

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-310-322>

УДК 551.46



**Относительные вклады теплообмена на границе моря и атмосферы
и адвективного переноса тепла
в повышение температуры вод Баренцева моря в начале XXI в.**

А.А. Сумкина¹✉, А.В. Смирнов², К.К. Кивва¹, В.В. Иванов^{2,3}

¹ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Москва, Россия

² ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉sumkina@vniro.ru

ААС, 0000-0003-1007-2115; ABC, 0000-0003-3231-7283; KKK, 0000-0001-8100-8095; ВВИ 0000-0003-2569-6027

Аннотация. С начала 2000-х гг. существенно увеличилась среднегодовая температура воды в Баренцевом море (БМ). Основной вклад в формирование термического режима БМ вносят адвективный перенос тепла из соседних акваторий и теплообмен через поверхность. В работе по данным атмосферного и океанского реанализов оценены относительные вклады этих процессов в изменение средней температуры воды БМ на временном интервале 1993–2018 гг. Рассчитан средний годовой баланс тепла БМ (с учетом затрат тепла на таяние льда), показавший преобладание среднегодового поступления тепла за счет адвекции над теплоотдачей с поверхности моря. В рамках упрощенной боксовой модели БМ получено, что, согласно данным реанализов, избыточное поступление адвективного тепла обеспечило повышение температуры воды БМ с 1993 по 2018 г. со средней скоростью 0,28 °C/год.

Ключевые слова: адвекция в океане, Баренцево море, взаимодействие океана и атмосферы, изменение климата, ледяной покров, реанализ, Северный Ледовитый океан, тепловой баланс

Для цитирования: Сумкина А.А., Смирнов А.В., Кивва К.К., Иванов В.В. Относительные вклады теплообмена на границе моря и атмосферы и адвективного переноса тепла в повышение температуры вод Баренцева моря в начале XXI в. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(3):310–322. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-310-322>

Поступила 10.07.2024

После переработки 21.08.2024

Принята 30.08.2024

**Relative contribution of the ocean-air heat exchange
and advective heat transport to the increase
of the Barents Sea water temperature in the early 21st century**

Alexandra A. Sumkina¹✉, Alexander V. Smirnov², Kirill K. Kivva¹,
Vladimir V. Ivanov^{2,3}

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russia

² State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

✉sumkina@vniro.ru

 AAS, 0000-0003-1007-2115; AVS, 0000-0003-3231-7283; KKK, 0000-0001-8100-8095; VVI, 0000-0003-2569-6027

Abstract. The annual water temperature in the major water masses of the Barents Sea (BS) has significantly increased since the early 2000s. Advective heat transport from the neighboring water areas and heat exchange through the sea surface are the major factors, which shape the hydrological conditions in the BS. The paper estimates the contributions of heat exchange at the sea-atmosphere boundary and advective heat transport to changes in the average water temperature of the BS for the entire sea area. The average annual heat balance of the BS is calculated using atmospheric and oceanic reanalysis data. The change in the average temperature of the BS water is estimated taking into account the heat consumption for ice melting. The average surface heat balance from 1993 to 2018 was negative throughout the entire sea area: $-70 \dots -100 \text{ W/m}^2$ in the south and $-10 \dots -20 \text{ W/m}^2$ in the north. The advective heat supply was calculated for 9 straits with neighboring water areas. The determining source of advective heat is the influx of Atlantic waters from the Norwegian Sea between Cape Nordkapp and Bear Island. An average of 40.8 TW of advective heat is supplied through this margin. The calculations showed the predominance of annual heat influx due to advection over heat loss from the sea surface. This excess heat influx resulted in an estimated increase in the water temperature of the BS from 1993 to 2018 at a rate of 0.28 °C per year (taking into account the heat consumption for ice melting). In conclusion, it can be argued that the analysis has validated the hypothesis proposed in the article about compensation of heat losses from the surface of the BS by advective heat flow. The hypothesis is quantitatively confirmed by calculations on a simple box model (with an accuracy of up to an order of magnitude) based on atmospheric and oceanic reanalysis data. The ERA5 and GLORYS12V1 reanalysis data reliably describe the basic patterns of observed variability of ocean, sea ice and atmospheric parameters in the Barents Sea.

Keywords: Arctic Ocean, Barents Sea, climate change, heat balance, oceanic advection, ocean-air interaction, reanalysis, sea ice

For citation: Sumkina A.A., Smirnov A.V., Kivva K.K., Ivanov V.V. Relative contribution of the ocean-air heat exchange and advective heat transport to the increase of the Barents Sea water temperature in the early 21st century. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(3):310–322. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-310-322>

Received 10.07.2024

Revised 21.08.2024

Accepted 30.08.2024

Введение

С начала XXI в. в Баренцевом море (БМ) наблюдаются значительные изменения гидрологического и ледового режимов [1–4]. К наиболее явным показателям происходящих перемен, регистрируемым в данных прямых и дистанционных наблюдений, можно отнести: сокращение площади ледяного покрова, положительные аномалии температуры поверхности моря (ТПМ) и приземной температуры воздуха (ПТВ), а также повышение температуры промежуточных и глубинных вод [5, 6]. Среднегодовая температура поверхности моря с начала 1980-х гг. на разрезе «Кольский меридиан» увеличивается на 0,04 °C в год, а площадь, занимаемая атлантическими водами (АВ), возрастает на 4,0 тыс. км² в год. В то же время средняя ледовитость моря сокращается на 0,6 % в год, а площадь, занимаемая водами арктического происхождения, — на 6,5 тыс. км² в год [7]. В исследовании [8] показано, что за 60 лет (с 1958 по 2017 г.) температура воды в Баренцевом море росла со средней скоростью 0,2–0,4 °C за 10 лет.

Согласно классической теории [9], в субполярных морях, к которым относится БМ, теплоотдача с поверхности моря в холодный период года преобладает над нагревом в теплый период. Возникающий при этом дефицит тепла компенсируется горизонтальной адвекцией тепла течениями [10, 11]. Таким образом, гидрологические и ледовые условия БМ определяются двумя факторами: теплообменом на поверхности моря и адвекцией.

В БМ основным адвективным источником тепла является сопредельное Норвежское море, через которое идет мощный поток теплых и соленых вод атлантического происхождения [12, 13]. Несмотря на многочисленные публикации, затрагивающие различные аспекты современных изменений гидрологического и ледового режима БМ [14], вопрос об относительном вкладе в наблюдаемые изменения указанных выше ключевых процессов остается дискуссионным. Например, в модельном исследовании [15] сделан вывод, что межгодовые колебания площади морского льда в период с 1948 по 2007 г. в значительной степени контролировались аномальным адвективным переносом тепла через западную границу БМ, при котором на 10 ТВт избыточного тепла приходилось уменьшение площади льда на 70×10^3 км². Иная точка зрения изложена в статье [16], где сокращение ледяного покрова и, как следствие, повышение ТПМ объясняется усилением турбулентного потока тепла через морскую поверхность. Противоположные выводы содержатся в статье [17], в которой описано повышение ПТВ в БМ в зимний сезон за счет возрастания интенсивности меридионального переноса тепла и влаги из более низких широт, приводящего к уменьшению турбулентных потоков тепла из моря в атмосферу зимой в БМ.

В данной работе предпринята попытка оценить относительные вклады теплообмена на границе моря и атмосферы и адвективного переноса тепла в изменение температуры вод в рамках простой боксовой модели, в которой по данным атмосферного и океанского реанализов рассчитывается средний годовой баланс тепла БМ и на его основе оценивается изменение средней температуры вод БМ с учетом затрат тепла на таяние льда.

Изменение суммарного годового баланса тепла на поверхности

Для расчета суммарного годового теплового баланса (ТБ) на поверхности БМ были использованы ежечасные значения потоков тепла на поверхности моря из атмосферного реанализа Европейского центра по среднесрочному прогнозированию погоды ERA5 (Европейский реанализ, версия 5) [18] с горизонтальным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ на временном интервале с 1993 по 2019 г. ТБ поверхности моря рассчитывался как сумма потоков поглощенной коротковолновой радиации, исходящей и нисходящей длинноволновой радиации, явного и скрытого турбулентного потоков тепла. Перед проведением расчетов исходные данные осреднялись посуточно, а результирующий ТБ сглаживался 31-суточным скользящим средним для удаления временной изменчивости с масштабом менее одного месяца.

Согласно выполненным расчетам, средний годовой ТБ на поверхности БМ с 1993 по 2018 г. отрицателен на всей акватории моря (рис. 1а): в теплый период года к поверхности моря поступает в 1,5–2 раза меньше тепла, чем отдается с поверхности моря в холодный период.

Абсолютный максимум средней теплоотдачи за 26 лет отмечается в юго-западной части моря (от -90 до -110 Вт/м²), куда поступает основной поток теплых атлантических вод из Норвежского моря. Положительная температура поверхности моря в течение всего года за счет теплого Нордкапского течения ($1 \dots 8$ °С) и низкая температура приземного воздуха, характерная для арктических морей, а также вы-

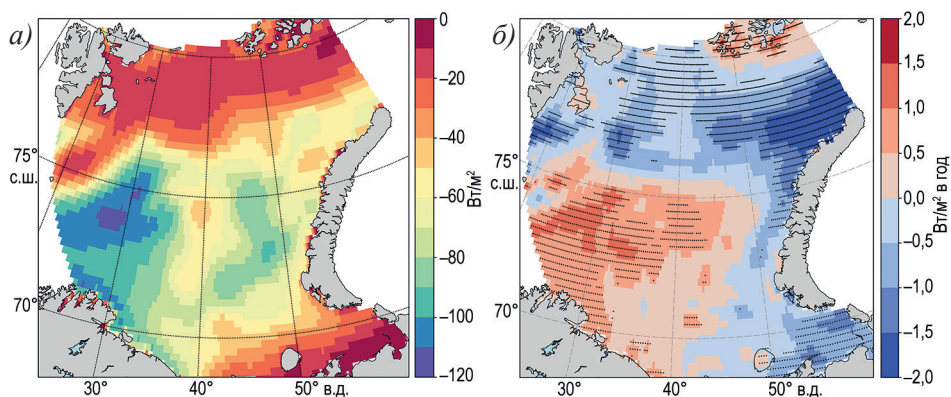


Рис. 1. Средний годовой ТБ на поверхности БМ с 1993 по 2018 г. (а); коэффициент линейного тренда ТБ с 1993 по 2018 г. (б). Точками показаны узлы со статистически значимым коэффициентом линейного тренда ($p < 0,05$)

Fig. 1. The average annual heat balance in the BS from 1993 to 2018 (a); linear trend of heat balance from 1993 to 2018 (b). Statistically significant values of the linear trend ($p < 0,05$) are marked with dots

сокая повторяемость скорости ветра больше 11–15 м/с [19] приводят к усилению теплоотдачи в этом районе. Южная часть БМ выделяется как регион с большой повторяемостью холодных вторжений [20, 21]. Адвекция холодного воздуха на теплую поверхность ведет к возрастанию и усилению теплоотдачи.

В северной и северо-восточной частях моря, где наблюдается сезонный морской лед, средний ТБ за 26 лет минимален по абсолютной величине и составляет от -10 до -30 Вт/м². Это объясняется тем, что в поверхностном слое вод в этой части моря преобладают арктические воды, характеризующиеся относительно низкой ТПМ, малым диапазоном ее сезонных изменений ($-1,8...2$ °C), а также наличием сплошного морского льда в течение большей части года.

Высокие абсолютные значения среднего ТБ за исследуемый период (от -70 до -90 Вт/м²) отмечаются в районе Центрального желоба, что объясняется теплым Новоземельским течением в этом районе. В районе Центральной банки (75° с. ш., 38° в. д.) абсолютные величины среднего ТБ значительно ниже (от -40 до -60 Вт/м²), чем в описанных выше районах моря. Относительно низкие абсолютные значения ТБ объясняются холодным Центральным течением и формированием в этом районе холодных уплотненных вод в зимний сезон [7].

Коэффициент линейного тренда (КЛТ) для среднегодового теплового баланса в северной и северо-восточной частях БМ отрицателен, что указывает на то, что теплоотдача с течением времени возрастает на $0,5...1,2$ Вт/м² в год. Ранее было показано, что в этой части моря разница между ПТВ и ТПМ в зимний сезон увеличивается [22], что приводит к усилению интенсивности теплообмена на поверхности моря. В этой же части моря наблюдается смещение сроков освобождения акватории ото льда на существенно более ранние сроки [23, 24] и, как следствие, уменьшение длительности ледового периода. Ранее лед препятствовал теплообмену между морем и атмосферой. Поэтому в условиях сокращения ледовитости в северо-восточной части теплоотдача из моря в атмосферу может возрастать. В работе [25] отмечается отсутствие многолетнего выраженного тренда экстремальных скоростей ветра с 1981

по 2010 г. над Баренцевым морем. Поэтому скорость ветра практически не влияет на выявленное возрастание теплоотдачи. Однако в работе [26] отмечается увеличение скорости течений. В исследовании показано, что атмосферный Арктический диполь (АД), связанный с антициклоническими ветрами над Северной Америкой и циклоническими ветрами над Евразией, регулирует потоки из Северной Атлантики через северные моря. Чередующиеся фазы АД создают «переключающий механизм». С 2007 по 2021 г. этот «переключающий механизм» привел к росту скорости течений через западную границу Баренцева моря.

В южной и юго-западной части моря среднегодовая теплоотдача, наоборот, уменьшается на $0,5 \dots 1,2 \text{ Вт/м}^2$ в год. В этой части моря разница между ПТВ и ТПМ уменьшается [22], следовательно, и теплоотдача будет от года к году становиться меньше. В работе [22] показано наличие статистически значимого положительного тренда разности между ПТВ и ТПМ для большинства месяцев года. Он наиболее выражен в северной и северо-восточной частях моря, в южной части тренд отрицательный или близок нулю. Статистически значимые величины линейного тренда разности между ПТВ и ТПМ наблюдаются в зимние месяцы в северной и северо-восточной частях моря, а также в некоторые месяцы в западной части. Ледяной покров здесь отсутствует, поэтому факторы, связанные со льдом, влиять не могут.

Изменение адвективного баланса тепла

Для расчета адвективного баланса тепла БМ были использованы данные океанского реанализа GLORYS12V1 [27]. Значения температуры воды, солености, скорости и направления течений выбирались на вертикальных разрезах, пересекающих проливы между БМ и сопредельными водными акваториями (рис. 2). Временная дискретность данных составила 1 сутки, временной интервал — с 1993 по 2018 г.

Расчет адвективного переноса тепла через отдельные разрезы выполнялся в соответствии с алгоритмом, приведенным в статье [23]. Адвективный поток тепла рассчитан как произведение аномалии температуры, скорости течения, плотности воды и теплоемкости при постоянном давлении. Для каждого узла отдельного разреза это произведение интегрировалось по вертикали, чтобы получить суммарный поток тепла и соли через разрез. В качестве референсного значения использовалась среднегодовая температура водной толщи БМ, рассчитанная по данным реанализа (от $1,7$ до $1,9$ °C в зависимости от года).

Рассчитано поступление адвективного тепла для 9 разрезов (рис. 2). Определяющим источником адвективного тепла является поступление атлантических вод из Норвежского моря между м. Нордкап и о. Медвежий (разрез BSO1). Согласно выполненным расчетам, океаническая адвекция через этот разрез на порядок превышает потоки через другие границы моря.

В среднем через разрез BSO1 ежегодно поступает $40,8 \text{ ТВт}$ адвективного тепла (рис. 3). В исследуемый отрезок времени линейный тренд адвективного потока тепла через разрез BSO1 составил $0,14 \text{ ТВт}$ в год.

Адвективный поток, проходящий через разрез BSO2, в среднем за 26 лет составил $1,3 \text{ ТВт}$ (таблица). Вклад потока тепла через разрез BSO2 увеличивался на $0,006 \text{ ТВт}$ в год. Увеличение океанического притока тепла через данные разрезы объясняется механизмом положительной обратной связи в системе океан–атмосфера в Баренцевом море [28]. На увеличение притока тепла в БМ через разрезы BSO1–BSO2 влияет усиление юго-западных ветров в западной части моря [29]. Усиление

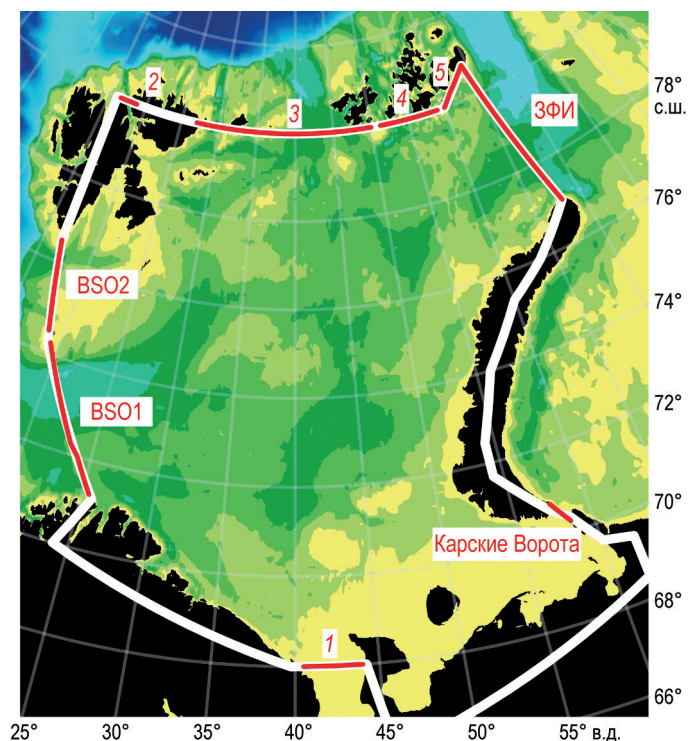


Рис. 2. Пространственное положение разрезов (1, 2, 3, 4, 5, BSO1, BSO2, 3ΦИ, Карские Ворота) на границах Баренцева моря, через которые рассчитывались адвективные потоки тепла

Fig. 2. Spatial position of the sections (1, 2, 3, 4, 5, BSO1, BSO2, 3ΦИ, Карские Ворота) on the borders of the Barents Sea through which advective heat transport was calculated

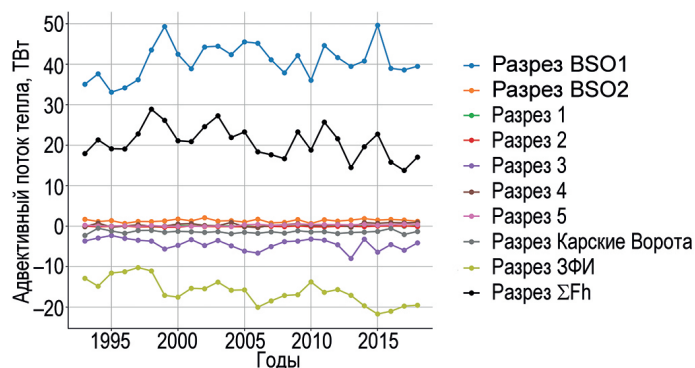


Рис. 3. Среднегодовая адвекция тепла через проливы, соединяющие Баренцево море с соседними морскими акваториями, с 1993 по 2018 г. по данным реанализа GLORIS12V1. Черным цветом показан суммарный адвективный тепловой баланс Баренцева моря

Fig. 3. Average annual advection of heat through the Barents Sea boundaries according to the GLORIS12V1 reanalysis. The total advective heat balance of the Barents Sea is shown in black

Таблица

Статистические характеристики основных адвективных потоков тепла
и суммарного адвективного теплового баланса Баренцева моря (ΣF_h)

Table

Statistical characteristics of the main advective heat fluxes
and the total advective heat balance of the Barents Sea (ΣF_h)

Характеристики	BSO1	BSO2	разрез 3	разрез 3ФИ	ΣF_h
Коэффициент линейного тренда	0,14 ТВт в год	0,006 ТВт в год	-0,06 ТВт в год	-0,32 ТВт в год	-0,26 ТВт в год
Уровень значимости	0,21	0,45	0,033	0,00005	0,053
Среднее	40,8 ТВт	1,3 ТВт	-4,4 ТВт	-14,3 ТВт	20,7 ТВт
Среднеквадратическое отклонение	0,11	0,009	0,03	0,05	0,09

юго-западных ветров происходит вследствие уменьшения площади ледяного покрова и, как следствие, увеличения площади района с интенсивным теплообменом на поверхности моря. За счет этого в нижней тропосфере усиливается циклоническая завихренность, которая увеличивает градиент давления между Шпицбергом и северной частью Норвежского побережья, что и усиливает юго-западные ветра в западной части БМ. Среднегодовые скорости течения через разрезы BSO1–BSO2 в 2007–2021 гг. увеличились на 5 % и уменьшились на 15 % в проливе Фрама относительно 1992–2006 гг. [26].

Через разрез 3ФИ наблюдается поток тепла, который вносит основной отрицательный вклад в адвективный баланс тепла БМ. Поток тепла через разрез 3ФИ составляет в среднем -14,3 ТВт. Отток тепла через данный разрез увеличивался на 0,32 ТВт в год. Усиление скорости течений через разрезы BSO1–BSO2 в 2007–2021 гг. привело к увеличению переноса через разрез 3ФИ на 23 % [26]. Весомый отрицательный поток тепла наблюдается через разрез 3, в среднем он составляет -4,4 ТВт ежегодно, тренд не наблюдается. Несмотря на увеличение отрицательного океанического потока тепла через разрез 3ФИ, суммарный адвективный тепловой баланс моря сохраняется положительным. Средний суммарный адвективный тепловой баланс Баренцева моря составляет 20,7 ТВт и уменьшается на 0,26 ТВт в год.

Как уже указывалось выше, температурный режим моря определяется адвекцией вод из соседних морей и теплообменом между морем и атмосферой. Из рис. 4 видно, что суммарный адвективный тепловой баланс значительно превышает годовой тепловой баланс поверхности. Средний по всей площади моря годовой ТБ поверхности изменялся в интервале от -5 до -10 ТВт (среднее многолетнее значение -7,2 ТВт). То есть, по нашим данным, БМ в среднем теряет 7,2 ТВт в год за счет теплообмена на границе море–атмосфера. Среднегодовая теплоотдача с поверхности моря увеличивается с интенсивностью 0,02 ТВт в год.

Разница между суммарным адвективным потоком тепла и суммарным тепловым балансом поверхности (по модулю) становится меньше со скоростью 0,2 ТВт в год и в большей степени за счет уменьшения адвективного потока тепла. Выраженный отрицательный тренд адвективного потока тепла в БМ отмечается с 2010 г. При этом преобладание количества тепла, переносимого течениями, над теплоотдачей с поверхности моря сохраняется [29, 30]. Адвективное тепло эффективно теряется

за счет интенсивного теплообмена между атмосферой и океаном в границах Баренцева моря. Однако его приходит настолько много, что оно приводит и к увеличению теплоотдачи, и к наблюдаемому повышению температуры вод.

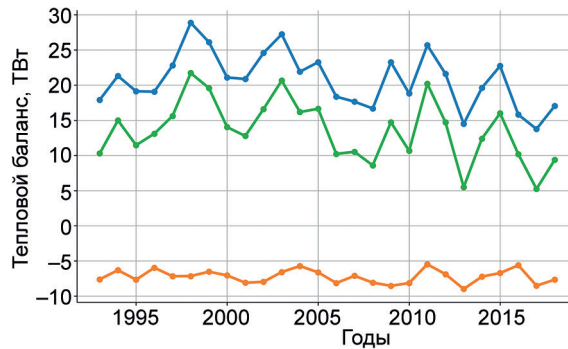


Рис. 4. Среднегодовой суммарный адвективный тепловой баланс (синяя линия); среднегодовой суммарный тепловой баланс поверхности (оранжевая линия); разница между суммарным адвективным тепловым балансом и суммарным тепловым балансом поверхности, взятым по модулю (зеленая линия)

Fig. 4. The average annual total advective heat balance (blue line); the average annual total heat balance of the surface (orange line); the difference between the total advective heat balance and the total heat balance of the surface taken modulo (green line)

Оценка изменения средней температуры вод Баренцева моря

Для оценки изменений средней температуры воды БМ была применена простая боксовая модель, описываемая уравнением (1):

$$\bar{Q}_a + \bar{Q}_s = \bar{Q}_{tot}, \quad (1)$$

где $\bar{Q}_a$ — среднегодовой адвективный тепловой баланс Баренцева моря, Вт; $\bar{Q}_s$ — среднегодовой тепловой баланс поверхности Баренцева моря, Вт; $\bar{Q}_{tot}$ — среднегодовой суммарный тепловой баланс Баренцева моря, Вт.

Подставляя $\bar{Q}_a$ и $\bar{Q}_s$, получаем значение среднегодового суммарного теплового баланса Баренцева моря на временном интервале 1993–2018 гг.: $13,5 \cdot 10^{12}$ Вт = 13,5 ТВт. Нормирование этого значения на площадь поверхности БМ ($S = 1,424 \cdot 10^6$ км² [31]), дает среднегодовое поступление тепла к объему воды единичной площади от поверхности до дна:

$$\bar{Q}_{tot}^* = \frac{\bar{Q}_{tot}}{S} = 9,5 \text{ Вт/м}^2. \quad (2)$$

Это избыточное тепло тратится на нагрев воды и таяние льда:

$$\bar{Q}_{tot}^* = \bar{Q}_T^* + \bar{Q}_i^*, \quad (3)$$

$$\bar{Q}_T^* = \rho c_p H \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (4)$$

$$\bar{Q}_i^* = \rho_i L \frac{\Delta h}{\Delta t}, \quad (5)$$

где $\bar{Q}_T^*$ — компонента суммарного теплового баланса, обеспечивающая изменение температуры воды, Вт/м²; $\bar{Q}_i^*$ — компонента суммарного теплового баланса, обеспечивающая фазовые переходы, Вт/м²; $c_p = 3,99 \cdot 10^3$ Дж/кг/К — удельная теплоемкость морской воды при атмосферном давлении, нулевой температуре и солёности 35 епс [32]; $\rho = 1027,5$ кг/м³ — средняя плотность морской воды; $\rho_i = 920$ кг/м³ — средняя плотность морского льда [33]; $L = 2,97 \cdot 10^5$ Дж/кг — удельная теплота плавления морского льда при солёности 10 епс [34]; $H = 230$ м — средняя глубина БМ [31]; $\Delta T/\Delta t$ — скорость изменения температуры воды; $\Delta h/\Delta t$ — скорость нарастания/таяния льда. Из формул (4) и (5) получаются соотношения для расчета годовых изменений средней толщины льда (6) и средней температуры воды (7):

$$\Delta \bar{h}_{year} = \frac{\gamma \bar{Q}_{tot}^*}{\rho_i L} \delta t, \quad (6)$$

$$\Delta \bar{T}_{year} = \frac{(1-\gamma) \bar{Q}_{tot}^*}{\rho c_p H} \delta t, \quad (7)$$

где $\Delta \bar{h}_{year}$ — среднее изменение толщины льда за год; $\Delta \bar{T}_{year}$ — среднее изменение температуры воды за год; γ — часть суммарного теплового баланса, которая расходуется на таяние льда; $\delta t = 3,536 \cdot 10^7 - 1$ год (в секундах).

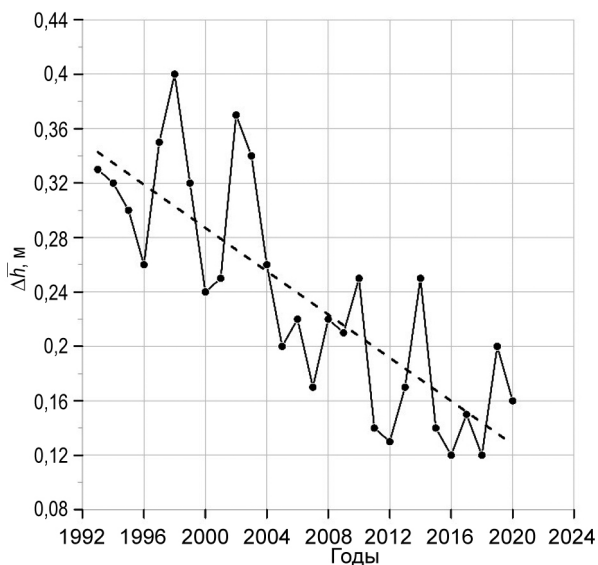


Рис. 5. Расчетное изменение средней толщины льда, стаявшего в течение года на акватории Баренцева моря по данным реанализа GLORYS12V1

Fig. 5. Calculated change in the average thickness of ice that melted during the year in the Barents Sea according to the GLORYS12V1 reanalysis

Величина γ была оценена по среднему изменению толщины льда на всей акватории БМ за год ($\Delta \bar{h}_{year}$) на временном интервале 1993–2018 по данным реанализа GLORYS12V1 [27]. Для этого в каждом узле расчетной сетки реанализа определялась разность максимальной и минимальной среднемесячной толщины льда за каждый год рассматриваемого временного интервала. После этого вычислялось значение $\Delta \bar{h}_{year}$ с учетом зависимости площади ячейки расчетной сетки от географической широты. Результаты расчета представлены на рисунке 5.

Подстановка среднего значения $\Delta \bar{h}_{year} = 0,23$ м в формулу (6) дает величину $\gamma = 0,18$, что позволяет оценить возрастание средней температуры БМ по формуле (7) в $0,28$ °C/год.

Обсуждение и выводы

Согласно представленным в данной статье и других публикациях [35] результатам, в последние 20–25 лет наблюдается возрастание зимней теплоотдачи с поверхности БМ в холодный сезон, что ведет к возрастанию по абсолютной величине среднего годового (отрицательного) теплового баланса поверхности моря. Вероятными причинами этого являются сокращение площади ледяного покрова и повышение температуры поступающих из Норвежского моря вод атлантического происхождения. Обе указанные тенденции способствуют усилению турбулентного потока тепла из моря в атмосферу в холодный сезон, когда температура поверхности моря больше температуры приземного слоя воздуха. В то же время, согласно данным прямых измерений, средняя годовая температура воды во всех основных водных массах БМ существенно повысилась между 2000 и 2016 гг. [1]. Причиной такого расхождения предположительно является возрастание адвективного поступления тепла, которое не только полностью компенсирует уменьшение температуры воды вследствие возрастания теплоотдачи через поверхность моря, но и обеспечивает наблюдаемое повышение температуры воды.

Для количественной проверки этой гипотезы была применена упрощенная боксовая модель БМ, в которой по данным атмосферного и океанского реанализов был рассчитан средний годовой баланс тепла БМ и на его основе оценено изменение средней температуры воды с учетом затрат тепла на таяние льда. Выполненные расчеты показали превышение удельного (отнесенного к объему воды единичной площади от поверхности до дна) среднегодового поступления тепла за счет адвекции над теплоотдачей с поверхности моря на $9,5$ Вт/м². С учетом затрат тепла на среднегодовое таяние льда (18 %), это избыточное поступление тепла обеспечило расчетное повышение температуры воды БМ с 1993 по 2018 г. со скоростью $0,28$ °C/год, или 7 °C за 26 лет. Полученное значение достаточно велико, и возникает вопрос, насколько оно адекватно реальности, тем более с учетом того, что оно получено не по данным измерений, а по данным атмосферного и океанского реанализов.

В статье [1] была выполнена оценка изменений средней температуры в северо-западной части БМ (77 – 79 ° с. ш., 25 – 45 ° в. д.) для трех выделенных по вертикали водных масс: поверхностной (0 – 30 м), промежуточной арктической (30 – 120 м) и атлантической (120 – 250 м). Согласно представленным в [1: fig. 2a, b, c] графикам, с 2000 по 2016 г. возрастание температуры вод в поверхностном слое составило 2 °C, в промежуточном — 4 °C и в атлантическом — $1,5$ °C. Таким образом, средневзвешенное (с учетом толщины слоев) повышение температуры вод БМ в дан-

ном районе составило 2,46 °C за 16 лет, что соответствует скорости потепления 0,15 °C/год. Полученная в данной статье величина потепления превышает значение из статьи [1] почти в 2 раза. Несмотря на это, на наш взгляд, подобное расхождение не является критичным, поскольку, во-первых, тенденции потепления по натурным данным и по данным реанализов совпадают. Во-вторых, результаты, полученные в [1], относятся к сравнительно небольшому району в северо-западной части БМ, тогда как наиболее значимые изменения состояния ледяного покрова и связанные с этим изменения температуры вод произошли в северо-восточной части моря [6].

В заключение можно сделать вывод, что предложенная в данной статье гипотеза — о компенсации теплопотерь с поверхности БМ адвективным потоком тепла — справедлива и количественно подтверждается расчетами на простой боксовой модели (с точностью до порядка величины) по данным атмосферного и океанского реанализов. Необходимо также отметить, что, хотя данные реанализов ERA5 и GLORYS12V1 адекватно описывают базовые закономерности наблюдаемой изменчивости параметров океана, морского льда и атмосферы в Баренцевом море, применение этих данных без привязки к данным прямых наблюдений не гарантирует получения реальных значений гидрометеорологических параметров и производных от этих параметров характеристик.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 24-17-00041.

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation grant 24-17-00041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature Climate Change*. 2018;8(7):634–639. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0205-y>
2. Arthun M., Onarheim I.H., Dörr J., Eldevik T. The seasonal and regional transition to an ice-free Arctic. *Geophysical Research Letters*. 2021;48(1):e2020GL090825. <https://doi.org/10.1029/2020GL090825>
3. Иванов В.В., Архипкин В.С., Лемешко Е.М., Мысленков С.А., Смирнов А.В., Суркова Г.В., Тузов Ф.К., Чечин Д.Г., Шестакова А.А. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в 21-м веке. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2022;1:13–25.
Ivanov V.V., Arkhipkin V.S., Lemeshko Ye.M., Myslenkov S.A., Smirnov A.V., Surkova G.V., Tuzov F.K., Chechin D.G., Shestakova A.A. Changes in hydrometeorological conditions in the Barents Sea as an indicator of climatic trends in the Eurasian Arctic in the 21st century. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Lomonosov Geography Journal*. 2022;(1):13–25. (In Russ.)
4. Moore F.C., Lacasse K., Mach K. J., Shin Y.A., Gross L.J., Beckage B. Determinants of emissions pathways in the coupled climate–social system. *Nature*. 2022;603(7899):103–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04423-8>
5. Skagseth Ø., Eldevik T., Årthun M., Asbjørnsen H., Lien V.S., Smedsrud L.H. Reduced efficiency of the Barents Sea cooling machine. *Nature Climate Change*. 2020;10(7):661–666. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0772-6>
6. Ivanov V.V., Tuzov F.K. Formation of dense water dome over the Central Bank under conditions of reduced ice cover in the Barents Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021;175:103590. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103590>

7. Трофимов А.Г. Современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря. *Труды ВНИРО*. 2021;186:101–118. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-186-101-118>
Trofimov A.G. Current trends in changes in oceanographic conditions of the Barents Sea. *Trudy VNIRO*. 2021;186:101–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-186-101-118>
8. Серых И.В., Костяной А.Г. О климатических изменениях температуры Баренцева моря и их возможных причинах. В кн.: А.П. Лисицын (ред.) *Система Баренцева моря*. М.: ГЕОС; 2021. С. 166–179.
9. Будыко М.И. *Тепловой баланс земной поверхности*. Л.: Гидрометеиздат; 1956. 256 с.
10. Ашик И.М. (ред.). *Моря Российской Арктики в современных климатических условиях*. СПб.: АНИИ; 2021. 360 с.
11. Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Т. (ред.). *Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость*. Мурманск: Изд-во ПИНРО; 2016. 260 с.
12. Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О. *Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана*. Л.: Гидрометеиздат; 1980. 270 с.
13. 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)
14. Dörr J.S., Årthun M., Eldevik T., Madonna E. Mechanisms of regional winter sea-ice variability in a warming Arctic. *Journal of Climate*. 2021;34(21):8635–8653. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0149.1>
15. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. *Journal of Climate*. 2012;25(13):4736–4743. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00466.1>
16. Sorokina S.A., Li C., Wettstein J.J., Kvamstø N.G. Observed atmospheric coupling between Barents Sea ice and the warm Arctic cold-Siberian anomaly pattern. *Journal of Climate*. 2016;29(2):495–511. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0046.1>
17. Cai Z., Yoy Q., Chen H.W., Zhang R., Chen D., Chen J., Kang S., Cohen J. Amplified wintertime Barents Sea warming linked to intensified Barents oscillation. *Environmental Research Letters*. 2022;17(4):044068. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5bb3>
18. ERA5 reanalysis (European analysis, version 5). <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels> (accessed 10.02.2022).
19. Терзиев Ф.С., Гирдюка Г.В. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 1. Баренцево море Вып. 1*. Л.: Гидрометеиздат; 1990. 280 с.
20. Эзау И.Н., Чернокульский А.В. Поля конвективной облачности в Атлантическом секторе Арктики: спутниковые и наземные наблюдения. *Исследование Земли из космоса*. 2015;2:49–63.
Esau I.N., Chernokulsky A.V. Convective cloud fields in the Atlantic sector of the Arctic: satellite and ground based observations. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015;2:49–63. (In Russ.)
21. Narizhnaya A., Chernokulsky A. Cloud characteristics during intense cold air outbreaks over the Barents sea based on satellite data. *Atmosphere*. 2024;15(3):317. <https://doi.org/10.3390/atmos15030317>
22. Сумкина А.А., Иванов В.В., Кивва К.К. Тепловой баланс поверхности Баренцева моря в холодный период года. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2024;(3):123–134. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.10>
Sumkina A.A., Ivanov V.V., Kivva K.K. Heat budget of the Barents Sea surface in winter. *Lomonosov Geography Journal*. 2024;(3):123–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.10>

23. Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В., Смирнов А.В. Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла Атлантическими водами. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022;15(1):82–97. <https://doi.org/10.59887/fpg/1krp-xbuk-6gpz>
Sumkina A.A., Kivva K.K., Ivanov V.V., Smirnov A.V. Seasonal ice removal in the Barents Sea and its dependence on heat advection by Atlantic waters. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(1):82–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.59887/fpg/1krp-xbuk-6gpz>
24. Sumkina A.A., Kivva K.K., Ivanov V.V. Seasonality of heat exchange on the Barents sea surface. *Oceanology*. 2023;63(Suppl 1):S65–S71. <https://doi.org/10.1134/S0001437023070196>
25. Суркова Г.В., Романенко В.А. Изменение климата и теплообмен между атмосферой и океаном в Арктике на примере Баренцева и Карского морей. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021;67(3):280–292. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-280-292>
Surkova G.V., Romanenko V.A. Climate change and heat exchange between atmosphere and ocean in the Arctic based on data from the Barents and the Kara sea. *Arctic and Antarctic Research*. 2021;67(3):280–292. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-280-292>
26. Polyakov I.V., Ingvaldsen R.B., Pnyushkov A.V., Bhatt U.S., Francis J.A., Janout M., Kwok R., Skagseth Ø. Fluctuating Atlantic inflows modulate Arctic atlantification. *Science*. 2023;381:972–979. <https://doi.org/10.1126/science.adh5158>
27. Daily Global Physical Bulletin at 1/12. <http://bulletin.mercator-ocean.fr/en/PSY4#3/75.50/-51.33> (accessed 10.05.2024).
28. Loeng H. Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea. *Polar research*. 1991;10(1):5–18. <https://doi.org/10.3402/polar.v10i1.672>
29. Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The early-twentieth-century warming in the Arctic — a possible mechanism. *Journal of Climate*. 2004;17(20):4045–4057. doi: 10.1175/1520-0442(2004)0172.0.CO;2
30. Arthun M., Schrum C. Ocean surface heat flux variability in the Barents Sea. *Journal of Marine Systems*. 2010;83(1–2):88–98. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2010.07.003>
31. Добровольский А.Д., Залогин Б. С. *Моря СССР*. М.: Изд-во Московского ун-та; 1982. 192 с.
32. Gill A. E. *Atmosphere-ocean dynamics*. Cambridge: Academic press; 1982. 660 p.
33. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. *Морской лед*. Л.: Гидрометеиздат; 1975. 320 с.
34. Maykut G.A. The surface heat and salt balance. In: N. Untersteiner (ed.). *The geophysics of sea ice*. New York: Plenum; 1986. P. 395–463.
35. Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Otterå O.H., Risebrobakken B., Sandø A.B., Semenov V.A., Sorokina S.A. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics*. 2013;51(3):415–449. <https://doi.org/10.1002/rog.20017>