в теплый период тепло 7,15 ТВт компенсируется отдачей в следующий холодный период 7,24 ТВт; лишь 0,09 ТВт в среднем уменьшает теплосодержание бассейна моря. Хотя эти средние оценки также не совсем репрезентативны. Как видно из рис. 5, в предполагаемой изменчивости теплосодержания бассейна отмечается значительный тренд. В период с 1993 г. по 2006 г. тепловой баланс был положительный (в среднем 1,5 ТВт), что предполагает теплонакопление. С 2007 г. расход тепла в среднем -1,9 ТВт, т.е. общее охлаждение (различие средних статистически значимо, $\alpha < 0,001$). Это стало возможным из-за значимых трендов уменьшения адвекции тепла течениями в теплый период и усиления теплоотдачи через поверхность в холодный период (см. рис. 4 и табл. 4).

Заключение

Проведенное исследование посвящено оценке вклада атмосферных параметров в тепловой баланс поверхности Печорского моря и их связи с адвективными процессами в море.

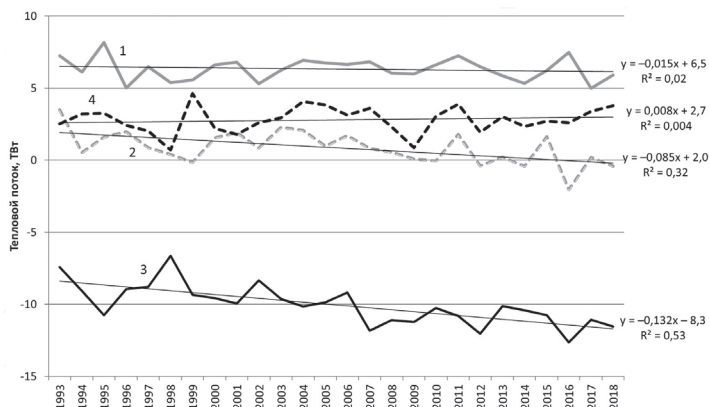


Рис. 4. Межгодовая изменчивость составляющих теплового баланса моря: остаточное (адвективное) тепло (2, 4) [9] и суммарный теплообмен с атмосферой через поверхность акватории (1, 3) для теплого (1, 2) и холодного (3, 4) полугодий и их линейные тренды за период с 1993 г. по 2018 г.

Fig. 4. Interannual variability of sea heat balance components: residual (advective) heat (2, 4) [9] and total atmosphere exchange heat through the surface of the water area (1, 3) for the cold (3, 4) and warm (1, 2) half-years and their linear trends for the period 1993—2018.

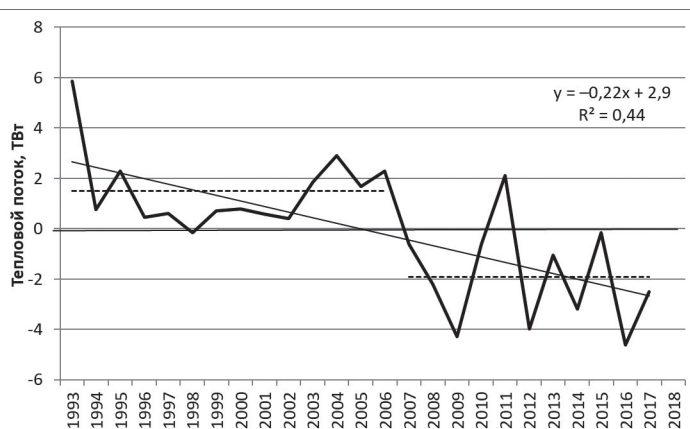


Рис. 5. Межгодовая изменчивость теплового баланса моря на всех границах в сумме: остаточное (адвективное) тепло [9] на боковых границах + суммарный теплообмен с атмосферой через поверхность акватории за год (теплое полугодие и последующее холодное полугодие) и его линейный тренд за период с 1993 г. по 2018 г. Пунктиром показаны средние значения для периодов с 1993 г. по 2006 г. и с 2007 г. по 2018 г.

Fig. 5. Interannual variability of the sea heat balance at all boundaries in total: residual (advective) heat [9] at the lateral boundaries and the total atmosphere heat exchange through the water surface for the year (warm half-year + subsequent cold half-year) and its linear trend for the period 1993—2018. The dotted line shows the average values for the periods 1993—2006 and 2007—2018.

Установлено, что атмосферные условия над акваторией характеризуются пониженным давлением и выраженной сезонной сменой направлений ветра: зимой преобладают потоки с материка, а летом — с соседних морей.

За исследуемый период зафиксированы рост радиационного баланса летом и температуры поверхности воды, сопровождающийся усилением теплоотдачи из моря в атмосферу, особенно в холодное полугодие. В то же время, начиная с середины 2010-х гг., межгодовая изменчивость тепловых потоков демонстрирует признаки стабилизации на новом уровне, когда температура поверхности перестает расти, а ветер ослабевает, что указывает на приостановку потепления в регионе Печорского моря.

Для выявления скрытых физических взаимосвязей был применен анализ главных компонент. Он показал, что основную долю изменчивости определяет процесс теплообмена, напрямую связанный с температурой поверхности. Исключением является радиационный баланс, который отражает эту связь с ТПО только в теплый период. Изменчивость ветра и атмосферного давления выделены как два более слабых физических процесса. Сравнительно высокая статистическая взаимосвязь тепловых потоков поверхности моря во времени позволяет приближенно оценивать тепловое состояние вод региона с заблаговременностью до полугода.

Сопоставление атмосферных процессов с переносом тепла течениями показало, что избыток адвективного тепла почти полностью компенсируется его отдачей в атмосферу. Однако внутригодовая структура этого обмена различна: положительные адвективные потоки в холодный период компенсируют теплоотдачу на 28 %, а в теплый период добавляют тепла на 13 %. Оценка полного теплового баланса выявила смену климатических фаз: если в начале периода теплосодержание моря росло, то в дальнейшем начался этап общего охлаждения акватории из-за уменьшения притока тепла с течениями в теплое полугодие и усиления потерь через поверхность зимой.

Список литературы

1. Писарев С.В. Обзор гидрологических условий Баренцева моря // Система Баренцева моря / Под ред. акад. А. П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 153—166. doi: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(13).
2. Печорское море. Экологический атлас: Научно-популярное издание «Газпром-нефть». СПб: «Галерея Печати», 2018. 144 с.
3. Методы расчёта водных балансов. Международное руководство по исследованиям и практике / Под ред. А. А. Соколова и Т. Г. Чапмена. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 117 с.
4. Калавиччи К. А., Башмачников И. Л. Особенности взаимодействия в системе океан–атмосфера в Баренцевом море по данным реанализов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 175—187. doi: 10.31857/S0002351521020061.
5. Серых И. В., Костяной А. Г. Изменения параметров экстремальных температурных событий западной части Российской Арктики по данным реанализов ERA5 и MERRA-2 в 1980–2022 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69, № 4. С. 464—485. doi: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-464-485.
6. Årthun M., Schrum C. Ocean surface heat flux variability in the Barents Sea // J. Marine Syst. 2010. Vol. 83. No. 1–2. P. 88—98. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.07.003.
7. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. et al. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat // J. Clim. 2012. Vol. 25. No. 13. P. 4736—4743. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.

8. Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г. и др. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО. 2016. 260 с. ISBN: 978-5-86349-215-5.
9. Гордеева С. М., Дешова Д. В. Водный, тепловой и солевой баланс юго-восточной части Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 4. С. 407—420. doi: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-407-420.
10. IFS Documentation CY48R1 — Part IV: Physical Processes. // ECMWF. 2023. 43 p. doi: 10.21957/02054f0fbf.

References

1. Pisarev S. V. Overview of hydrological conditions in the Barents Sea. *Sistema Barentseva moria = Barents Sea system*. Edited by Acad. A.P. Lisitsyna. Moscow: GEOS, 2021: (153—166). doi: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(13). (In Russ.).
2. *Pechora Sea. Ekologicheskij atlas: Nauchno-populyarnoe izdanie «Gazprom-neft'» = Ecological atlas: Popular science publication "Gazprom Neft"*. St. Petersburg: Gallery of Printing, 2018: 144 p. (In Russ.).
3. *Metody raschyota vodnyh balansov. Mezhdunarodnoe rukovodstvo po issledovaniyam i praktike = Methods for water balance computations: an international guide for research and practice*. Edited by Sokolov A. A., Chapman T. G. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976: 117 p. (In Russ.).
4. Kalavichchi K. A., Bashmachnikov I. L. Peculiarities of interaction in the ocean-atmosphere system in the Barents Sea according to reanalysis data. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean*. 2021; 57(2): (175—187). doi: 10.31857/S0002351521020061. (In Russ.).
5. Serykh I. V., Kostianoy A. G. Changes in the parameters of extreme temperature events in the western part of the Russian Arctic according to ERA5 and MERRA-2 reanalyses in 1980—2022. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2023; 69(4): (464—485). doi: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-464-485. (In Russ.).
6. Årthun M., Schrum C. Ocean surface heat flux variability in the Barents Sea. *J. Marine Syst.* 2010; 83(1–2): 88—98. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.07.003.
7. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. et al. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. *J. Clim.* 2012; 25(13): 4736—4743. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.
8. Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G. et al. *Vody Barentseva moria: struktura, tsirkulatsiya, izmenchivost' = Waters of the Barents Sea: structure, circulation, variability*. Murmansk: PINRO. 2016: 260 p. ISBN: 978-5-86349-215-5. (In Russ.).
9. Gordeeva S. M., Deshova D. V. Water, heat and salt balance of the south-eastern part of the Barents Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2023; 69(4): 407—420. doi: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-407-420. (In Russ.).
10. IFS Documentation CY48R1 — Part IV: Physical Processes. ECMWF. 2023: 43 p. doi: 10.21957/02054f0fbf.

Информация об авторах

Дешова Диана Витальевна, ассистент кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, d.deshova@rshu.ru.

Гордеева Светлана Михайловна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, gordeeva@rshu.ru.

Information about authors

Diana Vitalievna Deshova, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Assistant.

Svetlana Mikhailovna Gordeeva, PhD (Geogr. Sci.), Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Associate Professor.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 03.11.2025

Принята к печати после доработки 09.08.2026

The article was received on 03.11.2025

The article was accepted after revision on 09.08.2026