



DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-4](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-4)

EDN <https://elibrary.ru/ilieep>

УДК 551.465.45

© А. А. Соколов\*, 2025

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия,

\*a.sokolov@aari.ru

## Тепломассоперенос через западную границу Баренцева моря по данным реанализа ORAS5

Статья поступила в редакцию 12.08.2025, после доработки 10.11.2025, принята в печать 17.11.2025

### Аннотация

В настоящее время к основным причинам изменчивости ледяного покрова Баренцева моря относят приток атлантических вод. В работе исследован адвективный тепломассоперенос через западную границу Баренцева моря за период 1993–2023 гг. на основании данных реанализа ORAS5. Установлено, что поток тепла через южную часть разреза (о. Медвежий–м. Нордкап) составляет 60 ТВт при переносе объема вод в 2,1 Св. В южной части разреза выделяются три ветви течений с увеличенным потоком тепла. Значимое увеличение тепломассопереноса со временем происходит в южной и центральной ветви, что определяется трендами как в скоростях течения, так и в температуре воды.

Общий поток тепла в бассейн Баренцева моря составляет 61 ТВт и имеет значимый положительный тренд с величиной 0,03 ТВт/мес. Оценка тренда показала, что за 31 год поток тепла в южной части разреза увеличился на 11 ТВт, а в северной части — на 3 ТВт. Таким образом, акцент в переносе тепла в Баренцево море значительно смещен к южной части исследуемого разреза. На основе вейвлет-анализа установлены квази-7-летние синхронные колебания температуры воды и скоростей течений до 2008 г., способствующие росту теплового потока. В 2008–2010 гг. произошёл «слом» тенденции, после чего в 2010–2023 гг. наблюдается их рассинхронизация и стабилизация потока тепла на более низком уровне. Во внутригодовом аспекте южная ветвь потока тепла демонстрирует высокую изменчивость, преимущественно обусловленную течениями, с максимумом зимой и минимумом летом, что связано с сезонной ветровой циркуляцией.

**Ключевые слова:** Баренцево море, атлантические воды, адвективный тепломассоперенос, океанский реанализ

© А. А. Sokolov\*, 2025

Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Berings Str., St. Petersburg, 199397, Russia

\*a.sokolov@aari.ru

## Heat and mass transfer across the western boundary of the Barents Sea based on ORAS5 reanalysis data

Received 12.08.2025, Revised 10.11.2025, Accepted 17.11.2025

### Abstract

Currently, the primary drivers of ice cover variability in the Barents Sea are the influxes of Atlantic water. This study examines advective heat and mass transfer across the western boundary of the Barents Sea over the period 1993–2023, using reanalysis data from ORAS5. The heat flux through the southern segment of the section (from Bear Island to Nordkapp Cape) is estimated at 60 TW, with a volumetric water flux of 2.1 Sv. Three current branches with elevated heat flux are identified in the southern part of the section.

A significant increase in heat and mass transfer over time is observed predominantly in the southern and central branches, correlating with trends in both current velocity and water temperature. The total heat flux into the Barents Sea basin is approximately 61 TW, showing a notable positive trend of 0.03 TW per month. Trend analysis indicates that over the 31-year period, heat

**Ссылка для цитирования:** Соколов А.А. Тепломассоперенос через западную границу Баренцева моря по данным реанализа ORAS5 // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2025. Т. 18, № 4. С. 50–65. EDN ILIEEP.

[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-4](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-4)

**For citation:** Sokolov A.A. Heat and mass transfer across the western boundary of the Barents Sea based on ORAS5 reanalysis data. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(4):50–65. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-4](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-4)

transport in the southern part of the section increased by about 11 TW, while the northern part saw an increase of roughly 3 TW. Consequently, there has been a substantial shift in the spatial distribution of heat transfer toward the southern coastal region of the Barents Sea.

Wavelet analysis revealed quasi-7-year synchronous oscillations in water temperature and current velocity prior to 2008, contributing to an increase in heat flux. A shift in this pattern occurred during 2008–2010, followed by a desynchronization of these parameters from 2010 to 2023, which resulted in the stabilization of heat flux at a lower level. On an intra-annual scale, the southern branch of the heat flux exhibits high variability, driven primarily by current velocity, with a winter maximum and summer minimum associated with seasonal wind circulation patterns.

**Keywords:** Barents Sea, Atlantic waters, advective heat and salt transport, oceanic reanalysis

## 1. Введение

Баренцево море является связующим звеном между Северной Атлантикой и Арктикой, что делает его одним из ключевых регионов для мониторинга климатических процессов. Приток океанических вод тесно связан с изменением морских льдов в Баренцевом море и в Арктике в целом [1]. Ледовитость моря, влияет на экономическую деятельность региона: промысел, навигацию, добычу полезных ископаемых. Адвекция океанического и атмосферного тепла является важнейшей составляющей термического баланса Арктического бассейна. Так, усиленное поступление атлантических вод в Баренцево море оставляет свободной ото льда акваторию в зимний период, что приводит к изменению циркуляции атмосферы и к аномально холодным периодам на европейской территории России и в Западной Европе [2–4]. Поступление тепла через западную границу моря является ключевым внешним фактором, определяющим ледовый режим Баренцева моря [5, 6]. Для обоснованного прогноза ожидаемых изменений в морском ледяном покрове и безопасного ведения хозяйственной деятельности в Баренцевом море необходимо четкое понимание закономерностей внутригодовой и межгодовой изменчивости тепломассопереноса через эту границу.

Основное поступление водных масс, проходящих через западную границу Баренцева моря, широкий пролив между Скандинавским полуостровом и архипелагом Шпицберген, происходит в Норвежском Атлантическом течении, которое в районе северной части Норвегии разделяется на Нордкапское, Мурманское и Норвежское Прибрежное течения (рис. 1) [7]. Эти течения проявляются в виде нескольких струй, о существовании которых упоминается разными исследователями [4, 8–10].

Преобладающим горизонтальным потоком здесь является Нордкапское течение. Это наиболее мощный и устойчивый поток, обуславливающий гидрологический режим моря. Он входит в море с запада и по мере продвижения на восток разделяется на несколько ветвей. Таким образом динамические процессы на западной границе Баренцева моря [11] полностью определяют адвективный перенос тепла на восток, делая его наиболее значимым для исследуемого региона.

Оценки горизонтальных потоков тепла в регионе Баренцева моря рассматриваются в многочисленных научных исследованиях [1, 4, 8–10, 12, 13]. В работах различных исследователей средний суммарный расход воды через западную границу Баренцева моря варьируется от 2 до 4 Св [1, 9, 12, 14], также во многих работах исследуется разрез (71,6–73°с.ш.), где расход воды составляет в среднем 2 Св [8, 10, 11]. В зависимости от конфигурации разрезов и временного промежутка поток тепла изменяется от 50 до 120 ТВт [1, 8, 9, 11, 12, 14]. Поток соли в среднем составляет  $114 \times 10^3$  кг/с [9] в зависимости от конфигурации разреза и начальной точки отсчета.

Проблема потепления Арктики и влияние атлантических вод на Баренцево море обсуждается с начала прошлого века (например, [15]) и до сих пор окончательно не решена. Актуальность данного исследования обусловлена ключевой ролью Баренцева моря в процессе ускоренного потепления Арктики по сравнению с другими регионами Северного полушария, что подтверждено в ряде предыдущих работ [10, 11, 14], а также уточнением на период 1993–2023 г. межгодовой и сезонной изменчивости адвекции на стандартном вековом разрезе в западной части Баренцева моря (м. Нордкап–о. Медвежий–м. Серкап [16]), который является основным для оценки переноса тепла в Баренцева моря, преимущественно в южной его части.

Данная статья является развитием работы, представленной в [12]. Помимо скорректированного положения разреза, здесь был применен улучшенный метод расчета адвективных тепломассопереносов, использован обновленный ряд данных ORAS5 за период с 1993 по 2023 гг. и значительно расширена дискуссионная часть.

## 2. Методика исследования

Для целей исследования использован массив данных ORAS5 (Ocean Reanalysis System 5), который представляет собой глобальный океанский реанализ, разработанный Европейским центром среднесрочных

прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF [17]. Он представляет собой согласованный набор данных о состоянии океана за период с 1979 г. по настоящее время. В основе ORAS5 лежит океанская модель NEMO с системой ассимиляции наблюдений 3D-Var FGAT, что обеспечивает высокую точность восстановления параметров океана. Реанализ включает данные о температуре, солёности, течениях, уровне моря и морском льде, объединяя спутниковые, буйковые и другие наблюдения. ORAS5 широко используется для изучения изменчивости океана, климатических тенденций и взаимодействий океан–атмосфера. Данный массив был выбран на основе выводов статьи [18], в которой был проведен сравнительный анализ результатов расчета теплосодержания вод и теплопереносов в Северной Атлантике по пяти океанским реанализам, и сделано заключение, что ORAS5 наиболее точно описывает долговременную изменчивость исследуемых величин.

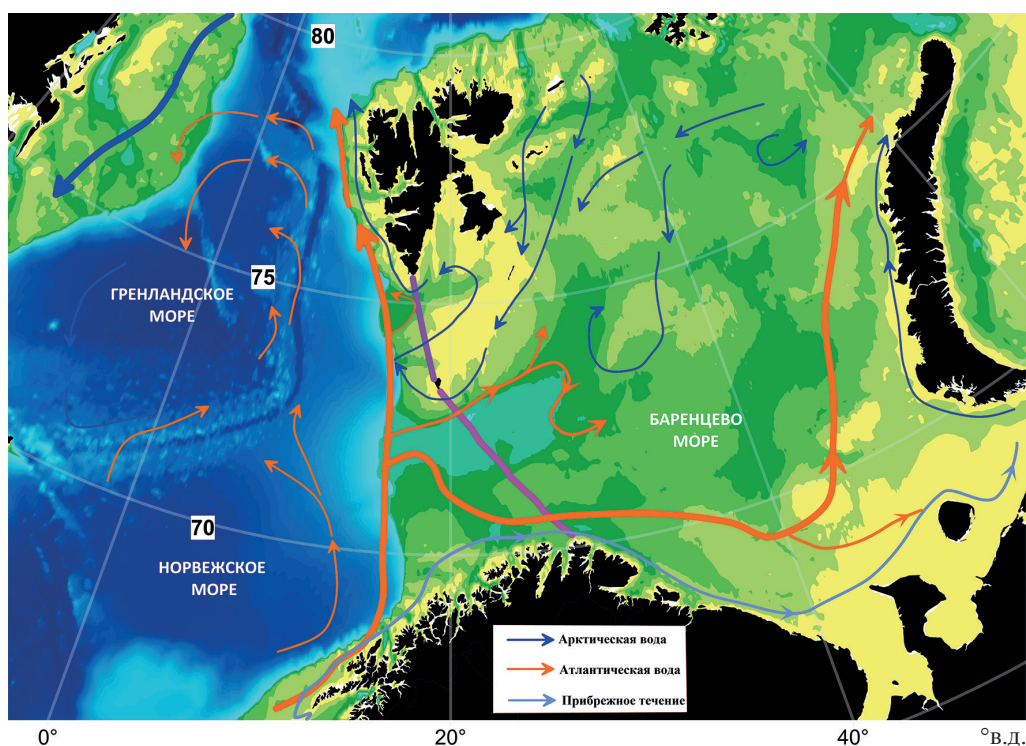
Данные ORAS5 находятся в открытом доступе и включены в массив Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis разработанным Copernicus Marine Environment Service (CMEMS) [19].

Из массива CMEMS были извлечены данные ORAS5 за период с 1993 по 2023 гг. для близкого к меридиональному разреза, проходящего по западной границе Баренцева моря:

- южная часть разреза, о. Медвежий — м. Нордкап (71,25°с.ш., 27,5°в.д. и 74,25°с.ш., 19,25°в.д.);
- северная часть разреза, о. Медвежий — м. Сёркап (74,25°с.ш., 18,75°в.д. и 76,5°с.ш., 16,75°в.д.).

Конфигурация разреза, через который вычислялись значения теплопереносов, представлена на рис. 1 розовой и фиолетовой линиями.

В набор необходимых для данного исследования параметров вошли среднемесячные значения потенциальной температуры, практической солёности и компонент скорости течений для всей толщи вод.



**Рис. 1.** Пространственное расположение меридионального разреза (71,25°с.ш., 27,5°в.д. и 76,5°с.ш., 16,5°в.д.), разделенного на 2 отрезка. Темно-красная линия — южная часть (71,25°с.ш., 27,5°в.д. и 74,25°с.ш., 19,25°в.д.), фиолетовая линия — северная часть (74,25°с.ш., 18,75°в.д. и 76,5°с.ш., 16,75°в.д.). Стрелками показана схема распространения атлантических (оранжевыми) и арктических (синими) вод, голубой линией показано прибрежное течение, по [20]. Топографическая подложка — GEBCO 2024 [21]

**Fig. 1.** Spatial layout of the meridional transect (71,25°N, 27,5°E and 76,5°N, 16,5°E), divided into two segments. The pink line indicates the southern part (71,25°N, 27,5°E and 74,25°N, 19,25°E), while the dark red line represents the northern part (74,25°N, 18,75°E and 76,5°N, 16,75°E). Arrows depict the pathways of Atlantic (orange) and Arctic (blue) waters, the light blue line shows the coastal current, as referenced in [20]. The bathymetric background is based on GEBCO 2024 [21]

Для расчета потоков объема, тепла и соли был применен алгоритм, описанный в [22] подобный расчету тепломассопереносов через пролив Фрама. В качестве отсчетных значений, необходимых при вычислении потоков тепла и соли, были взяты значения температуры и солёности, традиционно применяемые для подобных оценок в СЛО:  $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $34,8\text{ ЕПС}$  [23, 24].

Для анализа взаимодействия океана и атмосферы в регионе исследования были использованы среднемесячные значения компонентов скорости ветра из атмосферного реанализа NCEP/DOE Reanalysis II за 1980–2020 гг. [25].

### 3. Результаты исследования

В настоящей работе для каждой вертикальной ячейки сетки меридионального разреза были рассчитаны среднемноголетние значения температуры воды, скоростей течений, солёности, а также потоков тепла и соли (рис. 2).

Как видно из рис. 2, температура приповерхностных вод, втекающих в Баренцево море, составляет  $4\text{--}7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Среднемноголетнее распределение температуры воды уменьшается с юга на север с максимальными значениями в южной и центральной частях меридионального разреза, а минимальными — в северной. Наибольшая положительная температура наблюдается в верхних слоях с максимумом до  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На Медвежинско–Надеждинской возвышенности (МНВ) отмечаются минимальные значения температуры воды верхних слоев, с минимальной температурой до  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 2, а).

В южной части разреза среднемноголетняя скорость течения определяется Мурманским и Нордкапским течениями, а в северной — Медвежинским и Зюйдкапским течениями. Так, скорости течений восточного направления отмечаются в южной части разреза, слабое противотечение западного направления прослеживаются в широтной зоне  $74,25\text{--}75,75^{\circ}\text{с.ш.}$ , также происходит смена знака течений в Зюйдкапском желобе, после чего преобладают скорости восточного направления с максимумом  $0,04\text{ м/с}$  в верхних слоях (рис. 2, б).

Среднемноголетняя солёность воды на разрезе составляет около  $34,92\text{ ЕПС}$ . Более распресненные слои отмечаются у южной оконечности архипелага Шпицберген. Наибольшие значения солёности отмечаются на краю центральной части котловины с максимумом  $35,08\text{ ЕПС}$  на горизонте  $250\text{ м}$  (рис. 2, в).

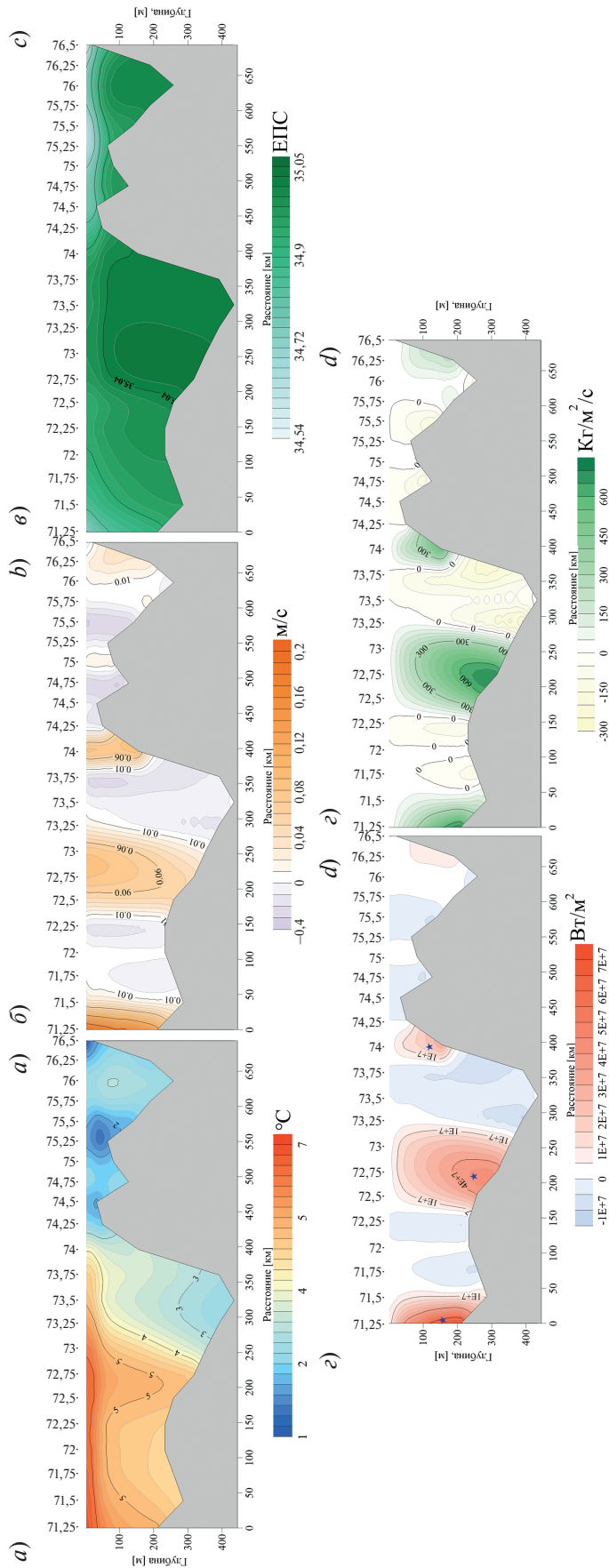
В части разреза Скандинавский п-ов — о. Медвежий в структуре потока тепла выделяются 3 ветви: южная  $71,25\text{--}71,5^{\circ}\text{с.ш.}$ , центральная  $72,5\text{--}73,25^{\circ}\text{с.ш.}$  и северная  $73,75\text{--}74,25^{\circ}\text{с.ш.}$  (рис. 2, г).

Южная ветвь потока соответствует Мурманскому течению, находится у побережья Норвегии, в Нордкапской возвышенности и Финмаркенской равнине ( $71,25\text{--}71,5^{\circ}\text{с.ш.}$ ), и распространяется до дна. Максимальное значение потока достигает  $7,37 \times 10^7\text{ Вт/м}^2$  в слое  $120\text{--}200\text{ м}$ . Второй, центральный поток (Нордкапское течение,  $72,5\text{--}73,25^{\circ}\text{с.ш.}$ ), распространяется вдоль южного склона Западного желоба и достигает глубины  $320\text{ м}$  с максимальной интенсивностью  $-4,2 \times 10^7\text{ Вт/м}^2$  на горизонте  $290\text{ м}$ . Третья ветвь потока тепла (холодное Медвежинское или Возвратное течение) расположена в северной части желоба  $73,75\text{--}74,25^{\circ}\text{с.ш.}$ , с глубиной распространения до  $250\text{ м}$  с максимумом  $3,81 \times 10^7\text{ Вт/м}^2$  на глубине  $210\text{ м}$ .

Поступление соли в Баренцево море происходит схоже с поступлением тепла (рис. 2, д). Поток соли с Мурманским течением распространяется до  $290\text{ м}$ . Максимальное значение потока достигает  $157\text{ кг/м}^2/\text{с}$  на горизонте  $260\text{ м}$ . Второй, центральный поток, распространяется вдоль южного склона Западного желоба и достигает глубины  $320\text{ м}$  с максимальной интенсивностью  $699\text{ кг/м}^2/\text{с}$  на горизонте  $290\text{ м}$ . Поток соли с Медвежинским течением расположен в северной части желоба, с максимальной интенсивностью  $610\text{ кг/м}^2/\text{с}$  на глубине  $210\text{ м}$ .

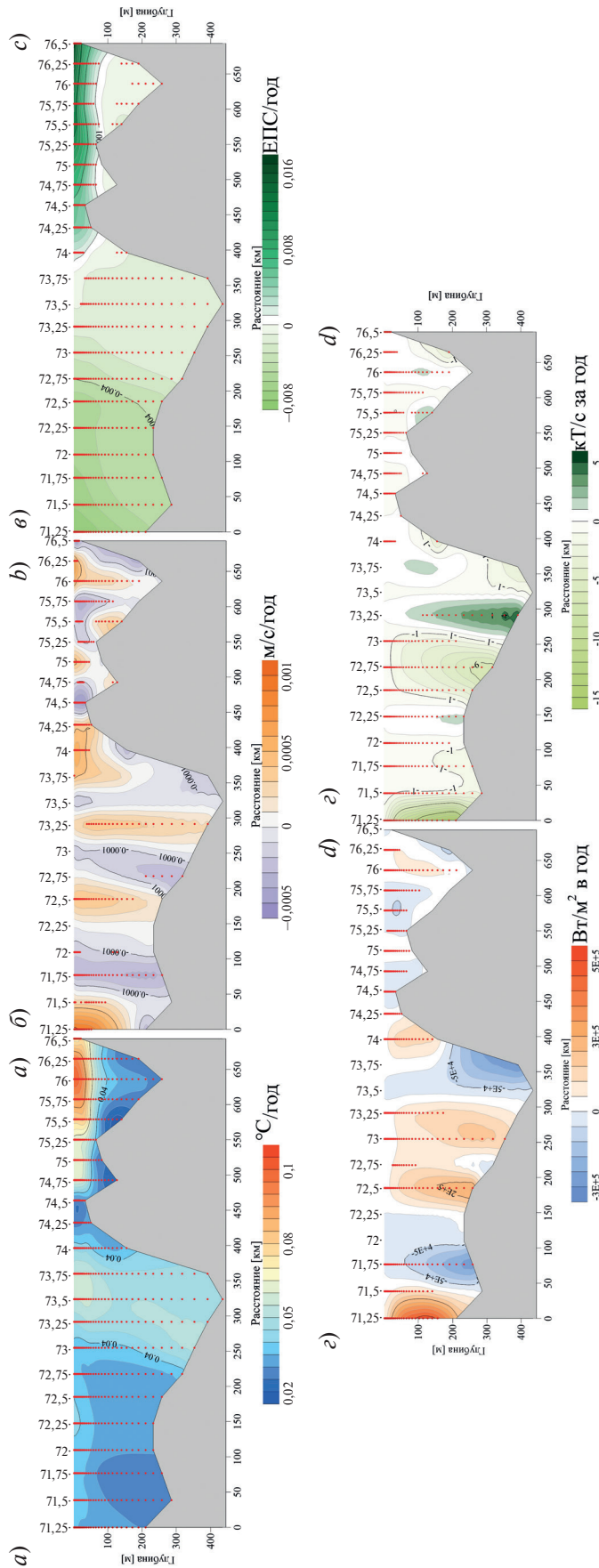
Таким образом, в южной части разреза выделяются три основные ветви переноса тепла и солёности, ориентированные преимущественно в восточном направлении. Тепло- и массоперенос в пределах Мурманского и Нордкапского течений определяется как вертикальным распределением температуры воды, так и характером горизонтальной циркуляции. В то же время в районе Медвежинского течения ключевым фактором, обуславливающим транспорт тепла и солей, выступает пространственное распределение скоростей течения (рис. 2, а и б).

Чтобы проследить временную изменчивость каждой характеристики для каждой вертикальной ячейки разреза, были сделаны оценки тренда по среднемесячным данным за период с 1993 по 2023 г. (рис. 3). На южной части меридионального разреза значимые тренды присутствуют для всех рассмотренных ветвей потока, положение которых было выявлено по среднемноголетним данным. Значительное усиление потока со временем происходит для всех ветвей.



**Рис. 2.** Распределение среднесезонных характеристик на меридиональном разрезе за период с 1993 по 2023 гг.: *a* — температура воды (°C); *b* — солесность (ЕПС); *c* — тепловый поток (Вт/м<sup>2</sup>); *d* — поток соли (кг/м<sup>2</sup>/с). Звёздочками выделены ядра отдельных ветвей потока тепла (Вт) (*e*): южного (27,5° в.д., 71,25° с.ш.) на глубине 115 м., центрального (23,5° в.д., 72,75° с.ш.) на глубине 286 м., северного (20,0° в.д., 74,0° с.ш.) на глубине 155 м, к югу от о-ва Медвежий

**Fig. 2.** Distribution of mean annual characteristics along the meridional transect for the period from 1993 to 2023: *a* — water temperature (°C); *b* — current velocity (m/s); *c* — salinity (PSU); *d* — heat flux (W/m<sup>2</sup>); *e* — salt flux (kg/m<sup>2</sup>/s). Asterisks highlight the cores of individual heat flux branches (W): the southern branch at 27,5°E, 71,25°N, at a depth of 115 m; the central branch at 23,5°E, 72,75°N, at a depth of 286 m; and the northern branch at 20,0°E, 74,0°N, located south of Medvezhiy Island



**Рис. 3.** Распределение среднесезонных характеристик на меридиональном разрезе за период с 1993 по 2023 год: *a* — величина тренда температуры воды  $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ; *b* — величина тренда скорости течений  $\text{м}/\text{с}$  в год; *в* — величина тренда солёности, ЕПС/год; *г* — величина тренда теплового потока  $\text{Вт}/\text{м}^2$  в год; *д* — величина тренда солёности, величина тренда  $\text{кг}/\text{м}^2/\text{с}$  в год. Красными точками указаны значимые коэффициенты тренда

**Fig. 3.** Distribution of mean annual trend characteristics along the meridional transect for the period from 1993 to 2023: *a* — water temperature trend ( $^{\circ}\text{C}/\text{year}$ ); *b* — current velocity trend ( $\text{m}/\text{s}$  per year); *c* — salinity trend ( $\text{PSU}/\text{year}$ ); *d* — heat flux trend ( $\text{W}/\text{m}^2$  per year); *e* — salt flux trend ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$  per year). Significant trend coefficients are indicated by red dots

Максимальное значение тренда наблюдается на глубине 100 м в области Мурманского течения и составляет  $9,3 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Формирование тенденций изменения теплового потока в зонах Мурманского и Нордкапского течений определяется, главным образом, изменениями в скоростной структуре течений и температуре воды. В районе Мурманского течения в приповерхностном слое фиксируется положительный тренд скорости течения, указывающий на его интенсификацию, тогда как в глубинном слое (ниже 180 м) наблюдается его ослабление. Эти изменения согласуются с вертикальным распределением трендов теплового потока (рис. 3, б и г).

Для Нордкапского и Медвежинского течений в южной части меридионального разреза также зафиксированы статистически значимые положительные тренды в скорости течений (рис. 3, б). Что касается потока соли, значимые тренды выявлены для всех трёх ветвей. В зоне Мурманского течения наблюдается отрицательный тренд солёности, указывающий на процессы опреснения (рис. 3, в и д).

Все характеристики, определяющие тепломассопереносы, были проинтегрированы от поверхности до дна. В табл. 1 представлены статистические параметры интегральных для каждой струи характеристик потоков и средневзвешенные оценки температуры и солёности воды.

Как видно из табл. 1, ветви восточного направления расположены в южной части разреза. Преобладающим потоком воды, проходящим через меридиональный разрез в Баренцево моря, является Норвежское течение, перенос воды в котором достигает 3,04 Св, в северной части разреза (о. Медвежий — м. Сёркап) поток воды намного меньше (0,3 Св). Общий сток воды из Баренцева моря составляет 1,2 Св. В целом средний многолетний расход воды через меридиональный разрез в бассейн Баренцева моря за 31 год составляет 2,1 Св. По инструментальным оценкам [26] (август 1997–август 1998 г.) получены похожие результаты: оценки переноса составили 3,1 Св притока и около 1,2 Св рециркуляции.

Значимый положительный тренд в среднемесячной изменчивости расходов воды (при уровне значимости 5 %) не выявлен, что говорит о незначительном изменении со временем. По оценкам тренда оказалось, что за 31 год поток воды, проходящий через южную часть разреза, увеличился на 0,10 Св, а через северную на 0,02 Св. В целом поток воды через меридиональный разрез увеличился на 0,12 Св.

Из табл. 1 видно, что средняя по вертикали температура воды закономерно уменьшается от юга к северу от 4,4 до 2,2 °С и имеет значимый тренд по всему разрезу 0,003 °С/мес. За период с 1993 по 2023 г. в южной части разреза отмечается мощный среднемноголетний поток тепла (60 ТВт), сравнимый с общим потоком. Соответственный поток тепла в северной части значительно меньше (2 ТВт). Тренд в потоке тепла определяется соответствующими трендами во временной изменчивости скоростей течений и температуры воды, а также опосредованно, трендом в солёности воды, отрицательная величина которого увеличивает температуру замерзания и уменьшает плотность морской воды [8].

Среднемноголетний поток соли через меридиональный разрез в бассейн Баренцева моря составляет 0,9 кТ/с, за 31 год он уменьшился на 0,15 кТ/с и имеет значимый отрицательный тренд  $-0,0004$  кТ/мес. Солёность в северной части разреза ниже, чем в южной: 34,87 и 34,99 ЕПС соответственно. Отрицательный тренд солёности в южной части разреза показывает опреснение на  $-0,0002$  ЕПС/мес, а в северной части, напротив — осолонение на  $0,0004$  ЕПС/мес.

Таблица 1

Table 1

Статистические характеристики интегральных потоков массы, тепла и соли, а также средневзвешенных значений температуры и солёности воды в южной, центральной и северной широтных зонах меридионального разреза по 16,5° в.д. (69–76° с.ш.), среднемесячных за период 1993–2023 гг. (Расход — Св, Поток тепла — ТВт и Поток соли — кТ/с)

Statistical characteristics of the integrated mass, heat, and salt fluxes, as well as the area-averaged values of water temperature and salinity in the southern, central, and northern latitudinal zones of the meridional transect at 16.5° E (from 69° to 76° N), for the monthly period from 1993 to 2023 (Flow rate — Sv, heat flux — TW, salt flux — kt/s)

Разрез	Стат. характеристики	Расход, Св			Поток тепла, ТВт			Поток соли, кТ/с			Температура воды, °С	Солёность, ЕПС
		сумм.	+	–	сумм.	+	–	сумм.	+	–		
1	$\bar{x}$	2,12	3,37	–1,25	61,49	87,08	–25,59	0,90	1,37	–0,47	3,56	34,95
	$\sigma$	0,72	0,72	0,38	18,81	20,18	8,84	0,33	0,34	0,17	0,91	0,06
	R2	0,002	0,003	2,1E-05	0,03	0,07	0,06	0,02	0,03	0,006	0,16	0,001
	а, месяц-1	3E-04	3,5E-04	–2E-05	<b>0,03</b>	<b>0,05</b>	<b>–0,02</b>	<b>–4E-04</b>	<b>–5,3E-04</b>	1,2E-04	<b>0,003</b>	–2E-05
2	$\bar{x}$	0,08	0,32	–0,24	2,44	6,22	–3,78	0,06	0,12	–0,07	2,19	34,87

Разрез	Стат. хар-ки	Расход, Св			Поток тепла, ТВт			Поток соли, кТ/с			Температура воды, °С	Соленость, ЕПС
		сумм.	+	-	сумм.	+	-	сумм.	+	-		
2	$\sigma$	0,17	0,16	0,10	3,19	3,42	1,92	0,06	0,07	0,03	1,37	0,11
	R2	0,002	0,0004	0,003	0,004	0,03	0,03	0,002	0,004	0,003	0,10	0,12
	a, месяц <sup>-1</sup>	7,3E-05	2,7E-05	4,6E-05	0,002	<b>0,005</b>	<b>-0,003</b>	2,2E-05	4,01E-05	-2E-05	<b>0,004</b>	<b>3,7E-04</b>
3	$\bar{x}$	2,11	3,04	-0,93	60,24	80,79	-20,55	0,86	1,24	-0,38	4,36	34,99
	$\sigma$	0,70	0,65	0,38	18,19	18,48	8,33	0,32	0,31	0,17	0,69	0,05
	R2	0,002	0,003	0,0002	0,03	0,07	0,04	0,02	0,04	0,01	0,23	0,22
	a, месяц <sup>-1</sup>	2,8E-04	3,2E-04	-4,7E-05	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>-0,02</b>	<b>-4,1E-04</b>	<b>-5,7E-04</b>	1,5E-04	<b>0,003</b>	<b>-2,4E-04</b>

Примечания. Разрез 1 — весь разрез, разрез 2 — часть разреза 1 к северу от о-ва Медвежий, разрез 3 — часть разреза 1 к югу от о-ва Медвежий (рис. 1).

\*Положительные и отрицательные значения рассчитанных характеристик определяют направления потока массы и тепла через меридиональный разрез. R<sup>2</sup> — коэффициент детерминации линейного тренда; a — коэффициент тренда. Жирным шрифтом выделены значимые (при 5 %) коэффициенты тренда.

Для полного понимания изменений теплового потока во времени был рассмотрен его тренд для всего меридионального разреза. По оценкам тренда оказалось, что за 31 год общий поток тепла, проходящий через разрез, увеличился на 11 ТВт. В южной части поток увеличился на 10 ТВт. Среднегоголетний поток тепла через весь исследуемый разрез составляет 61 ТВт. Тренд по среднемесячным значениям положительный и значимый (0,03 ТВт/мес). Поток тепла через меридиональный разрез, практически полностью определяется скоростью течений (коэффициент корреляции составил  $r = 0,80$ , для температуры  $r = 0,24$ ).

На рис. 4 представлен среднемесячный поток тепла через меридиональный разрез с фильтром скользящего среднего (окно 11 мес.). Очевидное увеличение потока тепла происходит с 1993 по 2008 г., после чего наблюдается значимое локальное ослабление потока до 2010 г., далее происходит его стабилизация (рис. 4).

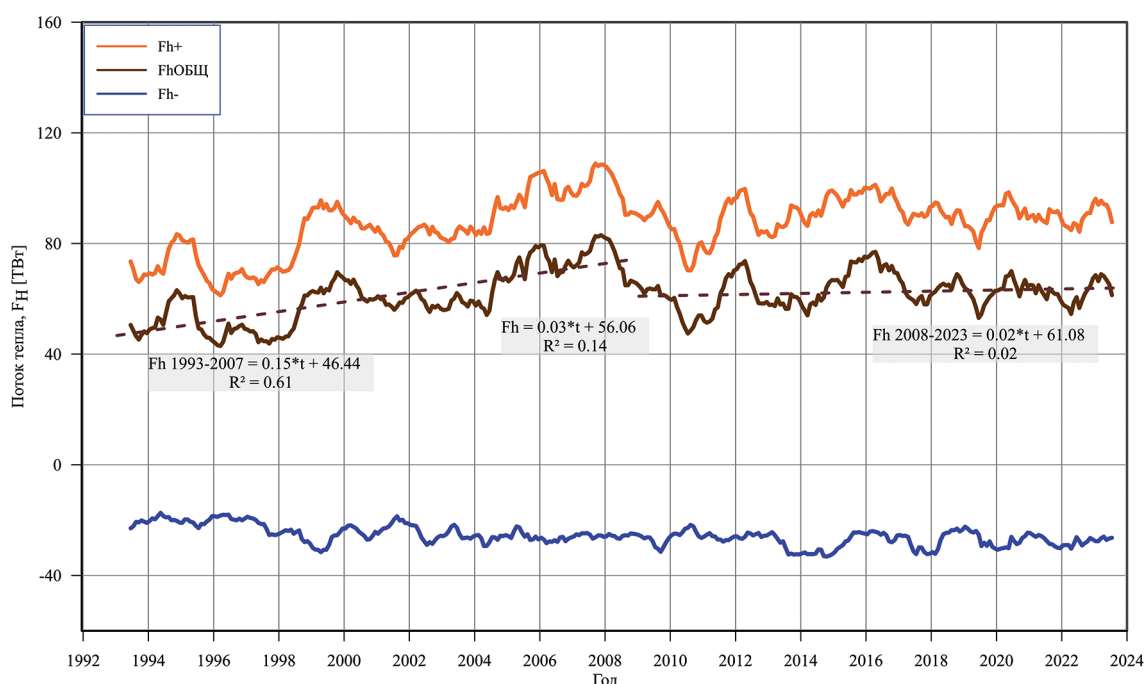
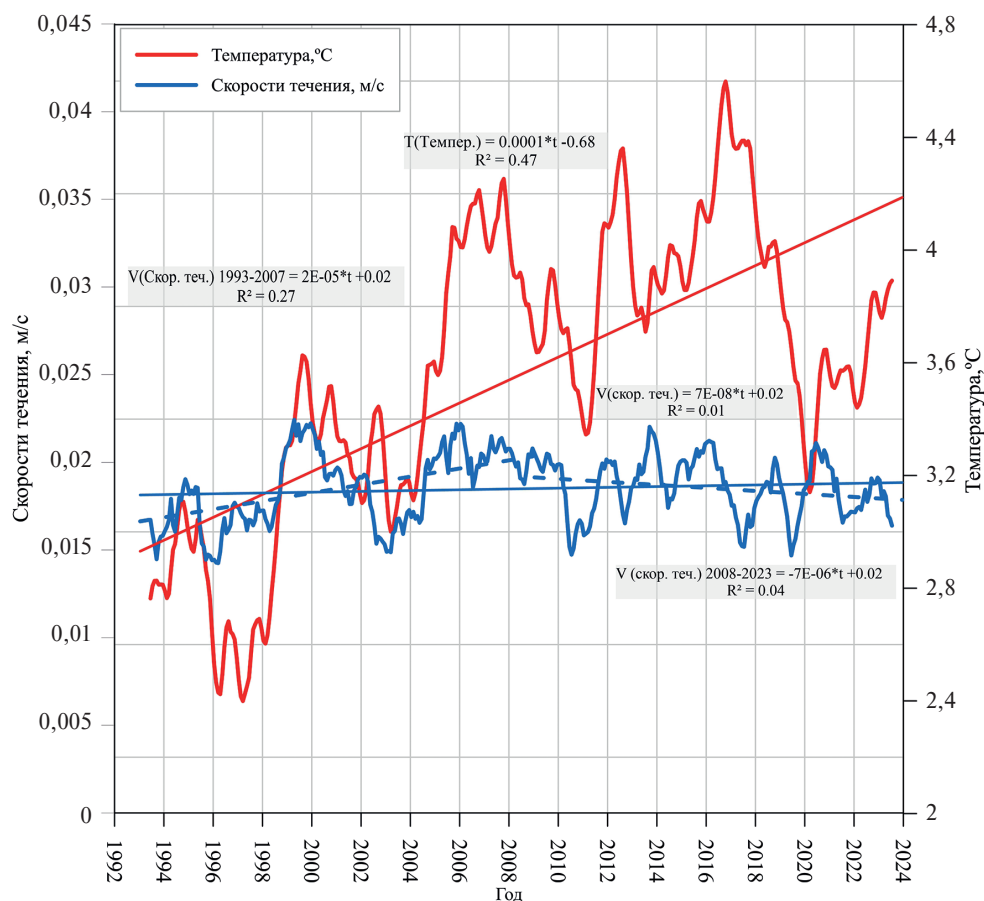


Рис. 4. Среднемесячный поток тепла (Fh, ТВт) через меридиональный разрез за период с 1993 по 2023 год с фильтром скользящего среднего (окно 11 мес). Fh+ — поступление потока тепла, Fh- — сток потока тепла, FhОБЩ — суммарный поток тепла; прямые линии — линейный тренд за весь период, пунктирные линии — локальные тренды

Fig. 4. Monthly heat flux through the meridional transect for the period from 1993 to 2023 (TW), smoothed using a moving average filter with an 11-month window. Fh+ — heat inflow, Fh- — heat outflow, FhTOTAL — total heat flux; solid lines indicate the linear trend over the entire period, while dashed lines represent local trends

Для выявления причин такой изменчивости рассмотрены отдельно компоненты теплового потока с фильтром скользящего среднего с окном 11 мес. (рис. 5). По графикам видно, что до 2008 г. оба компонента практически синхронны ( $r = 0,78$ ), имеют одинаковый положительный тренд, и их произведение определяет возрастающий тепловой поток в этот период времени. После 2008 г. изменчивость компонентов рассинхронизируется ( $r = 0,12$ ) и скорости течения ослабевают, что при возрастающей температуре воды вызывает стабилизацию потока тепла после.



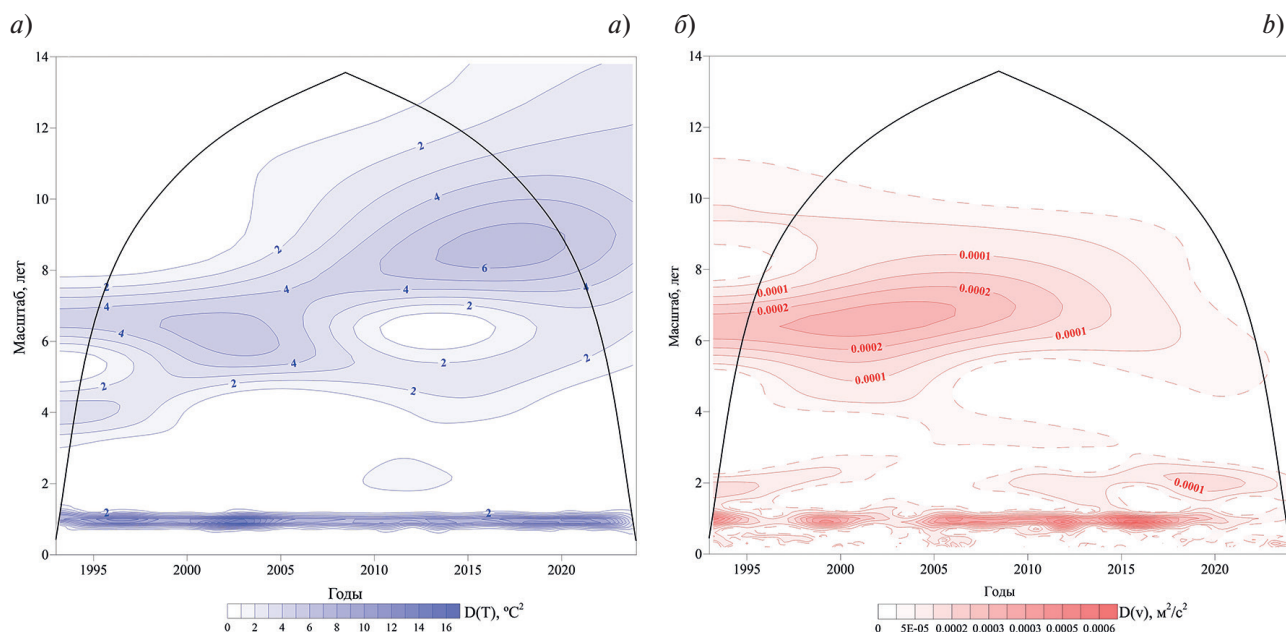
**Рис. 5.** Временная изменчивости скоростей течения (м/с) и температуры воды (°С) с фильтром скользящего среднего (окно 11 мес.). Прямые линии — линейный тренд за весь период, пунктирные линии — локальные тренды

**Fig. 5.** Temporal variability of current velocities (m/s) and water temperature (°C), smoothed using a moving average filter with an 11-month window. Solid lines indicate the linear trend over the entire period, while dashed lines represent local trends

Для более подробного анализа изменчивости компонентов теплового потока для среднемесячных рядов усредненных по разрезу значений температуры воды и скоростей течений был проведен вейвлет-анализ с вейвлетом Морле 6 [27]. Распределение квадратов вейвлет-коэффициентов, характеризующих дисперсию временной изменчивости на различных периодах в разное время представлено на рис. 6.

В высокочастотной области хорошо выделяется годовой цикл. Как видно из рис. 6, практически до 2004 г. в изменчивости обеих характеристик преобладал квази-7-летний период. Позже скорость течения сохранила свою структуру на весь исследуемый период, немного ослабев после 2014 г. и увеличив частоту до квази-4-летнего периода. Энергия же колебаний температуры воды после 2004 г. перешла в более низкочастотную область с квази-9-летним периодом, и усилившись к 2016 г., и более слабое колебание с квази-4-летним периодом.

Таким образом, 2008 г. можно считать моментом, когда наиболее ярко проявились различия в колебаниях компонентов теплового потока, которые видны и на рис. 5: если до 2008 г. они изменялись практически синхронно, усиливая друг друга и тепловой поток, то после этого времени, они стали изменяться принципиально по-разному и тепловой поток стабилизировался на некотором среднем уровне.



**Рис. 6.** Распределение дисперсии колебаний на периодах 3–10 лет по коэффициентам вейвлет–разложения среднемесячных рядов: *a* — температуры воды ( $^{\circ}\text{C}^2$ ) (синие линии), *b* — скорости течения ( $\text{m}^2/\text{c}^2$ ) (красные линии) усредненных в целом по меридиональному разрезу в западной части Баренцева моря

**Fig. 6.** Distribution of variance of fluctuations over periods of 3–10 years based on wavelet decomposition coefficients of the monthly mean series: *a* — water temperature variance ( $^{\circ}\text{C}^2$ ) (blue lines), *b* — current velocity variance ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) (red lines). The data are averaged across the entire meridional transect in the western part of the Barents Sea

Такие изменения в климатической системе Баренцева моря после 2007 г. можно, вслед за авторами [28], связать с окончанием второй эпохи потепления, основанной на 60-летнем климатическом цикле, а также с переменной типа основной атмосферной циркуляции с широтной на меридиональную [29]. Кроме того необходимо отметить, что и на рисунке 4 ярко виден «слом» тенденции в 2008–2010 гг., что предшествует экстремальным погодным явлениями летом 2010 г., особенно в России [30, 31].

Для полного представления о временной изменчивости потока тепла в южной части меридионального разреза по максимумам значений были выбраны 3 основных ядра ветвей потока тепла на различных горизонтах и рассчитаны их временные серии (рис. 7). Нужно отметить, что ветви потока тепла совпадают со струями, которые были выделены по наблюдениям в работе [24]. Характеристики внутригодовой изменчивости составляющих трех ядер характеристик представлены в табл. 2. Самый мощный поток

Таблица 2

Table 2

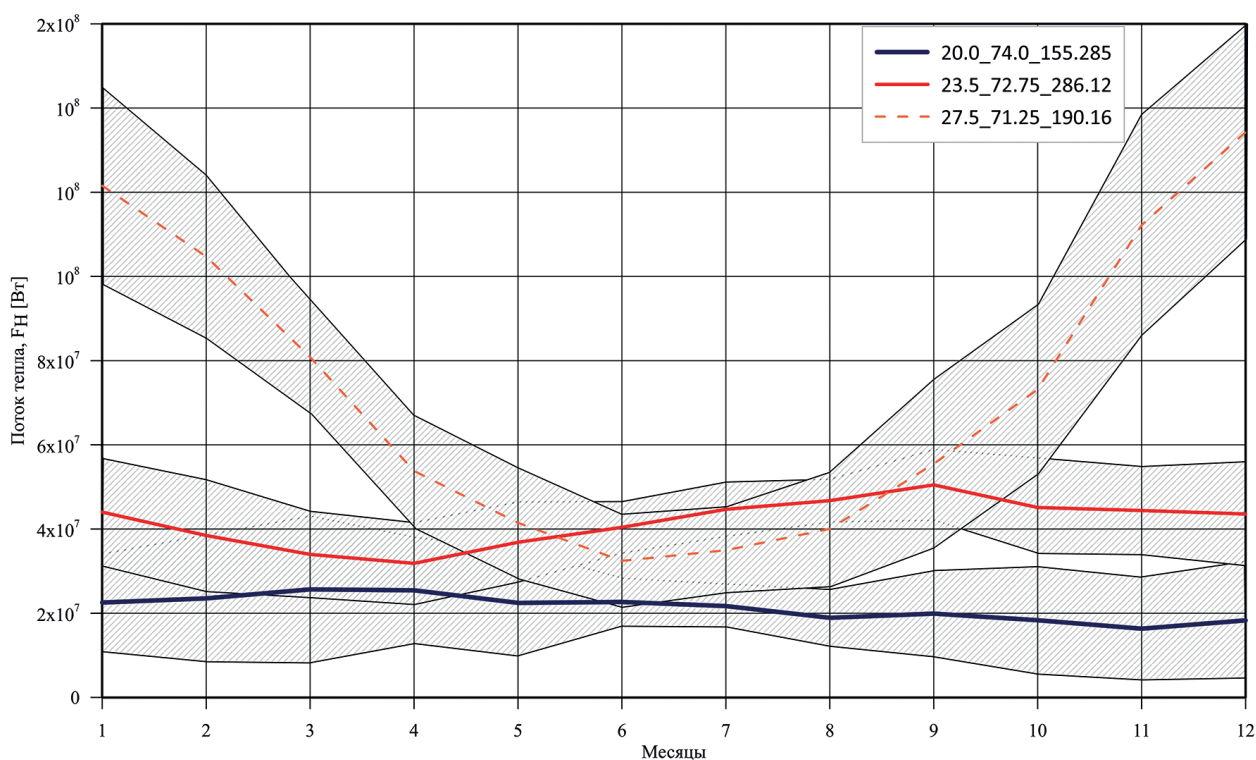
**Внутригодовая изменчивость среднемесячных характеристик в ядрах потоков тепла в южной части меридионального разреза, за период 1993–2023 гг.**

**Intra-annual variability of the monthly mean characteristics within the heat flux cores in the southern part of the meridional transect for the period from 1993 to 2023**

Расположение ядер потоков тепла	Характеристики			
	Размах	Среднее значение	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации (СКО/среднее)
Скорость течений, м/с				
(27,5°в.д., 71,25°с.ш.) 190 м	0,15	0,13	0,06	0,46
(23,5°в.д., 72,75°с.ш.) 286 м	0,02	0,05	0,006	0,01
(20,0°в.д., 74,0°с.ш.) 155 м	0,05	0,09	0,02	0,22
Температура воды, $^{\circ}\text{C}$				
(27,5°в.д., 71,25°с.ш.) 190 м	2,35	5,08	0,8	0,16
(23,5°в.д., 72,75°с.ш.) 286 м	0,68	4,82	0,07	0,01
(20,0°в.д., 74,0мс.ш.) 155 м	1,01	3,46	0,39	0,11

тепла отмечается в южном ядре, об этом свидетельствуют значения скоростей течений и температуры воды, по сравнению с остальными ядрами потока. Дисперсия годового хода температуры воды через южную часть разреза велика: перепад значений от максимума в сентябре до минимума в апреле составляет 2,4 °С. Степень внутригодовой изменчивости скоростей течений определяется коэффициентом вариации, которая в 3 раза выше, чем у температуры воды. В ядре южной ветви потока тепла размах колебаний в 3–7 раз выше, чем в ядрах центральной и северной струй потока тепла.

Внутригодовое распределение поступления потока тепла из Норвежского моря неравномерно. Как видно из рис. 7, на меридиональном разрезе для ядра южной ветви потока тепла прослеживается годовая гармоника, также можно отметить, что в центральной и южной ветвях потока тепла внутригодовая изменчивость находится в противофазе: наибольшая интенсивность в ядре южной ветви потока приходится на зимние месяцы декабрь/январь, минимум на летние месяцы. Максимум потока приходится на январь и в среднем составляет  $1,3 \times 10^8 \pm 2,3 \times 10^7$  Вт, а минимум — на июнь —  $3,2 \times 10^8 \pm 24$  Вт; средняя за год величина —  $7,4 \times 10^7 \pm 1,7 \times 10^7$  Вт. Центральный поток менее интенсивен. Максимум потока в сентябре —  $5,05 \times 10^7 \pm 8,5 \times 10^6$  Вт, а минимум в апреле —  $3,2 \times 10^7 \pm 9,7 \times 10^6$  Вт; средняя за год величина —  $4,2 \times 10^7 \pm 9,6 \times 10^6$  Вт.



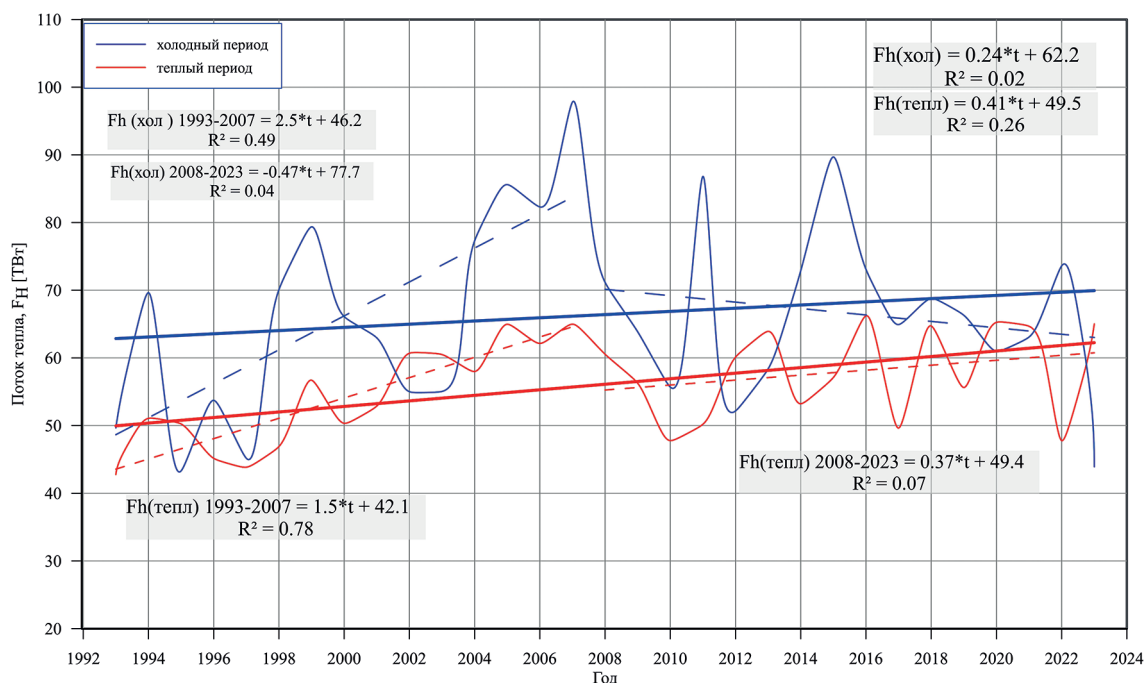
**Рис. 7.** Внутригодовой ход временных серий потока тепла в ядрах отдельных ветвей (Вт): 1 — южного (27,5° в. д., 71,25° с. ш.) на глубине 115 м., 2 — центрального (23,5° в. д., 72,75° с. ш.) на глубине 286 м., 3 — северного (20,0° в. д., 72,75° с. ш.) на глубине 155 м. В южной части меридионального разреза (71,25° с. ш., 27,5° в. д. и 74,25° с. ш., 19,25° в. д.) за период 1993–2023 гг. (штриховкой выделен диапазон стандартного отклонения)

**Fig. 7.** Intra-annual variation of the heat flux time series within the cores of individual branches (W): 1 — the southern branch at 27,5° E, 71,25° N, at a depth of 115 m; the central branch at 23,5° E, 72,75° N, at a depth of 286 m; and the northern branch at 20,0° E, 72,75° N, at a depth of 155 m. In the southern part of the meridional transect (71,25° N, 27,5° E and 74,25° N, 19,25° E), for the period from 1993 to 2023, the shaded area indicates the range of one standard deviation

Так как поток тепла значительно различается от зимы к лету, целесообразно рассмотреть его межгодовой ход отдельно для теплого (май–сентябрь) и холодного (октябрь–апрель) сезонов года.

Во временной изменчивости потока тепла за теплый и холодный сезоны в период с 1993 по 2023 годы (рис. 8) видно, что поток тепла в холодный период в среднем превышает таковой в теплый период на 17 %, что свидетельствует о его большей интенсивности. Средние значения составляют для холодного сезона 66,4 ТВт и 56,1 ТВт для теплого. Особого внимания заслуживает выраженный максимум потока тепла в 2007 г., который позволяет разделить общую изменчивость на два периода. Для периода 1993–2007 гг. на-

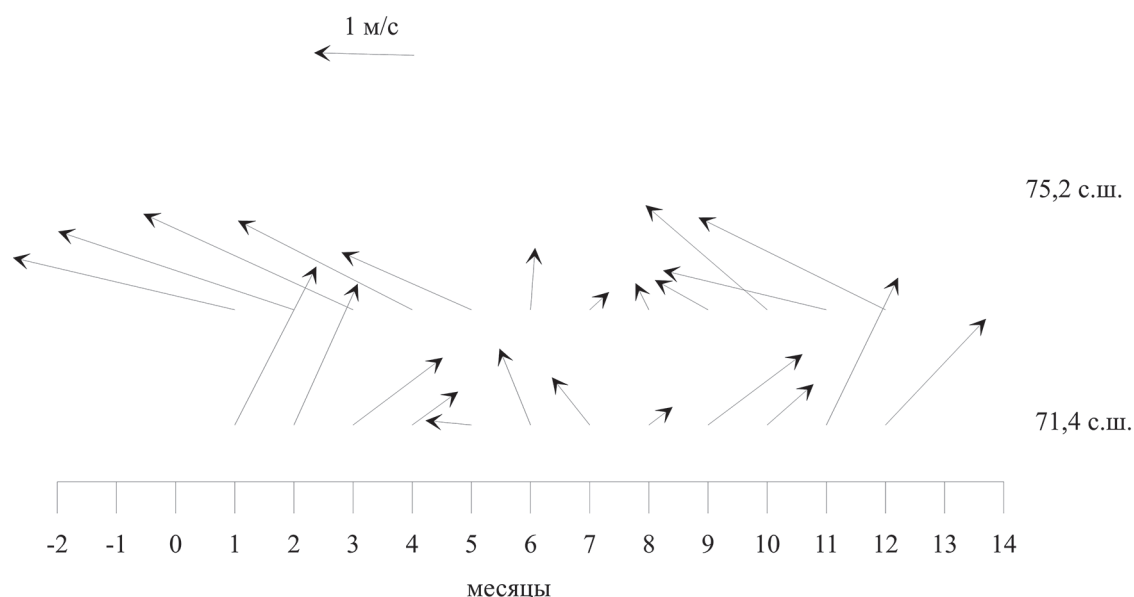
блюдается выраженный рост теплового потока как зимой (2,5 ТВт/год,  $R^2=0,49$ ), так и летом (1,5 ТВт/год,  $R^2=0,78$ ), за которым следует резкое снижение к 2010 г. Начиная с 2010 года в обоих сезонах отмечается стабилизация потока тепла (локальные тренды не значимы) на более низком уровне.



**Рис. 8.** Поток тепла в теплый и холодный периоды года с линейными основными и локальными трендами. Прямые линии — линейный тренд за весь период, пунктирные линии — локальные тренды

**Fig. 8.** Heat flux during the warm and cold seasons with linear global and local trends. Heat flux during the warm and cold seasons. Solid lines indicate the linear trend over the entire period, while dashed lines represent local trends

Предполагается, что поток тепла в Баренцевом море управляется атмосферной циркуляцией [14, 28, 29]. Для оценки связи ветровой циркуляции с потоком тепла на разрезе были рассчитаны среднеклиматические векторы ветра за период 1980–2020 гг. (рис. 9).



**Рис. 9.** Среднеклиматические векторы ветра на высоте 10 м на 18,75° в. д. за период 1980–2020 гг.

**Fig. 9.** Mean climatic wind vectors at 10 m height at 18,75°E longitude for the period 1980–2020

В целом, векторы ветра на разрезе согласованы: в осенне-зимний период севернее о-ва Медвежий отмечаются ветры юго-восточного направления, а южнее — юго-западного. В южной зоне меридиональная компонента преобладает, особенно в осенне-зимний период. В мае-июле ветер значительно ослабевает по всему разрезу, на юге разворачивается на запад, что препятствует основным течениям. В южной части разреза в годовом ходе скоростей ветра максимум отмечается в зимние месяцы декабрь/февраль, а минимум в летние месяцы. Дрейфовый интегральный поток тепла имеет зональное направление и определяется ветрами юго-западного направления. Из рис. 7 и 9 видно, что среднеклиматические скорости ветра хорошо согласуются с годовым ходом потока тепла. Слабый ветер соответствует слабому потоку тепла, а сильный соответствует сильному потоку.

Корреляция между осреднёнными за тёплый и холодный периоды компонентами скорости ветра показала, что в межгодовой изменчивости тепловой поток в тёплый период связан только с зональной компонентой ветра ( $R = 0,47$ ), а в холодный период отмечается связь как с зональной ( $R = 0,38$ ), так и с меридиональной компонентой ветра ( $R = 0,47$ ). Так как поток тепла в холодный период имеет корреляцию и с обоими составляющими вектора ветра, целесообразно оценить их множественную корреляцию, которая значительно выше и равна 0,64. Таким образом можно сделать вывод, что действительно поток тепла в южной части разреза в значительной степени управляется атмосферной циркуляцией.

Похожий результат показывают расчеты, выполненные с помощью ветровых моделей [32, 33]: южные ветры, которые доминируют зимой, увеличивают атлантический приток, в то время как более слабые, более флуктуирующие восточные ветры, которые обычны летом, уменьшают ветровой приток.

#### 4. Заключение

По оценкам адвективного теплопереноса, поступающего через стандартный вековой разрез (м. Нордкап—о. Медвежий—м. Серкап) в бассейн Баренцева моря, определено, что основное поступление тепла происходит через южную часть разреза, с расходом в среднем 2,1 Св, и распространяется тремя основными ветвями (южной, центральной и северной). Поток тепла (60 ТВт) в южной части разреза сравним с общим среднесуточным потоком тепла (61 ТВт) и имеет значимый положительный тренд 0,03 ТВт/мес. По оценкам тренда оказалось, что за 31 год (1993—2023 гг.) поток тепла в южной части разреза увеличился на 11 ТВт, а в северной части — на 3 ТВт. Таким образом, акцент в переносе тепла в Баренцево море значительно смещен к югу.

Средний многолетний поток соли через меридиональный разрез в бассейн Баренцева моря составляет 0,9 кТ/с и имеет значимый отрицательный тренд  $-0,0004$  кТ/мес, отрицательный тренд солёности в южной части разреза показывает опреснение на  $-0,0002$  ЕПС/мес, а в северной части, напротив — осолонение на 0,0004 ЕПС/мес.

В межгодовой изменчивости потока тепла и его компонентов в южной части разреза на основе вейвлет-анализа выявлено, что синхронные квази-7-летние колебания с сопутствующим положительным трендом температуры воды и скоростей течений, что определяет рост потока тепла, отмечаются до 2008 г. В период 2008—2010 гг. отмечен «слом» тенденции, выявлены значительные изменения структуры колебаний и направления трендов, как в температуре воды, так и в скоростях течений. В период 2010—2023 гг. отмечается их значительная рассинхронизация, приводящая к стабилизации потока тепла на более низком уровне.

Во внутригодовом ходе самая южная ветвь потока тепла в южной части разреза испытывает значительную изменчивость, практически полностью определяемой скоростями течений: зимой наблюдается максимум, летом — минимум. В ядре южной ветви потока тепла размах колебаний в 3—7 раз выше, чем в ядрах центральной и северной струй потока тепла. Такая структура внутригодовой изменчивости определяется внутригодовым ходом ветровой циркуляции в регионе исследования: скорость ветра зимой максимальная и направление ветра определяет направление течения.

#### Финансирование

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-27-00221.

#### Funding

This research was carried out with the support of the Russian Science Foundation (RSF), grant №. 24-27-00221.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

## Литература

1. Акперов М.Г., Семенов В.А., Мохов И.И. Влияние океанического притока тепла в Баренцево море на региональные изменения ледовитости и статической устойчивости атмосферы // Лёд и Снег. 2019. Т. 59, № 4. С. 529–538. EDN JKOCQU. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-417>
2. Farneti R., Vallis G.K. Meridional energy transport in the coupled atmosphere-ocean system: Compensation and partitioning // Journal of climate. 2013. Vol. 26, No. 18. P. 7151–7166. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00133.1>
3. Смирнов А.В. Эволюция верхнего слоя океана в Северо-Европейском бассейне: автореф. Дис. ... канд. геогр. наук. СПб.: СПбГУ, 2011. EDN QFEZDB
4. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из космоса. 2013. Вып. 4. С. 50–65. EDN QIWDAP. <https://doi.org/10.7868/S0205961413040076>
5. Onarheim I.H., Eldevik T., Årthun M. Skillful prediction of Barents Sea ice cover // Geophysical Research Letters. 2015. Vol. 42, No. 13. P. 5364–5371. EDN UQEFJZ. <https://doi.org/10.1002/2015GL064359>
6. Сумкина А.А., Иванов В.В., Кивва К.К. Тепловой баланс поверхности Баренцева моря в холодный период // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2024. Vol. 79, No. 3. P. 123–134. EDN VLIHYL. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.10>
7. Aure J., Ljøen R. Wind effects on the lateral extension of the Norwegian Coastal Water // Continental Shelf Research. 1988. Vol. 8, No. 3. P. 239–253. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(88\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0278-4343(88)90031-3)
8. Dickson R., Rudels B., Dye S. Current estimates of freshwater flux through Arctic and subarctic seas // Progress in Oceanography. 2007. Vol. 73, No. 3–4. P. 210–230. EDN MJTZSL. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.12.003>
9. Maslowski W., Marble D., Walczowski W. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. Vol. 109, No. C3. P. 2001JC001039. EDN JZZZOS. <https://doi.org/10.1029/2001JC001039>
10. Skagseth Ø., Furevik T., Ingvaldsen R., et al. Volume and heat transports to the Arctic Ocean via the Norwegian and Barents Seas // Arctic-Subarctic Ocean Fluxes. Springer, 2008. P. 45–64. EDN SLLDVZ. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_3)
11. Smedsrud L.H., Ingvaldsen R., Nilsen J.E. Heat in the Barents Sea: Transport, storage, and surface fluxes // Ocean Science. 2010. Vol. 6, No. 1. P. 219–234. EDN MYENYR. <https://doi.org/10.5194/os-6-219-2010>
12. Соколов А.А., Гордеева С.М. Изменение адвекции тепла в Баренцево море // Российская Арктика. 2019. № 4. С. 34–44. EDN VWXDQF
13. Калавиччи К.А., Башмачников И.Л. Особенности взаимодействия в системе океан-атмосфера в Баренцевом море по данным реанализов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 2. С. 175–187. EDN XDMRVQ. <https://doi.org/10.31857/S0002351521020061>
14. Башмачников И.Л., Юрова А.Ю., Бобылев Л.П., Весман А.В. Сезонная и межгодовая изменчивость потоков тепла в районе Баренцева моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 2. С. 239–250. EDN TIZXZO. <https://doi.org/10.7868/S0003351518020149>
15. Визе В.Ю. Причины потепления Арктики // Советская Арктика. 1937. № 1. С. 1–7.
16. РД 52.10.918–2022. Положение о вековых океанографических разрезах на морях, омывающих берега Российской Федерации. Ижевск: Принт, 2022. 78 с.
17. Zuo H., Balmaseda M.A., Tietsche S. The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment // Ocean Science. 2019. Т. 15. The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea ice. No. 3. P. 779–808. EDN EIMTQU. <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>
18. Liu C., Jin L., Cao N. et al. Assessment of the global ocean heat content and North Atlantic heat transport over 1993–2020 // npj Climate and Atmospheric Science. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 1–15. EDN QHSFFX. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00860-6>
19. European Union-Copernicus Marine Service. Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis. Mercator Ocean International, 2019. <https://doi.org/10.48670/moi-00024>
20. Bouffard T.J. Managing the Barents Sea: Comparing Norwegian & Russian Offshore Oil-Spill Prevention Policies. 2017. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:204845285> (дата обращения: 08.09.2025)

21. GEBCO Bathymetric Compilation Group 2024. The GEBCO\_2024 Grid — a continuous terrain model of the global oceans and land. NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC, 2024.
22. Смирнов А.В., Иванов В.В., Соколов А.А. Сравнительный анализ процессов теплопереноса, рассчитанных по инструментальным измерениям и по продуктам океанского реанализа, в проливе Фрама // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 3. С. 402–425. EDN GCHFLC
23. Beszczynska-Möller A., Fahrbach E., Schauer U. Variability in Atlantic water temperature and transport at the entrance to the Arctic Ocean, 1997–2010 // ICES Journal of Marine Science. 2012. Vol. 69, No. 5. P. 852–863. EDN RITEWT. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss056>
24. Haine T.W.N., Curry B., Gerdes R. Arctic freshwater export: Status, mechanisms, and prospects // Global and Planetary Change. 2015. Vol. 125. P. 13–35. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.013>
25. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // Bulletin of the American Meteorological Society. 2002. Vol. 83, No. 11. P. 1631–1643. EDN UOOUNN. <https://doi.org/10.1175/bams-83-11-1631>
26. Ingvaldsen R., Loeng H., Asplin L. Variability in the Atlantic inflow to the Barents Sea based on a one-year time series from moored current meters // Continental Shelf Research. 2002. Vol. 22, No. 3. P. 505–519. EDN LRWMBV. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00070-X)
27. Torrence C., Compo G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. Vol. 79, No. 1. P. 61–78. EDN LPIQSL. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)
28. Бузин И.В., Гудкович З.М. Сезонные особенности климатических изменений в Баренцевом море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 3 (89). С. 20–32. EDN OKBRRF
29. Кононова Н.К. Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1899–2017 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 3. С. 108–123. EDN YNFLQT. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-3-108-123>
30. Мохов И.И., Семенов В.А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах и их связь с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16–28. EDN VKQPRF
31. Blunden J., Arndt D.S., Baringer M.O. State of the Climate in 2010 // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011. Vol. 92, No. 6. P. S1–S236. EDN RHKNGI. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-92.6.s1>
32. Adlandsvik B. Wind-driven variations in the Atlantic Inflow to the Barents Sea // International Council for the Exploration of the Sea. 1989. Т. 18. С. 1–13. URL: [https://www.ices.dk/sites/pub/CM%20Documents/1989/C/1989\\_C18.pdf](https://www.ices.dk/sites/pub/CM%20Documents/1989/C/1989_C18.pdf) (дата обращения: 08.09.2025)
33. Harms J.H. A numerical study of the barotropic circulation in the Barents and Kara Seas // Continental Shelf Research. 1992. Vol. 12, No. 9. P. 1043–1058. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(92\)90015-C](https://doi.org/10.1016/0278-4343(92)90015-C)

## References

1. Akperov MG, Semenov VA, Mokhov II. The influence of oceanic heat transport in the Barents Sea on the regional sea ice and the atmospheric static stability. *Led i Sneg*. 2019;59(4):529–538. (In Russ).
2. Farneti R, Vallis GK. Meridional energy transport in the coupled atmosphere–ocean system: compensation and partitioning. *Journal of Climate*. 2013;26(18):7151–7166. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00133.1>
3. Smirnov AV. Evolution of the upper ocean layer in the North European Basin: thesis abstract. St. Petersburg, St. Petersburg State University; 2011. (In Russ).
4. Ivanov VV, Alekseev VA, Alekseeva TA. Is Arctic ice cover becoming seasonal? *Issledovaniya Zemli Iz Kosmosa*. 2013;2013(4):50–65. <https://doi.org/10.7868/S0205961413040076> (In Russ).
5. Onarheim IH, Eldevik T, Årthun M. Skillful prediction of Barents Sea ice cover. *Geophysical Research Letters*. 2015;42(13):5364–5371. <https://doi.org/10.1002/2015GL064359>
6. Sumkina AA, Ivanov VV, Kivva KK. Heat budget of the Barents Sea surface in winter. *Lomonosov Geography Journal*. 2024;79(3):123–134. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.10>
7. Aure J, Ljøen R. Wind effects on the lateral extension of the Norwegian Coastal Water. *Continental Shelf Research*. 1988;8(3):239–253. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(88\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0278-4343(88)90031-3)
8. Dickson R, Rudels B, Dye S. Current estimates of freshwater flux through Arctic and subarctic seas. *Progress in Oceanography*. 2007;73(3–4):210–230. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.12.003>
9. Maslowski W, Marble D, Walczowski W. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice–ocean model simulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004;109(C3): C03012. <https://doi.org/10.1029/2001JC001039>
10. Skagseth Ø, Furevik T, Ingvaldsen R, et al. Volume and heat transports to the Arctic Ocean via the Norwegian and Barents Seas. In: *Arctic–Subarctic Ocean Fluxes*. Springer; 2008. p. 45–64. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_3)

**Тепломассоперенос через западную границу Баренцева моря по данным реанализа ORAS5**  
**Heat and mass transfer across the western boundary of the Barents Sea based on ORAS5 reanalysis data**

11. Smedsrud LH, Ingvaldsen R, Nilsen JE. Heat in the Barents Sea: transport, storage, and surface fluxes. *Ocean Science*. 2010;6(1):219–234. <https://doi.org/10.5194/os-6-219-2010>
12. Sokolov AA, Gordeeva SM. Changes in heat advection in the Barents Sea. *Russian Arctic*. 2019;(4):34–44. (In Russ).
13. Kalavichchi KA, Bashmachnikov IL. Ocean–atmosphere interactions in the Barents Sea from reanalyses data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(2):159–169. <https://doi.org/10.1134/S0001433821020067>
14. Bashmachnikov IL, Yurova AY, Bobylev LP, Vesman AV. Seasonal and interannual variations of heat fluxes in the Barents Sea region. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018;54(2):213–222. <https://doi.org/10.1134/S0001433818020032>
15. Vize UV. Reasons of the Arctic warming. *Soviet Arctic*. 1937;(1):1–7. (In Russ).
16. RD52.10.918–2022. Regulations on secular oceanographic sections in the seas washing the shores of the Russian Federation. Izhevsk Print; 2022. 78 p. (In Russ).
17. Zuo H, Balmaseda MA, Tietsche S. The ECMWF operational ensemble reanalysis–analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment. *Ocean Science*. 2019;15(3):779–808. <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>
18. Liu C., Jin L., Cao N. et al. Assessment of the global ocean heat content and North Atlantic heat transport over 1993–2020. *npj Climate and Atmospheric Science*. 2024;7(1):1–15. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00860-6>
19. European Union–Copernicus Marine Service. Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis. Mercator Ocean International; 2019. <https://doi.org/10.48670/moi-00024>
20. Bouffard TJ. Managing the Barents Sea: comparing Norwegian & Russian offshore oil-spill prevention policies. 2017. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:204845285> (date of access: 08.09.2025)
21. GEBCO Bathymetric Compilation Group 2024. The GEBCO\_2024 Grid — a continuous terrain model of the global oceans and land. NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC; 2024.
22. Smirnov AV, Ivanov VV, Sokolov AA. Comparative analysis of heat and mass transport through Fram Strait calculated using the mooring and ocean reanalysis data. *Physical Oceanography*. 2024;31(3):364–386.
23. Beszczynska-Möller A, Fahrbach E, Schauer U. Variability in Atlantic water temperature and transport at the entrance to the Arctic Ocean, 1997–2010. *ICES Journal of Marine Science*. 2012;69(5):852–863. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss056>
24. Haine TWN, Curry B, Gerdes R. Arctic freshwater export: status, mechanisms, and prospects. *Global and Planetary Change*. 2015;125:13–35. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.013>
25. Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J. NCEP–DOE AMIP–II reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002;83(11):1631–1643. <https://doi.org/10.1175/bams-83-11-1631>
26. Ingvaldsen R, Loeng H, Asplin L. Variability in the Atlantic inflow to the Barents Sea based on a one-year time series from moored current meters. *Continental Shelf Research*. 2002;22(3):505–519. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00070-X)
27. Torrence C, Compo GP. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998;79(1):61–78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)
28. Buzin IV, Gudkovich ZM. Seasonal features of climate change in the Barents Sea. *Arctic and Antarctic Research*. 2011;(3):20–32. (In Russ).
29. Kononova NK. Types of the global atmospheric circulation: monitoring and retrospective assessment results of 1899–2017. *Fundamental and Applied Climatology*. 2018;3:108–123. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-3-108-123> (In Russ).
30. Mokhov II, Semenov VA. Weather and climate anomalies in Russian regions related to global climate change. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016;41(2):84–92. <https://doi.org/10.3103/S1068373916020023>
31. Blunden J, Arndt DS, Baringer MO. State of the climate in 2010. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2011;92(6): S1–S236. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-92.6.s1>
32. Adlandsvik B. Wind-driven variations in the Atlantic inflow to the Barents Sea. *Council Meeting International Council for the Exploration of the Sea*. 1989;18:1–13. URL: [https://www.ices.dk/sites/pub/CM%20Documents/1989/C/1989\\_C18.pdf](https://www.ices.dk/sites/pub/CM%20Documents/1989/C/1989_C18.pdf) (date of access: 08/09/2025)
33. Harms IH. A numerical study of the barotropic circulation in the Barents and Kara Seas. *Continental Shelf Research*. 1992;12(9):1043–1058. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(92\)90015-C](https://doi.org/10.1016/0278-4343(92)90015-C)

## Об авторе

СОКОЛОВ Андрей Андреевич, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ), ведущий инженер центра ледовой и гидрометеорологической информации «Север» (ЦЛГМИ), SPIN-код (РИНЦ): 6030–5725, e-mail: a.sokolov@aari.ru