

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-407-420>
УДК 551.465.4 (268.45)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL PAPER

Водный, тепловой и солевой баланс юго-восточной части Баренцева моря

С.М. Гордеева^{1,2✉}, Д.В. Дешова¹

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*

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

✉gordeeva@rshu.ru

SMG, 0000-0001-9797-5266; ДВД, 0009-0008-9851-0514

Аннотация. В статье представлены оценки адвективных потоков на открытых границах, а также других компонентов водного, теплового и солевого балансов юго-восточной части Баренцева моря (иногда называемой Печорским морем). По среднемесячным данным реанализов MERCATOR GLORYS12V1 и ECMWF ERA5 за период 1993–2018 гг. рассчитаны объемный расход воды, потоки тепла и соли на границах юго-восточной части Баренцева моря (западная граница по 50° в. д., северная граница по 71° с. ш. и разрез в проливе Карские Ворота); потоки тепла и влаги на поверхности моря. Балансы воды, тепла и соли собраны с невязкой, не превышающей 1,6 %. 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. На основании анализа линейных трендов показано, что все основные потоки имеют значимый положительный тренд. Это указывает на рост транзита атлантических вод через юго-восточную часть Баренцева моря. Также отмечен рост испарения и теплоотдачи с поверхности моря, связанный с ростом температуры воды.

Ключевые слова: взаимодействие с атмосферой, водный баланс, водообмен, Карские Ворота, Печорское море, солевой баланс, тепловой баланс, MERCATOR GLORIS12V1

Для цитирования: Гордеева С.М., Дешова Д.В. Водный, тепловой и солевой баланс юго-восточной части Баренцева моря. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023; 69(4): 407–420. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-407-420>

Поступила 06.08.2023

После переработки 15.10.2023

Принята 23.11.2023

Water, heat and salt balance of the south-eastern part of the Barents Sea

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

¹ *Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia*

² *Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

✉gordeeva@rshu.ru

SMG, 0000-0001-9797-5266; DVD, 0009-0008-9851-0514

Abstract. The south-eastern part of the Barents Sea is located away from the main currents, with a combination of climatic, hydrological and oceanological processes creating conditions that make

the region different from the rest of the Barents Sea such that it is seen as a separate region and called sometimes the Pechora Sea. Despite the intensive economic activity in the south-eastern part of the Barents Sea, it is not yet clear to what extent the general Atlantic water transport in the Barents Sea and, consequently, the transport of heat and salt, affects this region. Therefore, the aim of this study was to assess advective flows at open boundaries, as well as other components of the water, heat and salt balances of the south-eastern part of the Barents Sea. Based on monthly average data from the MERCATOR GLORYS12V1 reanalysis for the period 1993–2018, we calculated water transport, heat and salt flows at the boundaries of the south-eastern part of the Barents Sea (at 50° E in the west, at 71° N in the north and in the Kara Gate Strait); to close the balances, an assessment was made of sea-atmosphere interaction characteristics on the sea surface based on ECMWF ERA5 reanalysis data. Water, heat and salt balances were combined with a residual not exceeding 1.6 %. Linear trends for the characteristics obtained were calculated. It is revealed that the average long-term resulting water transport in the south-eastern part of the Barents Sea is directed from the north-west of the region to the Kara Gate Strait (0.40 Sv). This current is associated with the Atlantic waters and also carries heat and salt. The resulting heat input (5.92 TW) creates a heat excess in the water area, which is compensated for by interaction with the atmosphere (1.86 TW). The salt flow through the region is estimated at 13.98 t/s. During the study period, all the main flows have a statistically significant positive trend in the incoming and outgoing parts of the balances: water transport — 0.005 Sv per year; salt flow — 0.18 t/s per year. This indicates an increase in the transit of Atlantic waters through the south-eastern part of the Barents Sea. An increase in the advective heat flux (0.15 TW per year) across the western border is accompanied by an increase in its release into the atmosphere (0.07 TW per year) and an increase in evaporation of 6.9 mm per year. Sea levels are also rising at a rate of 0.27 cm per year. Thus, the increasing dynamics of the processes in the region is a factor to take into account in conducting economic activities.

Keywords: heat balance, Kara Gates, Pechora Sea, sea-atmosphere interaction, salt balance, water balance, water transport, MERCATOR GLORIS12V1

For citation: Gordeeva S.M., Deshova D.V. Water, heat and salt balance of the south-eastern part of the Barents Sea. *Arctic and Antarctic Research*. 2023; 69 (4):407–420. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-407-420>

Received 06.08.2023

Revised 15.10.2023

Accepted 23.11.2023

Введение

Природные условия юго-восточной части Баренцева моря, которую иногда называют Печорским морем, отличаются от остальной акватории. Здесь более суровый климат и ледовые условия вследствие ослабленного влияния Норвежского течения, заходящего в Баренцево море [1].

Юго-восточная часть Баренцева моря подвержена влиянию многих динамических процессов и приходу различных типов водных масс¹ [2]: с запада поступают теплые и соленые атлантические воды вместе с потоками воды из Белого моря, на востоке осуществляется водообмен с Карским морем через пролив Карские Ворота, через поверхность происходит взаимодействие с атмосферой. Режим вод на юго-востоке Баренцева моря в основном определяется влиянием стока р. Печоры. Таким образом, совокупность климатических, гидрологических и океанологических факторов создает в так называемом Печорском море отличную от смежного баренцевоморского бассейна обстановку [3], которая требует изучения.

¹ *Печорское море. Экологический атлас: Научно-популярное издание «Газпром-нефть».* СПб: Галерея Печати; 2018. 144 с.

Одним из подходов к исследованию любого бассейна является балансовый метод [4]. Водный, тепловой и солевой балансы представляют собой количественное соотношение прихода, расхода и аккумуляции (запаса) воды, тепла или соли для исследуемого объекта за определенный промежуток времени. Метод баланса 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.

Исследованию баланса вод в Баренцевом море посвящено множество работ, а вот конкретно юго-восточная его часть в этом плане остается слабо изученной. Несмотря на особенности гидрологического режима данного района, связь и влияние гидрологической обстановки Баренцева моря в целом на его юго-восточную часть все же несомненны. Поэтому сначала оптимально обратиться к обзору исследований компонентов водного, теплового и солевого балансов всей акватории Баренцева моря.

В Баренцевом море баланс вод в целом состоит из притока на западной границе и оттока на востоке и северо-востоке. В балансе участвуют и другие процессы, но они, в сравнении с адвективным переносом, малы. Так, со льдами Карского моря и Арктического бассейна в Баренцево море поступает около 0,004 Св воды, а береговым стоком — примерно 0,005 Св пресной воды, 90 % которой приходится на р. Печору [1].

Одну из ранних оценок среднего потока в Карских Воротах (0,7 Св) получил Н.С. Уралов (1960) с помощью расчетов динамическим методом (табл. 1). Дальнейшие измерения течений и расчеты потока были близки по величине к оценке Н.С. Уралова. Но эти значения подверглись сомнению из-за большой величины при малом поперечном сечении пролива. Более поздние оценки дают меньшую величину расхода и составляют 0,05–0,6 Св [1].

В 1997 г. приток атлантических вод на западной границе Баренцева моря начали измерять «прямо», с помощью измерителей течений [2], суммарный приток вод за год составил 2 Св. На северо-восточной границе (от арх. Земля Франца-Иосифа до Новой Земли) с помощью модельных значений также получен средний за год поток 2 Св. На северной границе моря оценки основаны на геострофических расчетах по данным, полученным путем прямых измерений течений только в двух точках, получено значение в 0,1–0,3 Св, дать более точную оценку расхода на севере Баренцева моря оказалось затруднительно из-за ледовых условий.

L.H. Smedsrud с соавторами [5] на основе множества длительных временных рядов (1900–2000 гг.) получил средний приход через западную границу Баренцева моря в 2,4 Св, который полностью компенсировался расходом на северо-восточной восточной границе.

Другие ученые с помощью климатической модели HIRHAM/NAOSIM для Арктики [6] по среднемесячным данным скорости течений и температуре рассчитали приток вод и тепла в Баренцево море в период 1979–2016 гг. Средняя за год величина притока на разрезе по меридиану от Норвегии до арх. Шпицберген составила $2,3 \pm 0,3$ Св.

W. Maslowski с соавторами [7] использовали подход, заключающийся в количественной оценке модельной средней циркуляции и переноса масс и свойств

в Баренцевом море и их изменчивости за период 1979–2001 гг. Оценки водообмена на границах Баренцева моря, приведенные в [7], также показаны в табл. 1.

Таким образом, из предыдущих исследований видно, что Баренцево море является в значительной мере динамичным районом в Северо-Европейском

Таблица 1

**Суммарные оценки водообмена на границах Баренцева моря
по данным разных исследований**

Table 1

**Summary estimates of water transport at the boundaries of the Barents Sea,
according to different studies**

	Западная граница	Восточная граница	Северная граница	Пролив Карские Ворота
Расход, Св				
Н.С. Уралов [1]	—	—	—	0,70
После Н.С. Уралова [1]	—	—	—	0,05–0,60
«Прямые» измерения [2]	2,0	2,0	0,30	—
L.H. Smedsrud at al. [5]	2,40	2,40	—	—
HIRHAM/NAOSIM [6]	2,30	—	—	—
W. Maslowski at al. [7]	3,27	2,56	0,36	0,32
Данное исследование	—	—	—	0,40
Количество тепла, ТВт				
W. Maslowski at al. [7]	78,38	2,15	0,76	0,70
Данное исследование	—	—	—	4,09
Количество соли, т/с				
W. Maslowski at al. [7]	114,15	88,65	12,55	10,64
Данное исследование	—	—	—	13,75

бассейне, пропускающим через себя атлантические воды с преобладающим направлением с запада на восток, с их последующей тепловой и соленостной трансформацией. Юго-восточная часть Баренцева моря находится в стороне от основных течений моря, и, несмотря на интенсивную хозяйственную деятельность на акватории, до сих остается невыясненным вопрос, насколько общий баренцевоморский перенос атлантической воды и с ней — тепла и соли отражается в этом регионе.

Кроме того, в отличие от предыдущих исследований, где оценки потоков на границах в основном были основаны на данных натуральных наблюдений косвенных параметров, прямых измерений течений или математического моделирования, в данном исследовании используется постоянно обновляемые реанализы. В них осуществляется совместное использование архивных наблюдений и модельных данных. И, таким образом, производится учет множества факторов, влияющих на результаты.

Поэтому целью настоящего исследования стала оценка адвективных потоков на открытых границах, а также других компонентов водного, теплового и солевого балансов юго-восточной части Баренцева моря на основе данных современных реанализов.

Материалы и методы

Гидрологические параметры (температура, соленость, скорость течения, уровень, концентрация льда) выбирались из реанализа MERCATOR GLORYS12V1 морской службы Copernicus (https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030), основанного на существующей системе глобального прогнозирования CMEMS в реальном времени. Выходные файлы глобального океана в этой базе отображаются на стандартной регулярной сетке с шагом $1/12^\circ$ (примерно 8 км) и на 50 стандартных уровнях.

Атмосферные параметры (осадки, испарение, составляющие теплообмена с атмосферой) взяты из реанализа ERA5 службы климатической изменчивости Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means>). ERA5 — это реанализ ECMWF пятого поколения для глобального климата и погоды за последние 8 десятилетий. Данные были переведены в обычную сетку широта–долгота $0,25^\circ$.

Сравнение реанализа GLORYS12V1 с инструментальными наблюдениями проводилось в исследовании В.В. Иванова и др.³ Они получили соответствие распределения гидрологических параметров на вертикальных разрезах в Баренцевом море по данным реанализа GLORYS12V1 с измерениями, сделанными в ходе экспедиции «Трансарктика-2019». В частности, ими был сделан вывод (Иванов, Даньшина, Смирнов, 2021, с. 19): «... модельные данные и данные реанализа также дают близкую к фактической оценку пространственной изменчивости параметров АВ (атлантических вод) по мере их движения в Баренцевом море, что позволяет использовать эти материалы для анализа пространственно-временной изменчивости гидрофизических характеристик...».

В качестве границы исследуемой акватории юго-восточной части Баренцева моря рассматривались меридиональный и широтный разрезы от точки 71° с. ш. 50° в. д. к югу (западная граница) и востоку (северная граница) до берега; для пролива Карские Ворота — по параллели $70^\circ 25'$ с. ш. на долготе от $57^\circ 5'$ до $58^\circ 45'$ в. д. (от Новой Земли на западе и до материка на востоке). Из архива выбирались среднемесячные значения меридиональной и зональной составляющих скорости течения, температуры и солености воды на горизонтах базы данных исходя из рельефа дна от поверхности до дна за период с января 1993 г. по декабрь 2018 г.

Оценка объемного расхода, потоков тепла и соли в толще воды производилась для каждой ячейки разреза отдельно по формулам (1), (2) и (3) [8], которые потом суммировались на всем разрезе.

Объемный расход — объем жидкости, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени, — определяется по формуле:

$$Q = V \cdot \Delta H \cdot \Delta R \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где Q — объемный расход, Св; V — скорость течения в центре каждого слоя, м/с; ΔH — толщина слоя, м; ΔR — расстояние между точками расчетной сетки базы данных, м.

³ Иванов В.В., Даньшина А.В., Смирнов А.В. Разработка объединенных схем пространственного распределения гидрофизических характеристик на основе данных наблюдений, моделирования и реанализа. В кн.: *Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021). Материалы XVII международной научно-технической конференции*. Том II. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН; 2021. С. 22–26.

Тепловой поток — количество теплоты, передаваемой за единицу времени через единицу площади, — рассчитывается по формуле:

$$F_t = C_p \cdot \rho \cdot (T - T_f) \cdot V \cdot \Delta H \cdot \Delta R, \quad (2)$$

где F_t — поток тепла, Вт; C_p — удельная теплоемкость воды, равная 4200 Дж/(кг·с); ρ — плотность воды, равная 1025 кг/м³; T — температура морской воды, °С; T_f — минимальная температура морской воды в данной точке, °С.

Поток соли — количество соли, передаваемой за единицу времени через единицу площади, — определяется по формуле:

$$F_s = \rho \cdot S_w \cdot V \cdot \Delta H \cdot \Delta R, \quad (3)$$

где F_s — поток соли, кг/с; S_w — соленость морской воды, кг/кг.

Кроме основных потоков, замыкались водный и тепловой балансы по формулам (4) и (5) для всего объема моря в указанных границах, а солевой баланс определялся только потоком соли F_s .

Водный баланс составлялся по формуле:

$$Q + W + H + (P - E) = 0, \quad (4)$$

где Q — объемный расход, горизонтальная адвекция вод; W — речной сток; H — изменение объема моря за счет колебаний уровня; P — атмосферные осадки, E — испарившаяся (конденсирующая) влага.

Тепловой баланс рассчитывался по формуле:

$$F_t + \Phi = 0, \quad (5)$$

где F_t — адвекция тепла течениями; $\Phi = (S + E_{\text{эф}} + LE + F)$ — теплообмен с атмосферой; S — солнечная радиация, приходящая на поверхность (коротковолновое излучение); $E_{\text{эф}}$ — тепловое излучение с поверхности (длинноволновое или земное излучение); LE — скрытый турбулентный поток тепла; F — явный турбулентный поток тепла.

Для объемного, теплового и солевого балансов были рассчитаны невязки [4], которые показывают, происходит ли накопление вод, тепла и соли в регионе. Также они помогают понять, достаточно ли используемых составляющих для определения баланса.

Результаты и обсуждение

Если рассматривать распределение адвективных потоков на вертикальных разрезах через жидкие границы акватории (рис. 1), очевидно, что наиболее интенсивный перенос отмечается на западной и восточной границах бассейна, характеризуя транзит атлантических вод вдоль южного побережья Баренцева моря в Карское. Северная граница региона малоподвижна. Основное восточное течение на западной границе бассейна разделяется на достигающие дна струи, усиливающиеся над северными склонами подводных возвышенностей. В проливе Карские Ворота самая сильная струя северного направления приурочена к придонной части основной котловины пролива. В мелководной части пролива у побережья Новой Земли отмечается течение Литке южного направления. Поток соли практически повторяет пространственное распределение объемного расхода. Распределение потока тепла показывает максимумы ближе к поверхности, что связано с повышенными значениями температуры воды на этих горизонтах.

Средние многолетние за период 1993–2018 гг. интегральные оценки расхода, потоков тепла и соли на границах исследуемой области (адвекция) приведены в табл. 2 и на рис. 2, из которых видно, что преобладающее направление переноса вод — от северо-запада региона (Колгуево-Печорское течение) в пролив Карские Ворота.

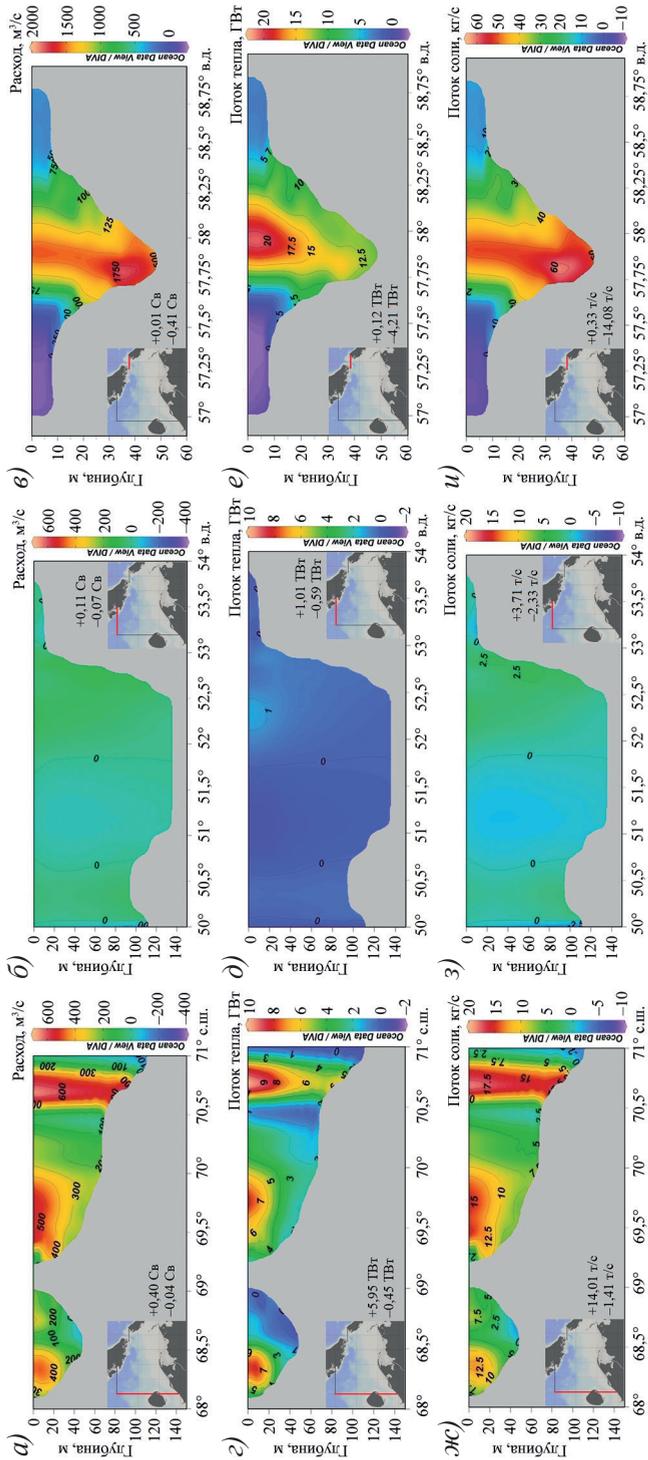


Рис. 1. Вертикальное распределение объемного расхода, ГВт (z, d, e) и соли, кг/с (ж, з, u) на границах исследуемого района: вдоль меридиана 50° в. д. (a, z, ж), вдоль параллели 71° с. ш. (б, d, з) и в проливе Карские Ворота (в, e, u) в среднем многолетнем усреднении за период 1993–2018 гг.

Fig. 1. Vertical distribution of water transport, m^3/s (a, б, в), heat flow, GW (z, d, e) and salt, kg/s (ж, з, u) at the boundaries of the study area: along meridian 50° E (a, z, ж), along parallel 71° N (б, d, з) and in the Kara Gate Strait (в, e, u) in the average long-term averaging for the period 1993–2018

**Средние многолетние оценки расхода, количества тепла и соли
на границах юго-восточной части Баренцева моря за 1993–2018 гг.**

Table 2

**A long-term average estimates of water transport, heat and salt at the boundaries
of the south-eastern part of the Barents Sea for 1993–2018**

Компоненты балансов	Объемный расход, Св	Поток тепла, ТВт	Поток соли, т/с
Западная граница (50° в. д.)			
Приход	0,40	5,95	14,01
Уход	-0,04	-0,45	-1,41
Сумма	0,36	5,50	12,60
Северная граница (71° с. ш.)			
Приход	0,11	1,01	3,71
Уход	-0,07	-0,59	-2,33
Сумма	0,04	0,42	1,38
Пролив Карские Ворота			
Приход	0,01	0,12	0,33
Уход	-0,41	-4,21	-14,08
Сумма	-0,40	-4,09	-13,75
Всего на границах			
Приход	0,52	7,08	18,05
Уход	-0,52	-5,25	-17,82
Сумма	0,0	1,83	0,23

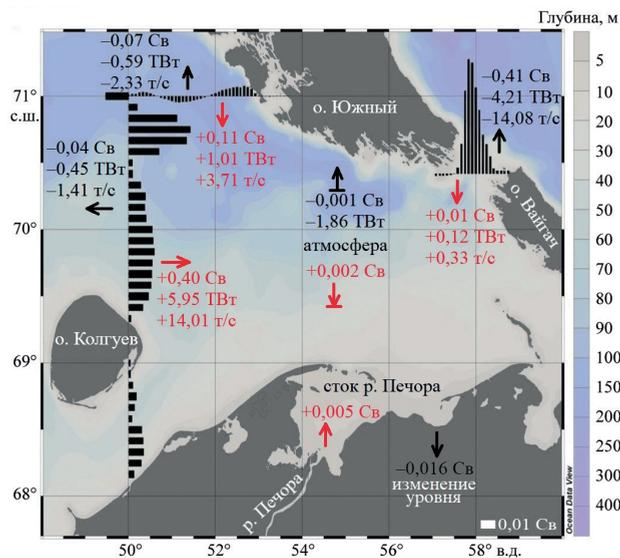


Рис. 2. Оценки компонентов водного (Св), теплового (ТВт) и солевого (т/с) баланса юго-восточной части Баренцева моря. Стрелками показаны направления потоков. Черные столбцы на границах региона показывают величину интегрального по глубине потока между точками сетки. Длина столбцов отражает поток в сравнении с длиной прямоугольника для масштаба 0,01 Св в правом нижнем углу

Fig. 2. Estimates of the components of water (Sv), heat (TW) and salt (t/s) balances of the south-eastern part of the Barents Sea. The arrows show the flow directions. The black bars at the region boundaries show the depth-integrated flux between the grid points. The lengths of the bars reflect the flux compared to the length of the box for a scale of 0.01 Sv in the lower right corner

**Основные компоненты баланса юго-восточной части Баренцева моря
в среднем многолетнем усреднении за 1993–2018 гг.**

Table 3

**The main components of the balance of the south-eastern part of the Barents Sea
in the long-term averaging for 1993–2018**

Компоненты баланса	Приход	Уход	Невязка	Доля, %
Водный баланс, Св				
Интегральный объемный расход на границах (адвекция)	0,515	0,513	—	—
Сток р. Печора	0,005	—	—	—
Атмосферные осадки	0,002	—	—	—
Изменение уровня	—	0,016	—	—
Испарения	—	0,001	—	—
Всего	0,52	0,53	-0,01	1,63
Тепловой баланс, ТВт				
Интегральный поток тепла на границах (адвекция)	7,08	5,25	—	—
Теплоотдача в атмосферу	—	1,86	—	—
Всего	7,08	7,12	-0,04	0,56
Солевой баланс, т/с				
Интегральный поток соли на границах (адвекция)	18,05	17,82	0,23	1,27

В составе компонентов водного, теплового и солевого балансов (табл. 3) отмечено следующее. В среднем многолетнем усреднении весь приток вод на акваторию через границы, со стоком р. Печоры и атмосферными осадками (0,52 Св), практически равен испарению, оттоку через границы и изменению объема за счет уровня моря (0,53 Св).

За счет водообмена с соседними регионами на акватории юго-востока Баренцева моря возникает избыток тепла (7,08 ТВт), который почти полностью компенсируется взаимодействием с атмосферой (7,12 ТВт, где уход через границы 5,25 ТВт и уход в атмосферу 1,86 ТВт). В расчетах не учитывалось тепло, приходящее с атмосферными осадками и ледообразованием, вследствие чего в тепловом балансе возникла невязка. Речной сток также является дополнительным источником тепла в данной области, но его влияние почти не распространяется дальше Печорской губы.

В балансе соли учитывался только адвективный перенос, поэтому наблюдается невязка между поступающей солью (18,05 т/с) и уходящей (17,82 т/с) через границы юго-восточной части Баренцева моря. Дополнительными, сложно учитываемыми и создающими невязку баланса факторами, влияющими на количество соли, являются материковый сток пресных вод, атмосферные осадки, процессы испарения и ледообразования.

Полученные в ходе исследования оценки расхода в Карских Воротах (0,40 Св) хорошо согласуются с W. Maslowski и др. (0,32 Св) [7] (см. табл. 1). А значения количества тепла и соли выше: в данной работе 4,09 ТВт и 13,75 т/с, в работе [7] 0,70 ТВт и 10,64 т/с за год (см. табл. 1). Такие расхождения могут быть связаны с разными источниками исходных данных. Еще одним различием исследований являются разные периоды усреднений, в работе [7] рассматривался промежуток 1979–2001 гг. (23 года), а в данном исследовании использовались более поздние данные — 1993–2018 гг. (26 лет). За этот период было выявлено повышение температуры и солености воды

в проливе Карские Ворота, что может быть причиной более высоких оценок в современности, по сравнению с прошлым исследованием. Также на результаты может влиять разное положение разрезов в Карских Воротах. В работе [7] разрез построен по кратчайшему расстоянию от Новой Земли до о. Вайгач, а в данной работе выбран разрез по параллели через точки с имеющимися значениями параметров.

Из табл. 3 видно, что главную роль в формировании водного баланса играет адвекция через границы акватории: для притока ее доля составляет 98,7 %, а для оттока — 96,8 %.

Объем вод от изменения уровня моря составляет около 3,0 % от общего оттока. Наименьший вклад в суммарный водный баланс вносят сток р. Печоры, атмосферные осадки и испарение (менее 1,0 % каждая из составляющих).

Как было указано ранее, береговой сток в юго-восточную часть Баренцева моря составляет около 0,005 Св, из которого 90 % — сток р. Печоры [1]. Тогда на сток малых рек приходится всего 0,0005 Св. Сток р. Печоры почти в 10 раз превышает сток малых рек. Таким образом, в общем балансе малые реки занимают около 0,1 %, что является незначительным.

Наиболее сбалансированная оценка общего расхода в направлении на восток через Карские Ворота и Югорский Шар составляет около 0,3 Св [7]. Как и в случае с береговым стоком, здесь большая часть расхода приходится на пролив Карские Ворота, что указывает на незначительность расхода в проливе Югорский Шар. По нашим оценкам величина суммарного расхода в проливе Югорский Шар составляет $5,5 \cdot 10^{-4}$ Св.

В тепловом балансе основную долю составляет адвекция тепла течениями (приток — 100 %, отток — 73,8 %). На теплоотдачу в атмосферу из всего уходящего из акватории тепла приходится 26,2 %.

В тепловом балансе по значениям адвекции течениями наблюдается накопление тепла юго-восточной частью Баренцева моря, которое компенсируется взаимодействием с атмосферой.

Значение притока соли превосходит отток, что указывает на накопление соли на юго-востоке Баренцева моря. Это может проявляться в увеличении солёности моря.

Невязки, полученные в ходе расчетов балансов, малы и составляют для водного баланса — 1,63 %, теплового — 0,56 % и солевого — 1,27 %. Невязка может быть связана с тем, что не учитывался объем вод от приносимого из соседних акваторий льда, его таяния и образования. Но из-за малой величины невязки можно сделать вывод о том, что суммарный объем вод от этих параметров незначителен.

В целом в регионе все виды балансов выполняются с достаточной точностью. Это может говорить о том, что используемые для расчетов (независимые друг от друга) источники данных достаточно хорошо сбалансированы между собой даже при оценке мало-го региона и адекватно отражают картину происходящих здесь физических процессов.

По среднегодовым оценкам компонентов водного, теплового и солевого балансов за период 1993–2018 гг. были оценены линейные тренды, значимость которых определялась значимостью коэффициента тренда по *t*-критерию Стьюдента при уровне $\alpha = 0,05$ (табл. 4).

Как видно из табл. 4, практически для всех параметров и составляющих балансов отмечаются значимые тренды. Это означает, что в климатическом плане юго-восточная акватория Баренцева моря значительно изменяется.

Прежде всего, следует отметить повышение температуры воды, солёности и скорости течений на западной границе бассейна, что определяет усиление залива в этот регион атлантических вод, которые стали более теплыми и солёными. Можно заме-

**Коэффициенты линейного тренда среднегодовых значений
гидрофизических параметров, компонентов водного, теплового и солевого балансов**

Table 4

**Linear trend coefficients in annual average hydrophysical parameters
and components of water, heat and salt balances**

Гидрофизические параметры и компоненты балансов	Коэффициент линейного тренда, год ⁻¹			
	Граница 50 в. д.	Граница 71 с. ш.	Пролив Карские Ворота	В целом по море
Гидрофизические параметры				
Температура воды, °С	0,066	0,030	0,063	—
Соленость, епс	0,006	0,011	0,017	—
Зональная (меридиональная) скорость, м/с	0,021	-0,015	0,411	—
Водный баланс, Св				
Интегральный объемный расход	0,003	-0,002	0,006	—
Сток р. Печоры	—	—	—	-0,00002
Атмосферные осадки	—	—	—	0,000004
Изменение уровня моря	—	—	—	0,0001
Испарение	—	—	—	0,00002
Тепловой баланс, ТВт				
Интегральный поток тепла	0,147	-0,031	0,154	—
Теплоотдача в атмосферу	—	—	—	0,067
Солевой баланс, т/с				
Интегральный поток соли	0,122	-0,067	0,199	—

Примечание. Красным цветом выделены статистически значимые величины при $\alpha = 0,05$

Note. Statistically significant values at $\alpha = 0.05$ are highlighted in red

тить, что одновременно усилившийся перенос этих вод через пролив Карские Ворота в Карское море сопровождается его ослаблением на северной границе. Также выявлено, что и течение Литке, несущее вдоль Новой Земли арктические воды из Карского моря, усилилось. Это может отразиться на том, что возросшая динамика уменьшит трансформацию атлантической воды в пределах региона, т. е. поток этих вод будет перемещаться «транзитом» через юго-восток Баренцева моря в Карское море.

Величина трендов в межгодовой изменчивости водного, теплового и солевого балансов в целом формируются в большей степени адвективными составляющими (см. табл. 4 и рис. 3). Остальные компоненты, несмотря на свой малый вклад, также имеют значимые межгодовые тренды. В частности, на рис. 3б показана изменчивость речного стока Печоры, осадков и испарения по площади исследуемой акватории (в мм слоя с 1 м² за год).

Значимый положительный тренд отмечается у испарения (6,9 мм в год) (см. рис. 3б), одновременно выявлен значимый рост теплоотдачи с поверхности региона в атмосферу (0,07 ТВт в год), что объясняется потеплением поверхности региона, как адвективным, так и общим, связанным с глобальным потеплением. Компоненты баланса соли за период 1993–2018 гг. также значимо возрастают, прежде всего отражая увеличение потока атлантических вод через юго-восточную часть Баренцева моря.

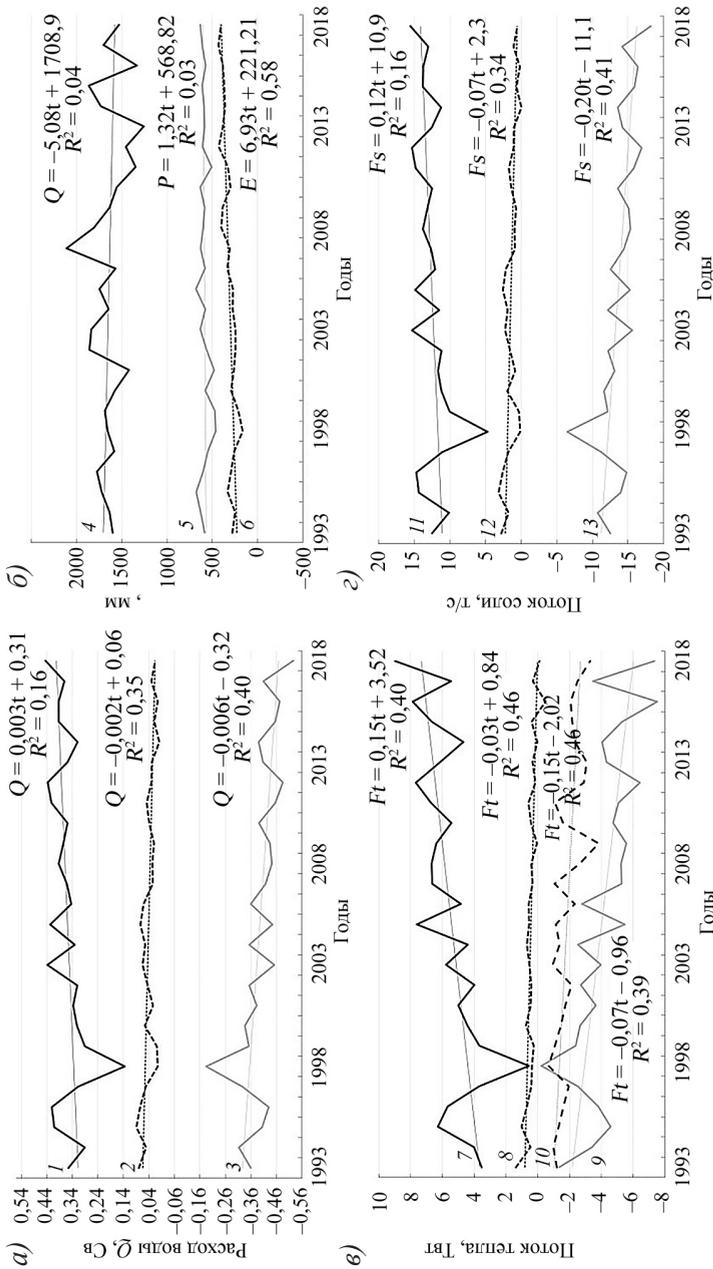


Рис. 3. Годовые значения компонентов водного (а, б), теплового (в) и солевого (г) балансов и их линейные тренды за период 1993–2018 гг.: среднегодовой объемный расход на границе 50° в. д. (1), на границе 71° с. ш. (2), в проливе Карские Ворота (3); годовой сток реки Печора (4), суммарные за год осадки (5) и испарение (6); среднегодовые потоки тепла на границе 50° в. д. (7), на границе 71° с. ш. (8), в проливе Карские Ворота (9), уход тепла с поверхности в атмосферу (10); среднегодовые потоки соли на границе 50° в. д. (11), на границе 71° с. ш. (12), в проливе Карские Ворота (13)

Fig. 3. Annual values of the components of water (a, b), heat (c) and salt (d) balances and their linear trends for the period 1993–2018 гг.: average annual water transport at the boundary of 50° E (1), on the border of 71° N (2), in the Kara Gate Strait (3); annual runoff of the Pechora River (4), total annual precipitation (5) and evaporation (6); average annual heat transport at the boundary of 50°E (7), at the border of 71° N (8), in the Kara Gate Strait (9), heat loss from the surface into the atmosphere (10); average annual salt transport at the boundary of 50°E (11), on the border of 71° N (12), in the Kara Gate Strait (13)

На всей акватории юго-востока Баренцева моря пониженный относительно среднего уровня Мирового океана уровень моря. Его среднее многолетнее значение за период 1993–2018 гг. составляет –44 см. По трендам адвективных компонентов водного баланса видно, что поток воды через Карские Ворота возрастает сильнее, чем ее приток с западной и северной границ. Видимо, этот недостаток компенсируется поднимающимся уровнем. Это было выявлено на основании значимого линейного тренда: за исследуемый период в регионе происходит повышение уровня со скоростью 0,27 см за год. Нужно отметить, что по данным ЕСИМО (http://www.esimo.ru/atlas/Bar/2_waterlevel_station_88037_3.html) на прибрежных постах отмечается повышение уровня моря в период 1984–2006 гг. в пунктах Варандей — 0,61 см/год и мыс Константиновский — 0,69 см/год, что вполне соответствует выявленной тенденции.

Заключение

Таким образом, при рассмотрении баланса вод в юго-восточной части Баренцева моря в составе таких компонентов, как адвекция воды на границах акватории, речной сток, изменение уровня моря, осадки и испарение, определено, что в среднем многолетнем усреднении сумма всех основных компонентов баланса вод составляет:

- для водного баланса: приход — 0,52 Св, уход — 0,53 Св;
- для теплового баланса: приход — 7,08 ТВт, уход — 7,12 ТВт;
- для солевого баланса: приход — 18,05 т/с, уход — 17,82 т/с.

Адвекция через границы акватории играет главную роль в формировании водного баланса. Основной поток вод направлен с северо-запада акватории транзитом через пролив Карские Ворота в Карское море. Колебание уровня моря является вторым по значимости компонентом. Сток р. Печоры, атмосферные осадки и испарение вносят наименьший вклад в баланс.

Основной вклад в тепловой баланс также вносит адвекция тепла течениями, следующей по значимости идет теплоотдача в атмосферу. Баланс соли на акватории полностью формируется адвекцией вод на границах.

Невязки в расчете балансов составляют для водного баланса — 1,63 %, теплового — 0,56 % и солевого — 1,27 %. Малая величина невязок показывает, что используемых компонентов достаточно для описания водного, теплового и солевого балансов на акватории юго-востока Баренцева моря.

Объемный расход воды, потоки тепла и соли в юго-восточной части Баренцева моря имеют значимые положительные тренды за период 1993–2018 гг., которые формируются в большей степени адвективными составляющими и отражают значительные климатические изменения.

Увеличение потока с запада атлантической воды, которая становится более теплой и соленой, вместе с положительными трендами потоков тепла и соли в Карских Воротах указывают на возрастание транзита атлантических вод через бассейн юго-востока Баренцева моря в Карское море.

На поверхности региона выявлен значимый рост испарения (6,9 мм в год) и теплоотдачи в атмосферу (0,07 ТВт в год), что объясняется потеплением поверхности региона.

Таким образом, несмотря на то что юго-восточная часть Баренцева моря, называемая Печорским морем, является малой частью Баренцева моря и кажется достаточно спокойным районом, здесь отмечаются активные динамические процессы,

которые усиливаются с каждым годом, что требует дополнительного внимания при хозяйственной деятельности.

Конфликт интересов. Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания FMWE-2021-0014 (ИО РАН).

Competing interests. The authors declare no conflict of interests.

Funding. The work was carried out of the state task FMWE-2021-0014 (IO RAS).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю. *Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость*. Мурманск: ПИНРО; 2016. 260 с.
2. Писарев С.В. Обзор гидрологических условий Баренцева моря. В кн.: Лисицын А.П. (ред.) *Система Баренцева моря*. М.: ГЕОС; 2021. С. 153–166. [https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/\(13\)](https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8/(13))
3. Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л., Огородов С.А., Тарасов Г.А. Печорское море: прошлое, настоящее, будущее. *Океанология*. 2007; 47; 6: 927–939.
Pavlidis Yu.A., Nikiforov S.L., Ogorodov S.A., Tarasov G.A. Pechora Sea: past, present, future. *Oceanology*. 2007; 47(6): 927–939. (In Russ.)
4. Соколов А.А., Чапмен Т. Г. (ред.) *Методы расчета водных балансов. Международное руководство по исследованиям и практике*. Л.: Гидрометеиздат; 1976. 117 с.
5. Smedsrud L.H., Muilwijk M., Brakstad A., Madonna E., Lauvset S.K., Spensberger C., Born A., Eldevik T., Drange H., Jeansson E., Li C., Olsen A., Skagseth Ø., Slater D.A., Straneo F., Våge K., Årthun M. Nordic Seas heat loss, Atlantic inflow, and Arctic sea ice cover over the last century. *Reviews of Geophysics*. 2022; 60(1): e2020RG00072536. <https://doi.org/10.1029/2020RG000725>
6. Акперов М.Г., Семенов В.А., Мохов И.И., Парфенова М.Р., Дембицкая М.А., Бокучава Д.Д., Ринке А., Дорн В. Влияние океанического притока тепла в Баренцево море на региональные изменения ледовитости и статической устойчивости атмосферы. *Лед и Снег*. 2019; 59(4): 529–538. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-417>
Akperov M.G., Semenov V.A., Mokhov I.I., Parfenova M.R., Dembitskaya M.A., Bokuchava D.D., Rinke A., Dorn W. The influence of ocean heat transport in the Barents Sea on the regional sea ice and the atmospheric static stability. *Ice and Snow*. 2019; 59(4): 529–538. (In Russ.) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-417>
7. Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J. L., Semtner A. J. 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*. 2004; 109: 1–16. <https://doi.org/10.1029/2001JC001039>
8. Доронин Ю.П. *Физика океана*. СПб.: Изд. РГГМУ; 2000. 296 с.