



## Среда обитания водных биологических ресурсов

# Трендовые изменения температуры воды в придонном слое Баренцева моря в летний сезон 2004–2019 гг.

В.А. Ившин

Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича), ул. Академика Книповича, 6, г. Мурманск, 183038  
E-mail: ivshin@pinro.ru

**Цель работы:** определить на акватории Баренцева моря участки, где происходили статистически значимые трендовые изменения температуры воды в придонном слое в период 2004–2019 гг.

**Используемые методы:** проведен анализ временных рядов температуры воды в придонном слое на наличие в их структуре трендовых составляющих, в узлах регулярной сетки с шагом 10' по меридиану и 30' по параллели. Выполнен расчёт корреляционных связей с рядом гидрометеорологических параметров.

**Новизна:** на основе данных наблюдений 2004–2019 гг. в придонном слое Баренцева моря выявлены участки со значимыми тенденциями изменений температуры воды, рассчитаны величины трендовых составляющих.

**Результат:** в период рассматриваемых лет в центральной и южной частях Баренцева моря в придонном слое отсутствуют значимые трендовые изменения температуры воды. Вблизи западной границы арх. Новая Земля выявлена область положительных трендов, где происходит рост температуры на 0,1–0,2 °С/год. В северной части моря выделена акватория убывающих (на 0,1–0,2 °С/год) трендов температуры воды.

**Практическая значимость:** величины трендовых составляющих позволяют судить о темпах изменений температуры воды в придонном слое, анализировать особенности межгодовых колебаний температуры воды, рассматривать возможное влияние на отдельные звенья экосистемной цепи.

**Ключевые слова:** Баренцево море, температура воды, придонный слой, тренды.

## Water temperature trends in the bottom layer of the Barents Sea in the summer season for the period 2004–2019

Victor A. Ivshin

Polar branch of «VNIRO» (N.M. Knipovich «PINRO»), 6, Academician Knipovich St., Murmansk, 183038, Russia

**The aim:** to determine the areas in the Barents Sea where the most significant changes in water temperature in the bottom layer occurred over the last 15 years.

**Methods used:** analysis of time series of water temperature in the bottom layer to identify trends in their structure, at grid nodes with steps of 10' in latitude and 30' in longitude; calculation of correlations with hydro-meteorological parameters.

**Novelty:** areas with significant trends in water temperature in the bottom layer of the Barents Sea were identified on the basis of observations for 2004–2019, and trend coefficients were calculated.

**Result:** for the investigated period, there were no significant changes in water temperature in the bottom layer in the central and southern parts of the Barents Sea. The area of positive trends was found off the western coast of the Novaya Zemlya Archipelago, with an increase in temperature by 0.1–0.2 °C per year. In the northern part of the sea, the area of decreasing trends in water temperature (by 0.1–0.2 °C per year) was identified.

**Practical significance:** trend coefficients make it possible to estimate rates of changes in water temperature in the bottom layer, analyze features of year-to-year variability of water temperature, and consider the possible impact on ecosystem components.

**Keywords:** Barents Sea, water temperature, bottom layer, trends.

### ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море относится к окраинным арктическим морям, и одной из главных его особенностей является широкомасштабное поступление атлантических вод через западную границу. Усиленная адвекция тепла течениями, отмечающаяся в период последних лет [Watelet et al., 2020; Asbjornsen et al., 2020], оказывает влияние на многие геофизические процессы, происходящие в Арктике [Lind et al., 2018]. Повышенный пере-

нос атлантических вод приводит к тому, что в последние десятилетия в арктическом регионе отмечается общее уменьшение ледяного покрова во все климатические сезоны года [Cavalieri, Parkinson, 2012; Årthun et al., 2019], изменяется баланс тепловой энергии [Lee et al., 2017], особенности атмосферной [Ogawa et al., 2018] и океанической [Sévellec et al., 2017] циркуляций, а также функционирование экосистемы в целом [Loeng, Drinkwater, 2007; Årthun et al., 2018].

Температура воды в деятельном слое Баренцева моря сильно меняется в течение нескольких последних десятилетий [Levitus et al., 2009; Voitsov et al., 2012]. В среднем она была относительно низкой в начале прошлого века и в 1970-х гг., её повышенные значения отмечались в 1930–50-х гг. и в 1990-е гг. Температура на глубине 100–150 м повысилась примерно на 4 °C с конца 1970-х до конца 2000–2010-х гг. [Levitus et al., 2009]. В последние десятилетия отмечается повышение теплосодержания вод на входе в Баренцево море (в среднем на 1 °C), что обусловлено усилением адвективного переноса тепла течениями [Skagseth et al., 2008; Årthun et al., 2012]. В целом, не смотря на то, что изменчивость температуры воды в Баренцевом море имеет относительно сложный частотный спектр колебаний, тем не менее в его структуре проявляется выраженный положительный тренд [Voitsov et al., 2012].

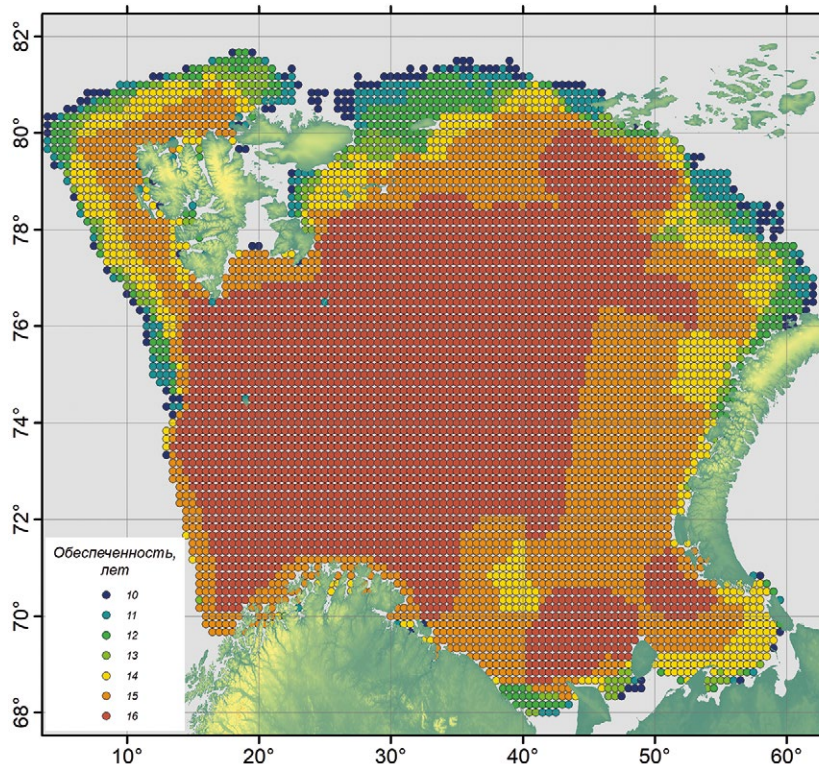
Значительные изменения температуры воды в последние годы также фиксируются в придонном слое Баренцева моря. У дна существенно сокращаются участки моря, занятые водами с отрицательными температурами. Так, от начала 2000-х к концу 2010-х гг. площадь с придонными значениями температуры ниже 0 °C сократилась в несколько раз, а в их межго-

довой изменчивости прослеживается выраженный убывающий тренд [Карсаков и др., 2018].

Изучение трендов температуры воды является актуальным в настоящее время. В период значительных изменений климатических условий необходимо учитывать реакцию экосистемы на тепловое воздействие, иметь представление о географическом положении зон, где оно проявляется наиболее ярко, и знать количественные его характеристики. Одним из способов оценки межгодовых флуктуаций теплосодержания вод является изучение изменчивости трендовой составляющей в колебаниях температуры воды. Данный показатель позволяет количественно оценить интенсивность протекающих процессов и имеет прогностическую ценность.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовались данные температуры воды придонного слоя, которые были получены во время проведения океанографических наблюдений в совместных российско-норвежских экосистемных съёмках в Баренцевом море и прилегающих водах Северного Ледовитого океана за период 2004–2019 гг., проводимых ежегодно в августе-сентябре совместно специалистами Полярного филиала ФГБНУ «ВНИРО»



**Рис. 1.** Положение узлов сетки с разными длинами рядов температуры (°C) воды в придонном слое в августе-сентябре 2004–2019 гг.

**Fig. 1.** Location of grid nodes with different lengths of water temperature (°C) series in the bottom layer in August-September 2004–2019

и Института морских исследований (г. Берген, Норвегия). В этот период года море максимально открыто ото льда, и сетка съёмки достаточно плотно покрывает его станциями наблюдений. Несмотря на то, что сроки работ достаточно жёсткие, тем не менее присутствуют межгодовые вариации в датах точек наблюдений. Анализ связи между полученными данными и приведёнными на одну дату в точках наблюдений показал тесную связь ( $r > 0,9$ ) между ними [Ellingsen et al., 2020], что позволяет пренебречь этой разницей.

На основании собранных данных для каждого года проводилась интерполяция придонной температуры воды в узлы сетки с шагом  $10'$  по меридиану и  $30'$  по параллели. Расчёт значений в узлах регулярной сетки осуществлялся методом триангуляции с линейной интерполяцией, реализованным в среде Surfer.<sup>1</sup> Построенные поля обобщались, и в узлах одноименных точек формировались временные ряды температуры воды в придонном слое. К анализу привлекались узлы расчётной сетки, с длиной ряда, как минимум, 10 лет (рис. 1).

Как видно из приведённого выше рисунка, большая часть акватории моря имеет обеспеченность данными, длиной временного ряда океанографических наблюдений продолжительностью 14–16 лет.

Для каждого узла регулярной сетки ( $x, y$ ) придонной температуры воды были определены параметры уравнения линейного тренда. Его статистическая достоверность определялась по величине выборочного коэффициента корреляции (извлечение квадратного корня из коэффициента детерминации) для  $p < 0,05$  и  $n = 10 \div 16$  (табл. 1).

**Таблица 1.** Критические значения выборочного коэффициента корреляции

**Table 1.** Critical values of the sample correlation coefficient

Число степеней свободы, $n-2$	Уровни значимости, $p=0,05$
8	0,632
9	0,602
10	0,576
11	0,553
12	0,532
13	0,514
14	0,497

Статистическая значимость тренда для анализируемых временных рядов основывалась на превышении

величины критического значения  $R^2$ , характеризующего его вклад в дисперсию исходных данных.

Одними из показателей активности атмосферной циркуляции являются циклоны, прохождение которых характеризуется резким изменением значений ряда метеозлементов: атмосферного давления, температуры воздуха, осадков, усиления скорости ветра и пр. Кроме того, циклоны играют важную роль в формировании атмосферных процессов, они отвечают за перенос тепла и влаги и тесно связаны с опасными явлениями погоды. Увеличение количества штормовых дней может повлиять на величину переноса тёплых атлантических вод в Баренцево море [Skagseth et al., 2008] и отразиться на повышении теплосодержания вод в целом, а также общем тепловом балансе системы океан–атмосфера, в частности. Изменчивость циклонической активности атмосферной циркуляции косвенно оценивалась по суммарному количеству штормовых (с ветром 15 м/с и более) дней за год в западной, центральной и восточной частях Баренцева моря для периода 2004–2019 гг., по данным, предоставленным ФГБУ «Мурманское УГМС».

Учёт влияния ледовых условий основывался на данных по ледовитости Баренцева моря, также предоставленных ФГБУ «Мурманское УГМС». В работе рассматривались ряды её среднемесячных значений за июль (период максимального таяния полей льда в Баренцевом море) для периода 2004–2019 гг.

Оценка теплового состояния вод моря проводилась на основе средневзвешенных значений температуры воды на разрезе «Кольский меридиан»<sup>2</sup> в апреле на станциях 3–7 (участок  $70^{\circ}30' - 72^{\circ}30'$  с. ш. и  $33^{\circ}30'$  в. д.) в слое 0–200 м, во время сезонного минимума (апрель) в период 2004–2019 гг.

Межгодовые колебания температуры приземного воздуха<sup>3</sup> оценивались на данных наблюдений на метеорологических станциях Канин Нос ( $68^{\circ}39'$  с. ш. и  $43^{\circ}18'$  в. д.) и Свальбард (арх. Шпицберген) ( $78^{\circ}15'$  с. ш. и  $15^{\circ}30'$  в. д.), расположенных в юго-восточной и северо-западной частях моря, соответственно.

Для количественных показателей динамики вод Баренцева моря привлекались данные расчётов гидродинамической модели, предоставленные Трофимовым А.Г., характеризующие расходы вод в сечении основных ветвей тёплых и холодных течений от поверхности до дна [Трофимов, 2000].

<sup>2</sup> Разрез «Кольский меридиан». Доступно через: <http://www.pinro.ru/labs/hid/kolsec22.php> 24.01.2022.

<sup>3</sup> Погода и климат. Доступно через: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/22165.htm>. 24.01.2022.

<sup>1</sup> Surfer 8. User's Guide. 2002. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientist and Engineers. Golden Software Inc., 640 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В узлах сетки с обеспеченностью данными не менее чем за десять лет для температуры воды придонного слоя Баренцева моря было рассчитано более 6000 уравнений линейного тренда. Проведённый анализ параметра скорости изменения температуры воды во времени показал, что на большей части акватории моря (преимущественно, в его центральной области) статистически значимых трендов в рассматриваемый период не существует, тем не менее любой новый член ряда может оказать существенное влияние на тенденцию изменчивости. Области значимых трендов, определённых по величине коэффициента детерминации с учётом длины ряда в узлах сетки, представлены на рис. 2.

Картирование трендовых составляющих (коэффициентов  $b_1$ ) на акватории моря выявило достаточно неоднородную их структуру как в значениях, так и по знаку (рис. 3).

В целом, всю рассматриваемую область исследований можно условно разделить на четыре района:

– запад – район с высокими (более  $0,3$  °C/год) положительными трендами, наблюдаемыми на свале глубин;

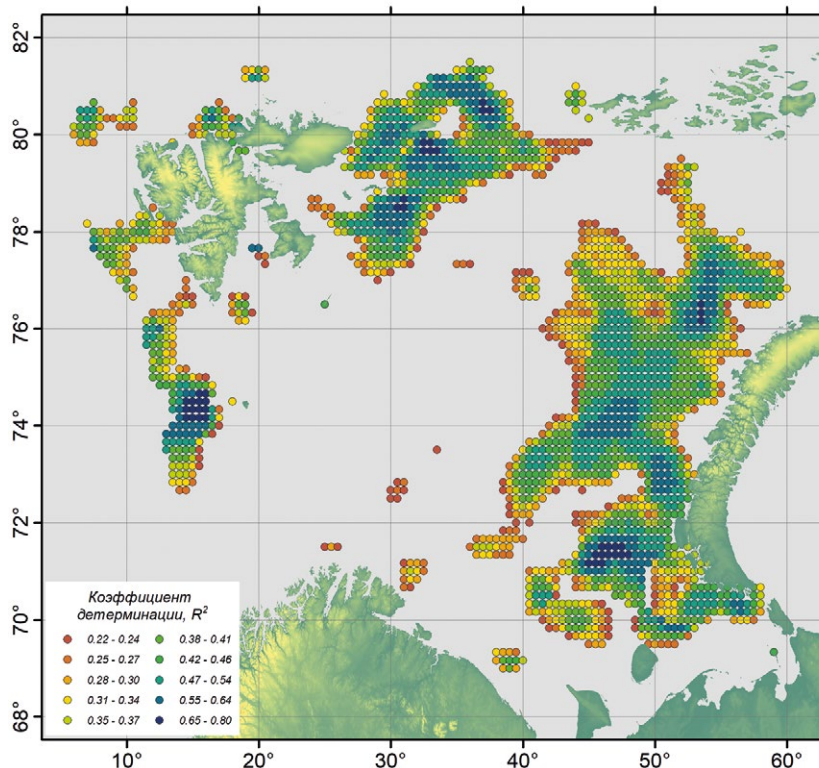
– центр – обширная область по протяжению как с севера на юг, так и с запада на восток, с не значимыми значениями трендов;

– восток – прилегающие акватории западного побережья архипелага Новая Земля, а также северная часть Канино-Печорского региона, где отмечаются положительные тренды со значениями  $0,1–0,2$  °C/год;

– север – локальная область между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, где отмечаются отрицательные тренды ( $0,1–0,2$  °C/год) в изменениях температуры воды в придонном слое.

Представленная область в западной части Баренцева моря, располагающаяся на свале глубин, была исключена из рассмотрения, т. к. на её образование в значительной мере может оказывать влияние топографический эффект в случаях, когда к одному узлу в разные годы привязаны станции, имеющие существенные различия по глубине наблюдений.

Выявленные значимые участки трендов были локализованы в двух основных областях, одна из которых располагалась в восточной части Баренцева моря, в зоне влияния вод Новоземельского течения и течения Литке, где отмечался рост значений температуры на  $0,12–0,18$  °C/год, а другая – в районе



**Рис. 2.** Распределение коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) изменения температуры воды в придонном слое в августе-сентябре 2004–2019 гг. Серым цветом отмечены участки не значимых корреляций

**Fig. 2.** Distribution of determination coefficients ( $R^2$ ) for changes in water temperature in the bottom layer in August-September 2004–2019. Areas with insignificant correlations are marked in grey

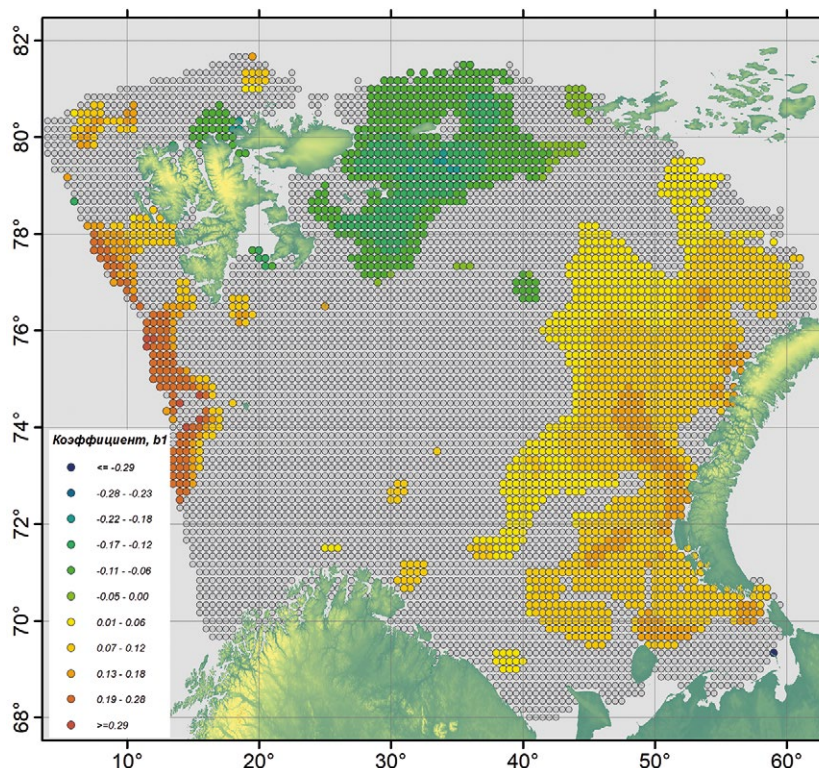


Рис. 3. Распределение коэффициентов линейного тренда температуры воды в придонном слое в августе-сентябре для периода 2004–2019 гг.

Fig. 3. Distribution of coefficient linear trends in water temperature near the bottom in August-September 2004–2019

между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, где температура воды значительно уменьшалась в пределах 0,05–0,19 °C/год.

Осреднённые значения температуры воды в областях значимых положительных (восточнее 40° в. д.) и отрицательных (севернее 76° с. ш.) трендов представлены на рис. 4.

Как видно из приведённых графиков температура воды значительно уменьшалась со временем (в среднем на 0,11 °C/год) в северных областях, где на трендовую составляющую приходилось более 57% общей дисперсии. На востоке моря отмечался межгодовой

прирост температуры воды (в среднем на 0,08 °C/год), на тренд приходилось почти 50% общей дисперсии.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Региональные особенности Баренцева моря представляют собой сложный механизм взаимодействия отдельных гидрометеорологических факторов, где изменения характеристик одного или нескольких процессов приводят к инерционному отклику в других. Изменения температуры воды в Баренцевом море во многом определяются колебаниями теплового баланса между горизонтальным переносом тепла течения-

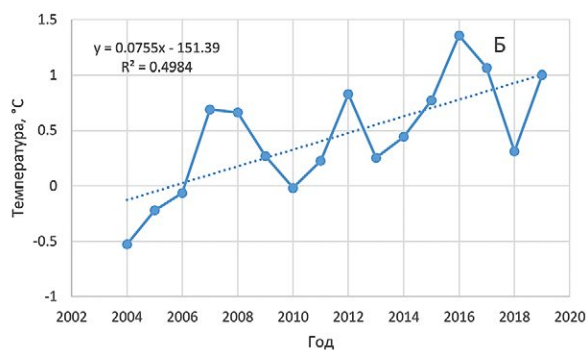
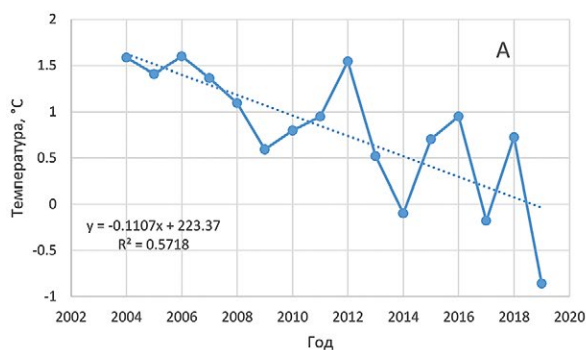


Рис. 4. Межгодовая изменчивость температуры воды в придонном слое на севере (А) и востоке (Б) акватории исследований

Fig. 4. Interannual variability of water temperature in the bottom layer in the north (A) and east (B) of the study area

ми, его отдачей в атмосферу, а также солнечной радиацией [Гидрометеорология и гидрохимия..., 1990].

Атмосферная циркуляция играет важную роль в глобальном энергетическом балансе, перераспределяя тепло и влагу среди регионов. В североатлантическом секторе основная часть переноса влаги и тепла в Арктику осуществляется циклонами [Sorteberg, Walsh, 2008; Dufour et al., 2016]. Одной из особенностей последних лет является увеличение количества штормовых дней с наибольшим их приростом в северо-, северо-восточной частях Баренцева моря [Long, Perrie, 2017].

Увеличение количества дней с циклоническим характером барического поля над Баренцевым морем в последние годы приводит к росту повторяемости штормов, которые достаточно чётко прослеживаются в западной, центральной и восточной частях Баренцева моря (рис. 5).

Наиболее ощутимый среднегодовой прирост (50 дней / 10 лет) количества штормовых дней отмечается в восточной части Баренцева моря, где колебания этого параметра изменились от 100 дней/год в начале рассматриваемого периода до более 160 дней/год в конце.

В арктических морях в период последних лет отмечаются рекордные значения температуры приводного слоя атмосферы [Comiso, Hall, 2014]. По данным метеорологической станции Канин Нос, расположенной в восточной части Баренцева моря на одноименном мысе, и станции Свальбард (арх. Шпицберген), наблюдается рост среднегодовой температуры воздуха

с абсолютным максимумом в 2016 г. за весь период наблюдений, начиная с 1915 г. (рис. 6).

Наиболее выраженный тренд температуры воздуха отмечается в северной части моря на станции Свальбард, на долю которого приходится около 20% общей изменчивости. При этом, в среднем, межгодовой прирост значений температуры воздуха составляет 0,11 °С/год.

Последствия продолжающегося потепления климата в Арктике, в основном, связаны с быстрым уменьшением площади морского льда в последние несколько десятилетий, которое, по многочисленным климатическим моделям, сохранится на протяжении всего двадцать первого века [Ding et al., 2017]. Ледовитость в Баренцевом море имеет высокую межгодовую (рис. 7) и сезонную изменчивость и может отличаться год от года в несколько раз [Гидрометеорология и гидрохимия..., 1990].

Несмотря на общее уменьшение ледового покрова в Баренцевом море, выраженных трендов в рассматриваемый период в среднемесячных и среднегодовых рядах данных ледовитости не прослеживается. Относительно выраженный тренд этого параметра (вклад в общую дисперсию около 24%) сохраняется только в июле, в другие месяцы года, как правило, он не превышает 5%.

Отличительной особенностью динамики вод Баренцева моря является наличие на его акватории потоков тёплых атлантических и холодных арктических вод. Колебания общего переноса атлантических вод, их температуры и солёности оказывают влияние

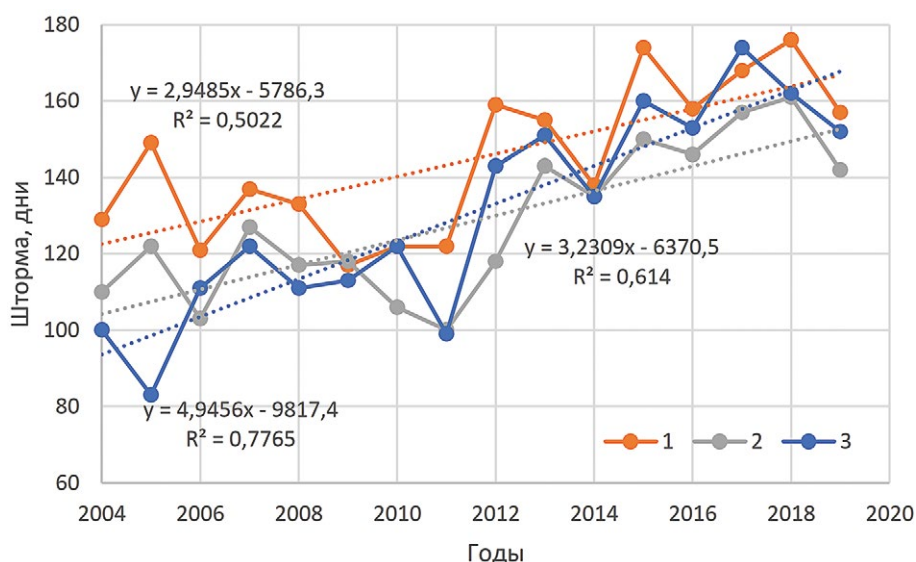
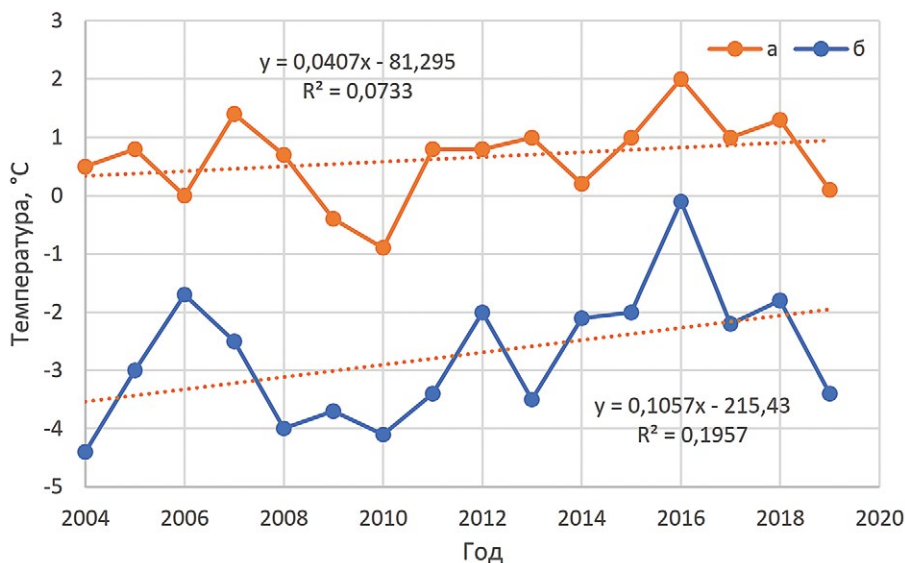


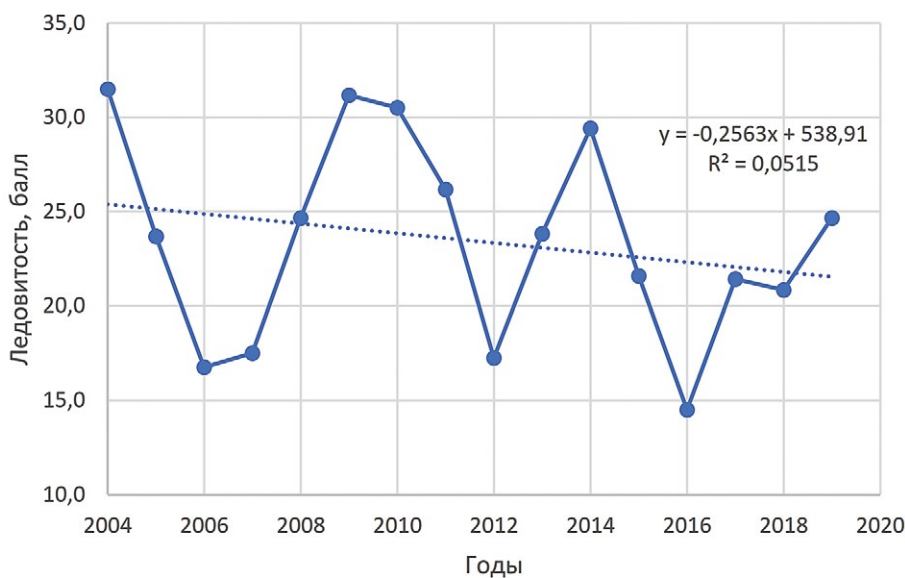
Рис. 5. Суммарное за год количество штормовых дней в западной (1), центральной (2) и восточной (3) частях Баренцева моря

Fig. 5. Annual number of storm days in the western (1), central (2) and eastern (3) Barents Sea



**Рис. 6.** Среднегодовая температура воздуха (°C) на метеорологических станциях Канин Нос (а) и Свальбард (б) в 2004–2019 гг.

**Fig. 6.** Monthly mean air temperature (°C) at the Kanin Nos meteorological station in April 2004–2019



**Рис. 7.** Изменение среднегодовой ледовитости (балл) Баренцева моря в период 2004–2019 гг.

**Fig. 7.** Changes in the annual mean ice coverage (point) of the Barents Sea for the period 2004–2019

на океанографические условия не только Баренцева моря, но и всего Арктического бассейна в целом, и связаны с крупномасштабными процессами в атмосфере. Водообмен с арктическим бассейном, в основном, происходит через северную границу моря, при этом в Баренцево море поступают холодные, распреснённые воды [Ожигин и др., 2016].

Оценка динамических условий в сентябре (период максимальной интенсивности циркуляции вод [Гидрометеорология и гидрохимия..., 1990]) 2004–2019 гг. проводилась в восточной части моря в грани-

цах Новоземельского (74°20' с. ш., 45–54° в. д.) и в западной – на участках Медвежинского (74°20' с. ш., 20–25° в. д.) течений. Анализ данных не показал наличия значимых трендов в объёме расходов вод через данные сечения (рис. 8).

Из приведённого рис. 8 видно, что интенсивность Медвежинского течения в рассматриваемый период в среднем (на –0,02 Св) была ниже нормы, т. е. перенос арктических вод через акваторию моря был ослабленным. Перенос вод атлантического происхождения, на рассматриваемом участке

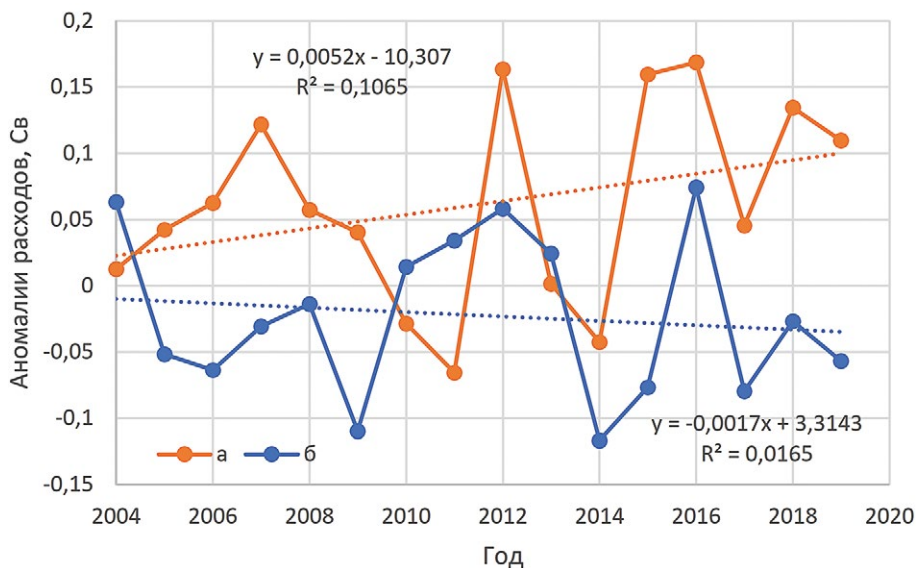


Рис. 8. Аномалии расходов вод (Св) в сентябре на участках Новоземельского (а) и Медвежинского (б) течений  
 Fig. 8. Anomalies of water fluxes (Sv) in the Novaya Zemlya (a) and Bear Island (b) currents in September

Новоземельского течения, превосходил на 0,06 Св среднееголетние значения. В межгодовой динамике изменчивости расходов вод на этом участке присутствовал слабовыраженный положительный тренд, на долю которого приходилось около 11% общей изменчивости.

С начала 1990-х гг. в Баренцевом море отмечается потепление вод. По данным наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» с 2000-х гг. температура воды деятельного слоя (0–200 м) превышала среднеего-

летние значения, с пиком среднегодовых показателей в 2012 и 2016 гг. [Трофимов и др., 2018].

Анализ изменчивости температуры воды в период сезонного минимума в слое 0–200 м на 3–7 станциях разреза «Кольский меридиан» показал наличие незначительного положительного тренда в рассматриваемые годы (рис. 9).

Согласно полученным расчётам, на долю трендовой составляющей приходится около 11% общей изменчивости представленного временного ряда тем-

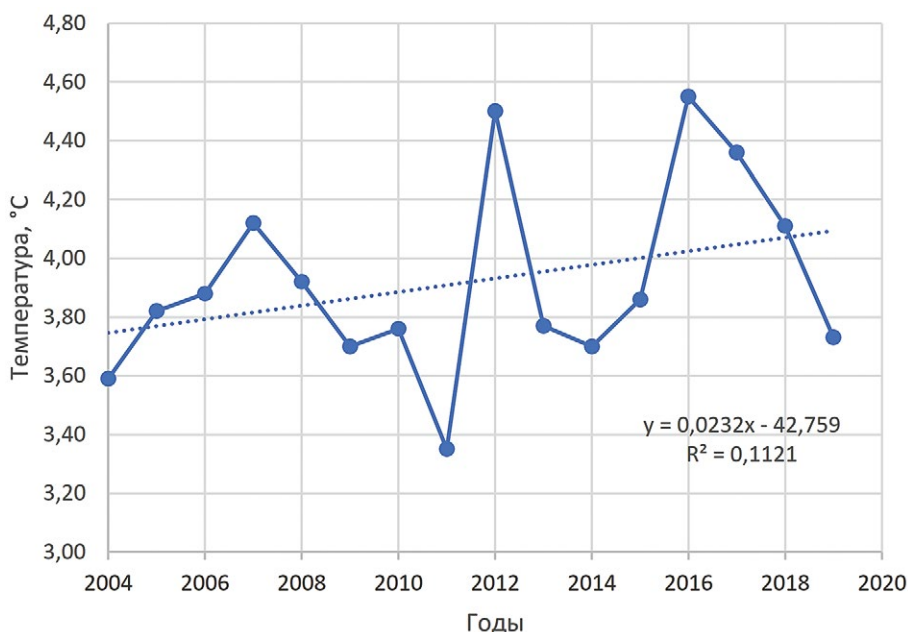


Рис. 9. Температура воды (°C) на 3–7 станциях разреза «Кольский меридиан» в слое 0–200 м в апреле в 2004–2019 гг.  
 Fig. 9. Water temperature (°C) in the 0–200 m layer at stations 3–7 of the Kola Section in April 2004–2019



пературы воды. Как видно из приведённого графика, в последние три года происходит снижение (на 0,8 °C) термического содержания вод, что в свою очередь отражается на ослаблении трендовой составляющей.

Вероятно, особенности изменчивости рассмотренных характеристик среды (шторма, ледовые условия, температура воды и воздуха, интенсивность течений) являются потенциальными факторами, влияющими на образование зон с выраженными трендами температуры воды в придонном слое.

В ходе расчётов были получены количественные оценки связи на основе коэффициентов парной корреляции (табл. 2) между переменными, представленными на рис. 4 (изменение температуры в областях положительных/отрицательных трендов), и параметрами среды (см. рис. 5–9).

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции между температурой воды в придонном слое на участках негативных (T<sub>-</sub>) и позитивных (T<sub>+</sub>) трендов и параметрами среды, представленными на рис. 5–9. Жирным шрифтом отмечены значимые коэффициенты корреляции ( $n=16, p<0,05$ )

**Table 2.** Correlation coefficients between water temperature in the bottom layer in the areas with negative (T<sub>-</sub>) and positive (T<sub>+</sub>) trends and environmental parameters shown in Fig. 5–9. Significant correlation coefficients are marked in bold type ( $n=16, p<0,05$ )

Параметр	T <sub>-</sub>	T <sub>+</sub>
Шторма, запад	-0,321	<b>0,547</b>
Шторма, центр	<b>-0,575</b>	<b>0,709</b>
Шторма, восток	<b>-0,560</b>	<b>0,587</b>
Температура воздуха на ст. Канин нос	0,167	0,475
Температура воздуха на ст. Свальбард	-0,021	<b>0,565</b>
Среднегодовая ледовитость моря	-0,253	<b>-0,547</b>
Расход вод Новоземельское течение	0,118	<b>0,583</b>
Расход вод Медвежинское течение	0,476	-0,040
Температура воды на разрезе «Кольский меридиан», апрель	0,106	<b>0,653</b>

На картах распределения показателя трендовой скорости изменения температуры воды (см. рис. 3) в придонном слое отчётливо прослеживаются две области: положительная – в восточной части моря и отрицательная – на севере между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. На формирование первой (положительной) значимое влияние могут оказывать практически все рассмотренные параметры, за исключением расходов вод в плоскости холодного Медвежинского течения. В выделенных областях положительных трендов отмечаются ежегодные приро-

сты значений температуры воды в придонном слое, которые могут достигать 0,2 °C/год и более.

Большая область отрицательных трендов сосредоточена на участке 78–81° с. ш. и 25–40° в. д. В целом, мелководная шельфовая зона к востоку от архипелага Шпицберген является районом формирования арктических глубоководных и промежуточных вод в Баренцевом море [Haarpaintner et al., 2001].

Несмотря на общее повышение теплового фона вод Баренцева моря, на этой акватории происходит достаточно ощутимое понижение температуры, которое в придонном слое может составлять 0,10–0,15 °C/год. Температура воды в северной части моря имеет тенденцию к снижению в результате усиленного взаимодействия океан-атмосфера, связанного с уменьшением полей льда [Long, Perrie, 2017]. По данным модельных расчётов [Long, Perrie, 2015], на этих участках за счёт открытой поверхности в атмосферу уходит большое количество тепла, а температура воды приобретает тенденцию к снижению. Кроме того, уменьшение полей морского льда приводит к значительному снижению величины альбедо поверхности, что влияет на увеличение поглощения солнечной радиации летом, но при этом в остальные сезоны года возрастают потери тепла моря за счёт турбулентных потоков тепла и длинноволнового излучения в атмосферу [Long, Perrie, 2017]. Возможно, дефицит льда на севере моря в течении продолжительного времени года сводит к длительному периоду контакта арктических воздушных масс с водной поверхностью, при этом происходит интенсивное охлаждение вод и увеличение их плотности. В периоды относительно холодных лет присутствующий лёд на севере моря является своеобразным изолятором в области взаимодействия воздушных и водных масс. Он принимает на себя основной пресс потока холода из атмосферы, увеличиваясь при этом в вертикальных масштабах, тем самым препятствуя процессам интенсивной конвекции.

Результаты корреляционного анализа (см. табл. 2) для областей отрицательных трендов также косвенно подтверждают выдвинутые предположения. Из всех рассмотренных параметров среды только количество штормовых дней может оказывать влияние на развитие этих областей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе проведённых исследований были выделены области со значимыми трендами в межгодовых изменениях температуры воды придонного слоя. По данным проведённых расчётов область позитивных трендов температуры воды в придонном слое распределяется на участках к западу от архи-

пелага Новая Земля, где отмечается рост значений температуры на 0,12–0,18 °С/год. Негативные тренды (с уменьшением температуры в пределах 0,05–0,19 °С/год) сосредоточены на участке между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа.

Эти области расположены на участках, отдалённых от основных потоков течений атлантических и арктических вод, где влияние интенсивности циркуляции вод ослабевает. В связи с чем изменение термического фона имеет инерционный характер и происходит в более длительные сроки, чем на участках основных потоков вод.

На участках со значимыми позитивными трендами обнаружена значимая связь с количеством штормов, температурой воздуха и воды, ледовыми условиями, а также динамикой вод в системе тёплых течений. В районах с негативными тенденциями изменения температуры воды значимые, обратные корреляционные связи были обнаружены только с количеством штормовых дней.

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания «ПИНРО» им. Н.М. Книповича по теме «Оценка состояния, распределения, численности и воспроизводства водных биологических ресурсов, а также среды их обитания».

### ЛИТЕРАТУРА

- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. 1990. Л.: Гидрометеоздат. Т. 1. Вып. 1. 280 с.
- Карсаков А.Л., Трофимов А.Г., Титов О.В. 2018. Основные особенности условий среды в Баренцевом море в 2017 г. // Труды ВНИРО. Т. 173 С. 17–32.
- Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю. 2016. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО. 260 с.
- Трофимов А.Г. 2000. Численное моделирование циркуляции вод в Баренцевом море. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 42 с.
- Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Ившин В.А. 2018. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека // Труды ВНИРО. Т. 173. С. 79–91.
- Årthun M., Bogstad B., Daewel U., Keenlyside N., Sandø A., Schrum C., Ottersen G. 2018. Climate based multi-year predictions of the Barents Sea cod stock // PLOS ONE. V. 13. doi: [10.1371/journal.pone.0206319](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206319).
- Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H. 2019. The role of Atlantic heat transport in future Arctic winter sea ice loss // J. of Climate. V. 32. № 11. P. 3327–3341.
- Asbjornsen H., Arthun M., Skagseth O., Eldevik T. 2020. Mechanisms underlying recent Arctic Atlantification. // Geophysical research letters. V. 47. № 15. doi: [10.1029/2020GL088036](https://doi.org/10.1029/2020GL088036).
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. of Marine Science. V. 69 (5). P. 833–840.
- Cavaliere D., Parkinson C. 2012. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. // Cryosphere. V. 6. № 4. P. 881–889.
- Comiso J., Hall D. 2014. Climate trends in the Arctic as observed from space // WIREs Climate Change. V. 5. № 3. P. 389–409.
- Ding Q., Schweiger A., L'Heureux M., Battisti D., PoChedley S., Johnson N., Blanchard-Wrigglesworth E., Harnos K., Zhang Q., Eastman R. 2017. Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice // Nature Climate Change. V. 7. P. 289–295
- Dufour A., Zolina O., Gulev S. 2016. Atmospheric moisture transport to the Arctic: Assessment of reanalyses and analysis of transport components // J. of Climate. V. 29. № 14. P. 5061–5081.
- Ellingsen K., Yoccoz N., Tveraa T., Frank K., Johannesen E., Anderson M., Dolgov A., Shackell N. 2020. The rise of a marine generalist predator and the fall of beta-diversity. // Global Change Biology. V. 26. № 5. P. 2897–2907.
- Haarpaintner J., O'Dwyer J., Gascard J., Haugan P., Schauer U., Østerhus S. 2001. Seasonal transformation of water masses, circulation and brine formation observed in Storfjorden, Svalbard // Annals of Glaciology. V. 33. P. 437–443.
- Jakobsson M., Mayer L., Brिंगensparr C. et al. 2020. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0. 2020. // Scientific Data. V. 7. № 176. doi: [10.1038/s41597-020-0520-9](https://doi.org/10.1038/s41597-020-0520-9).
- Lee S., Gong T., Feldstein S., Screen J., Simmonds I. 2017. Revisiting the cause of the 1989–2009 Arctic surface warming using the surface energy budget: Downward infrared radiation dominates the surface fluxes. // Geophysical Research Letters. V. 44. P. 10654–10661.
- Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. 2009. Barents Sea multidecadal variability // Geophysical Research Letters. V. 36 L19604. <https://doi.org/10.1029/2009GL039847>.
- Lind S., Ingvaldsen R., Furevik T. 2018. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. // Nature Climate Change. V. 8. P. 634–639.
- Long Z., Perrie W. 2015. Scenario Changes of Atlantic Water in the Arctic Ocean // Journal of Climate. V.28 № 14 P. 5523–5548. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00522.1>.
- Long Z., Perrie W. 2017. Changes in Ocean Temperature in the Barents Sea in the Twenty-First Century // J. of Climate. V.30 № 15 P. 5901–5921. [https://DOI10.1175/JCLI-D-16-0415.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0415.1).
- Loeng H., Drinkwater K. 2007. An overview of the ecosystems of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability // Deep-Sea Research II. V. 54. № 23–26. P. 2478–2500.

- Ogawa F., Keenlyside N., Gao Y., Koenigk T., Yang S., Suo L., Wang T., Gastineau G., Nakamura T., Cheung H., Omrani N.-E., Ukita J., Semenov V. 2018. Evaluating impacts of recent Arctic sea ice loss on the Northern Hemisphere winter climate change // *Geophysical Research Letters*. V. 45. P. 3255–3263.
- Sévellec F., Fedorov A., Liu W. 2017. Arctic sea-ice decline weakens the Atlantic meridional overturning circulation // *Nature Climate Change*. V. 7. P. 604–610.
- Skagseth, Ø., Furevik T., Ingvaldsen R., Loeng H., Mork K., Orvik K., Ozhigin V. 2008. Volume and heat transports to the Arctic Ocean via the Norwegian and Barents Seas // *Arctic–Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate* / R. Dickson, J. Meincke, P. Rhines, eds. Springer. 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).
- Sorteberg A., Walsh J. 2008. Seasonal cyclone variability at 70°N and its impact on moisture transport into the Arctic // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. V. 60. № 3. P. 570–586.
- Watelet S., Skagseth Ø., Lien V., Sagen H., Østensen Ø., Ivshin V., Beckers J.-M. 2020. A volumetric census of the Barents Sea in a changing climate. // *Earth System Science Data*. V. 12. P. 2447–2457.
- Zhang P., Wu Y., Chen G., Yu Y. 2020. North American cold events following sudden stratospheric warming in the presence of low Barents-Kara Sea sea ice // *Environmental Research Letters*. V. 15. № 12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc215>
- REFERENCES**
- Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR*. 1990. Leningrad: Gidrometeoizdat Press. V. 1. Iss. 1. 280 pp.
- Karsakov A.L., Trofimov A.G., Titov O.V. 2018. Main features of the environmental conditions in the Barents Sea in 2017 // *Trudy VNIRO*. V. 173 P. 17–32.
- Ozhigin V.K., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Anciferov M.Y. 2016. The Barents Sea Water: structure, circulation, variability. Murmansk: PINRO. 260 pp.
- Trofimov A.G. 2000. Numerical modelling of water circulation in the Barents Sea. Murmansk: PINRO Press. 42 pp.
- Trofimov A.G., Karsakov A.L., Ivshin V.A. 2018. Climate changes in the Barents Sea over the last half century // *Trudy VNIRO*. V. 173. P. 79–91.
- Årthun, M., Bogstad B., Daewel U., Keenlyside N., Sandø A., Schrum C., Ottersen G. 2018. Climate based multi-year predictions of the Barents Sea cod stock // *PLOS ONE*. V. 13. doi. [org/10.1371/journal.pone.0206319](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206319).
- Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H. 2019. The role of Atlantic heat transport in future Arctic winter sea ice loss // *J. of Climate*. V. 32. № 11. P. 3327–3341.
- Asbjørnsen H., Arthun M., Skagseth O., Eldevik T. 2020. Mechanisms underlying recent Arctic Atlantification. // *Geophysical research letters*. V. 47. № 15. doi: 10.1029/2020GL088036.
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // *ICES J. of Marine Science*. V. 69 (5). P. 833–840.
- Cavaliere D., Parkinson C. 2012. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. // *Cryosphere*. V. 6. № 4. P. 881–889.
- Comiso J., Hall D. 2014. Climate trends in the Arctic as observed from space // *WIREs Climate Change*. V. 5. № 3. P. 389–409.
- Ding Q., Schweiger A., L'Heureux M., Battisti D., PoChedley S., Johnson N., Blanchard-Wrigglesworth E., Harnos K., Zhang Q., Eastman R. 2017. Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice // *Nature Climate Change*. V. 7. P. 289–295
- Dufour A., Zolina O., Gulev S. 2016. Atmospheric moisture transport to the Arctic: Assessment of reanalyses and analysis of transport components // *J. of Climate*. V. 29. № 14. P. 5061–5081.
- Ellingsen K., Yoccoz N., Tveraa T., Frank K., Johannesen E., Anderson M., Dolgov A., Shackell N. 2020. The rise of a marine generalist predator and the fall of beta-diversity. // *Global Change Biology*. V. 26. № 5. P. 2897–2907.
- Haarpaintner J., O'Dwyer J., Gascard J., Haugan P., Schauer U., Østerhus S. 2001. Seasonal transformation of water masses, circulation and brine formation observed in Storfjorden, Svalbard // *Annals of Glaciology*. V. 33. P. 437–443.
- Jakobsson M., Mayer L., Bringensparr C. et al. 2020. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0. 2020. // *Scientific Data*. V. 7. № 176. doi. [org/10.1038/s41597-020-0520-9](https://doi.org/10.1038/s41597-020-0520-9).
- Lee S., Gong T., Feldstein S., Screen J., Simmonds I. 2017. Revisiting the cause of the 1989–2009 Arctic surface warming using the surface energy budget: Downward infrared radiation dominates the surface fluxes. // *Geophysical Research Letters*. V. 44. P. 10654–10661.
- Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. 2009. Barents Sea multidecadal variability // *Geophysical Research Letters*. V. 36 L19604. <https://doi.org/10.1029/2009GL039847>.
- Lind S., Ingvaldsen R., Furevik T. 2018. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. // *Nature Climate Change*. V. 8. P. 634–639.
- Long Z., Perrie W. 2015. Scenario Changes of Atlantic Water in the Arctic Ocean // *Journal of Climate*. V.28 № 14 P. 5523–5548. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00522.1>.
- Long Z., Perrie W. 2017. Changes in Ocean Temperature in the Barents Sea in the Twenty-First Century // *J. of Climate*. V.30 № 15 P. 5901–5921. <https://DOI10.1175/JCLI-D-16-0415.1>.
- Loeng H., Drinkwater K. 2007. An overview of the ecosystems of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability // *Deep-Sea Research II*. V. 54. № 23–26. P. 2478–2500.
- Ogawa F., Keenlyside N., Gao Y., Koenigk T., Yang S., Suo L., Wang T., Gastineau G., Nakamura T., Cheung H., Omrani N.-E., Ukita J., Semenov V. 2018. Evaluating impacts of recent Arctic sea ice loss on the Northern Hemisphere winter climate change // *Geophysical Research Letters*. V. 45. P. 3255–3263.
- Sévellec F., Fedorov A., Liu W. 2017. Arctic sea-ice decline weakens the Atlantic meridional overturning circulation // *Nature Climate Change*. V. 7. P. 604–610.
- Skagseth, Ø., Furevik T., Ingvaldsen R., Loeng H., Mork K., Orvik K., Ozhigin V. 2008. Volume and heat transports to the Arctic

- Ocean via the Norwegian and Barents Seas // Arctic–Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate /R. Dickson, J. Meincke, P. Rhines, eds. Springer. 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).
- Sorteberg A., Walsh J.* 2008. Seasonal cyclone variability at 70°N and its impact on moisture transport into the Arctic // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. V. 60. № 3. P. 570–586.
- Watelet S., Skagseth Ø., Lien V., Sagen H., Østensen Ø., Ivshin V., Beckers J.-M.* 2020. A volumetric census of the Barents Sea in a changing climate. // *Earth System Science Data*. V. 12. P. 2447–2457.
- Zhang P., Wu Y., Chen G., Yu Y.* 2020. North American cold events following sudden stratospheric warming in the presence of low Barents-Kara Sea sea ice // *Environmental Research Letters*. V. 15. № 12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc215>

*Поступила в редакцию 28.05.2021 г.  
Принята после рецензии 16.04.2022 г.*