

Среда обитания водных биологических ресурсов Современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря

А. Г. Трофимов

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

Целью работы является выявление современных тенденций изменения океанографических условий Баренцева моря.

Материалом исследования послужили данные, собранные в ходе экспедиций ПИНРО в Баренцево море, а также другая доступная информация о его гидрометеорологических условиях.

Используемые методы: сравнительный анализ данных, методы описательной статистики, корреляционный и регрессионный анализы.

Результаты: представлен обзор метеорологических (штормовая активность, температура воздуха) и океанографических (температура и солёность морской воды, площади водных масс, ледовитость) условий Баренцева моря в 2016–2020 гг. Период с 2016 по 2020 гг. характеризуется как тёплый, малоледный, распреснённый и с повышенной штормовой активностью. Начиная с рекордно тёплого 2016 г., в Баренцевом море наметилась тенденция понижения температуры воды и воздуха, сокращения площади, занятой тёплыми атлантическими водами, тогда как в изменениях ледовитости моря и площадей, занятых арктическими и холодными придонными водами, в последние годы, напротив, отмечается тенденция к росту. При этом штормовая активность в рассматриваемый период оставалась стабильно высокой, а солёность вод – низкой.

Практическая значимость: полученные результаты анализа океанографических условий Баренцева моря позволят лучше понимать процессы, происходящие в его экосистеме, и возможные сценарии их развития, особенно в условиях современных глобальных изменений климата в этом важном для рыбохозяйственной отрасли регионе.

Ключевые слова: Баренцево море, метеорологические условия, океанографические условия, температура и солёность воды, ледовитость, современные тенденции.

The current trends in oceanographic conditions of the Barents Sea

A. G. Trofimov

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

The aim of the paper is to identify current trends in oceanographic conditions of the Barents Sea.

The material for the study was the data obtained during surveys in the Barents Sea by PINRO. As well as other available information on hydrometeorological conditions of the Barents Sea was used.

Methods of descriptive statistics as well as comparative, correlation and regression analyses were applied.

Results: An overview of meteorological (storm activity, air temperature) and oceanographic (sea water temperature and salinity, areas of water masses, ice coverage) conditions of the Barents Sea in 2016–2020 is presented. The period from 2016 to 2020 is characterized as warm, low-ice, fresh and with increased storm activity. Since the record warm year of 2016, there has been a declining trend in water and air temperatures as well as in the area occupied by warm Atlantic waters in the Barents Sea, while an increasing trend has been observed in the sea ice extent and areas of Arctic and cold bottom waters in the recent years. At the same time, for the investigated period, storm activity remained stably high, and salinity was still at a low level.

Practical significance: The obtained results of the analysis of the Barents Sea oceanographic conditions are useful for better understanding the processes occurring in the sea ecosystem and possible scenarios for their development, especially in the context of current global climate changes in this region, being of great importance for the fishing industry.

Keywords: Barents Sea, meteorological conditions, oceanographic conditions, water temperature and salinity, ice coverage, current trends.

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море – шельфовое окраинное море Северного Ледовитого океана, расположенное между Северной Европой и архипелагами Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля (рис. 1). Являясь переходной зоной между Северной Атлантикой и Аркти-

ческим бассейном, оно играет важную роль в водообмене между ними [Ingvaldsen et al., 2004; Maslowski et al., 2004; Voitsov et al., 2012]. Атлантические воды проникают в Арктический бассейн через Баренцево море и пролив Фрама. Изменения температуры и солёности атлантических вод, входящих в Баренцево

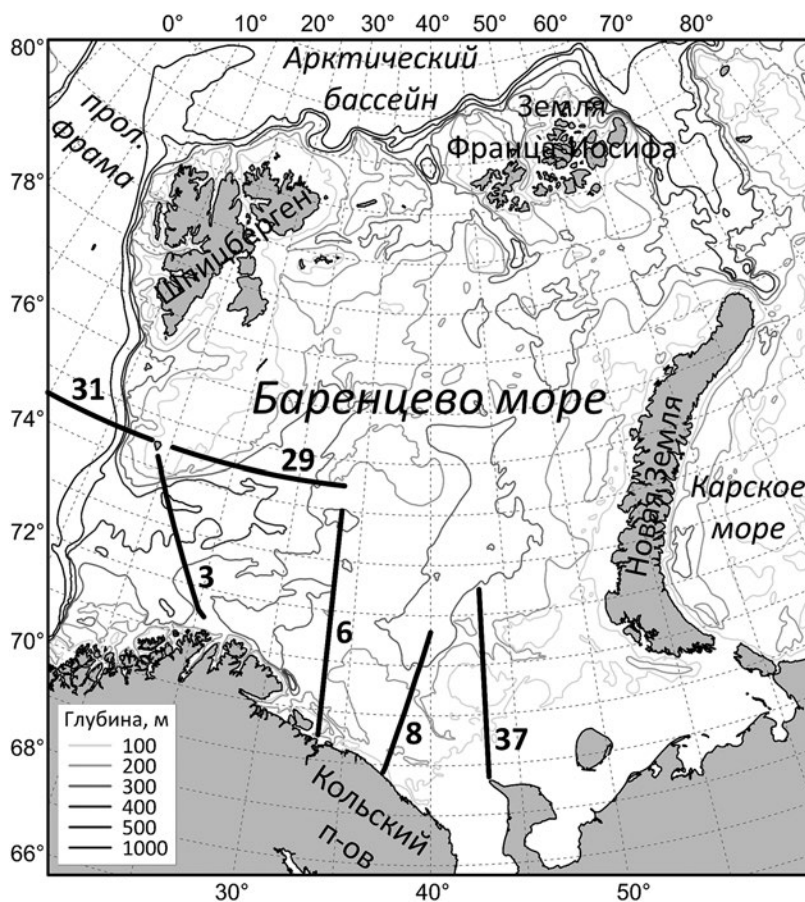


Рис. 1. Положение и рельеф дна Баренцева моря. Жирными линиями показаны основные российские стандартные разрезы: Кольский меридиан (№ 6), Нордкап – Медвежий (№ 3), Медвежий – Запад (№ 31), Медвежий – Восток (№ 29), Харловский (№ 8), Канинский (№ 37)

Fig. 1. The Barents Sea location and topography. The bold lines show the main Russian standard sections: Kola (№ 6), North Cape – Bear Island (№ 3), Bear Island – West (№ 31), Bear Island – East (№ 29), Kharlov (№ 8), Kanin (№ 37)

море, оказывают влияние на океанографические условия не только самого Баренцева моря, но и Северного Ледовитого океана и связаны с крупномасштабными атмосферными процессами [Årthun et al., 2012; Boitsov et al., 2012; Smedsrud et al., 2013; Yashayaev, Seidov, 2015; Ожигин и др., 2016; González-Pola et al., 2020]. Баренцево море также является важным рыбохозяйственным бассейном и отличается высокой биопродуктивностью, которая в значительной степени зависит от его океанографических условий [Ижевский, 1961; Гершанович, Муромцев, 1983; Ожигин и др., 1999; Шевченко, 2000; Трофимов, 2003; Loeng, Drinkwater, 2007; Jakobsen, Ozhigin, 2011; Dalpadado et al., 2012; Johannesen et al., 2012; Dalpadado et al., 2014; Eriksen et al., 2017].

В последние десятилетия наблюдается существенный рост температуры воздушных и водных масс и сокращение площади льдов не только в Баренцевом море, но и в Арктике в целом [Ingvaldsen et al., 2003; Polyakov et al., 2005; Boitsov et al., 2012; Трофимов

и др., 2018; González-Pola et al., 2020]. Происходящее потепление воспринимается многими как процесс, который будет развиваться и далее [Оценочный доклад ..., 2008; Цатуров, Клепиков, 2012; IPCC, 2014]. Однако, существует мнение, что изменчивость климата имеет циклический характер, и текущее потепление в скором времени сменится похолоданием [Frolov et al., 2009; Фролов и др. 2010, 2012; Drinkwater et al., 2014].

В условиях современных изменений климата, учитывая важность Баренцева моря для рыбохозяйственной отрасли и ключевую роль условий окружающей среды в функционировании морских экосистем, представляется очевидной необходимость выполнения мониторинга и всестороннего анализа океанографических условий Баренцева моря, что позволит лучше понимать процессы, происходящие в его экосистеме, и возможные сценарии их развития.

Цель данной работы – выявить современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В работе основное внимание уделено периоду с 2016 по 2020 гг. для того, чтобы выявить основные изменения условий среды, произошедшие в Баренцевом море после рекордно тёплого 2016 г., и определить их тенденции.

Анализ океанографических условий Баренцева моря основывался на данных наблюдений на стандартных разрезах (см. рис. 1) и на материалах съёмки по оценке запасов промысловых видов рыб. Также использовались океанографические данные, полученные в ходе обмена с Институтом морских исследований (г. Берген, Норвегия), и другая доступная информация о гидрометеорологических условиях Баренцева моря. Для анализа также привлекались восстановленные данные по температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» за период с июня 2016 г. по май 2017 г. [Карсаков и др., 2018]. В работе рассмотрены зимний индекс Северо-Атлантического колебания, количество штормовых дней, температура воздуха, температура и солёность воды, площади водных масс, ледовитость. Ссылки на источники данных представлены по тексту.

Для расчёта аномалий использовались среднеемноголетние значения за периоды: 1981–2010 гг. (количество штормовых дней, температура воздуха, ледовитость, температура и солёность воды на разрезе «Кольский меридиан», площади водных масс), 1982–2010 гг. (температура поверхности моря), 1954–1990 гг. (температура воды на разрезе «Канинский»), 1951–1990 гг. (температура воды на остальных стандартных разрезах), 1931–2010 гг. (температура и солёность воды поверхностного слоя, на 100 м и у дна – карты горизонтального распределения). Разные периоды осреднения обусловлены разной обеспеченностью исходными данными.

При выявлении трендов в изменениях анализируемых параметров их достоверность оценивалась с помощью уровня значимости p -value (p -значение). В случае, если p -value было меньше 0,05, тренд считался статистически значимым с вероятностью 95%, а если меньше 0,01, то, соответственно, с вероятностью 99% [Коросов, Горбач, 2007].

В работе использовались сравнительный анализ данных, методы описательной статистики, корреляционный и регрессионный анализы [Елисеева, Юзбашев, 2004]. Статистическая обработка данных выполнялась в программе Microsoft Excel 2016 (надстройка «Ана-

лиз данных»), графики строились с помощью Microsoft Excel 2016, карты – в программе Golden Software MapViewer 8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Метеорологические условия. В 2016–2020 гг. зимний (декабрь–март) индекс Северо-Атлантического колебания¹ был положительным и высоким (0,74–1,78) во все годы, кроме 2018 г., когда он упал незначительно ниже нуля (–0,17), при этом в 2020 г. он стал четвёртым максимумом (1,78) с 1900 г. после 1989 г. (2,43), 1990 г. (1,91) и 2015 г. (1,83). Особенности атмосферной циркуляции обусловили в последние годы аномально высокую штормовую активность, под которой в этой работе будет подразумеваться количество дней со штормовым ветром (15 м/с и более). В Баренцевом море практически во все месяцы 2016–2020 гг. количество штормовых дней (штормов) превышало норму (рис. 2), а в отдельные – достигало максимальных значений с 1981 г.: в январе 2017 г. 24 дня (норма 15), в марте 2020 г. 26 дней (норма 12), в мае 2017 г. 15 дней (норма 4), в июне 2018 г. 16 дней (норма 3), в июле 2019 г. 12 дней (норма 2), в августе 2016 г. 13 дней (норма 3), в сентябре 2018 г. 15 дней (норма 6). Лишь в течение 9 месяцев из 60 штормовая активность была на уровне нормы или немного ниже. Если рассматривать общее за год количество штормовых дней, то с 1987 г. в Баренцевом море отмечается статистически значимый тренд (p -value = 0,000) к росту количества штормов (см. рис. 2), которое увеличилось с 75 дней в 1987 г. до 161 дня в 2018 г., достигнув максимального значения с 1981 г. Таким образом, в последние десятилетия прирост годового количества штормовых дней составил в среднем 2 дня в год. В рассматриваемые 2016–2020 гг. штормовая активность оставалась на высоком уровне (142–161 дней за год при норме 104 дня) без какой-либо выраженной тенденции изменения (p -value = 0,827, что во много раз превышает пороговое значение 0,05, при котором можно утверждать о статистической значимости тренда с вероятностью 95%) (см. рис. 2). Использование месячных аномалий количества штормовых дней за период с января 2016 г. по декабрь 2020 г. также не позволило выявить сколько-нибудь значимый тренд (p -value = 0,623) (см. рис. 2).

В 1981–2020 гг. в изменениях температуры воздуха,² осреднённой по площади для западной (70–76°

¹ Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) index (PS-based). UCAR. 20.03.2021. Accessible via: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based>.

² Monthly mean time series from the NCEP Reanalysis Dataset. Climate Prediction Center, National Weather Service, NOAA. 20.03.2021. Accessible via: <http://nomad2.ncep.noaa.gov>.

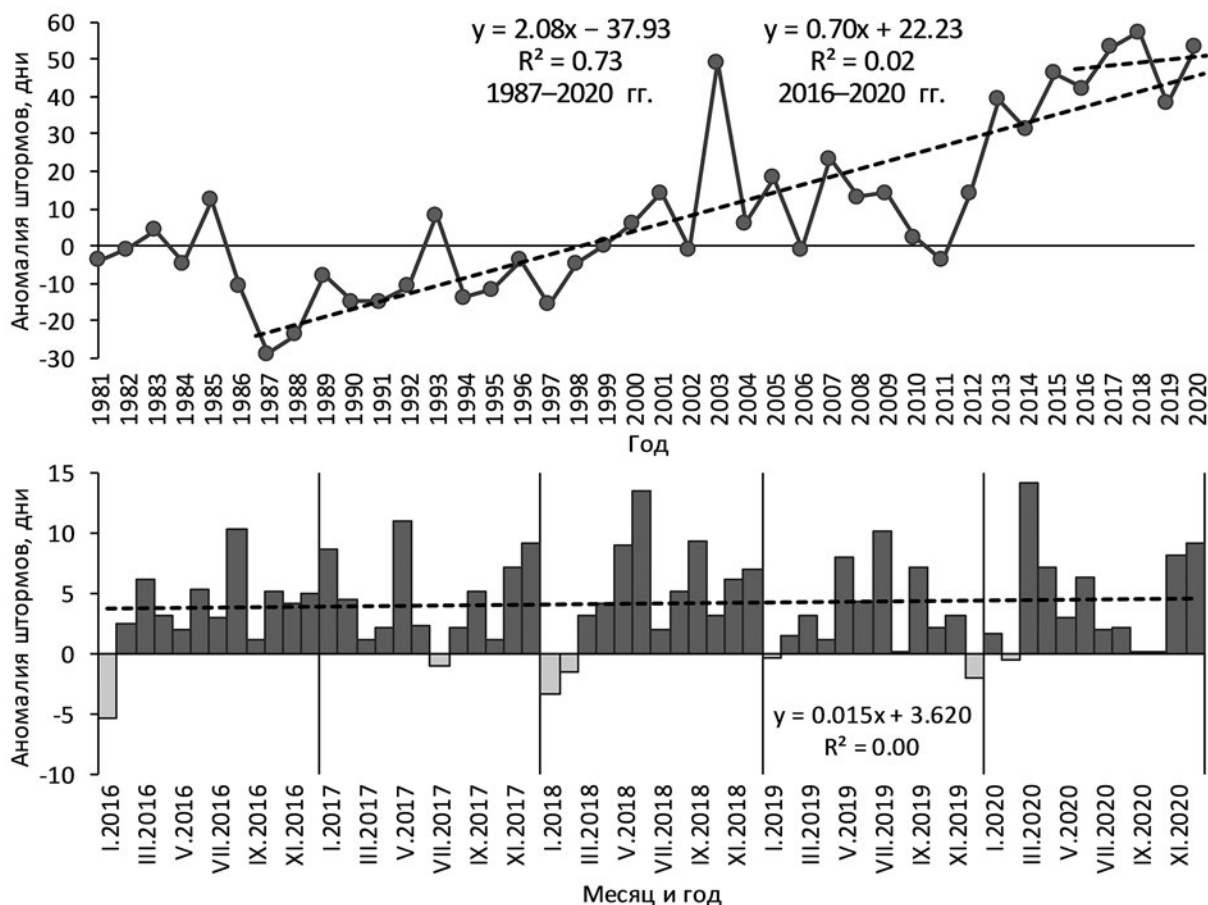


Рис. 2. Аномалии количества штормовых дней (с ветром более 15 м/с) в центральной части Баренцева моря (68–80° с.ш., 30–40° в.д.): годовые в 1981–2020 гг. (сверху) и месячные в 2016–2020 гг. (снизу). Пунктирная линия – линейный тренд. Данные по штормам получены из ФГБУ «Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»

Fig. 2. Anomalies of storm activity (days with wind more than 15 m/s) in the central Barents Sea (68–80°N, 30–40°E): annual values in 1981–2020 (upper) and monthly values in 2016–2020 (lower). The dashed line shows a linear trend. The data on stormy activity were obtained from the Murmansk Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring

с.ш., 15–35° в.д.) и восточной (69–77° с.ш., 35–55° в.д.) частей Баренцева моря, отмечались статистически значимые положительные тренды (p -value = 0,000): прирост среднегодовой температуры составил в среднем 0,05 °C в год на западе моря и 0,10 °C в год – на востоке (рис. 3). С 2004 г. в Баренцевом море наблюдается период высоких температур воздуха, которые достигли в 2016 г. максимальных значений с 1948 г. (в среднем за год 3,3 °C при норме 1,2 °C – на западе моря и 1,1 °C при норме –2,6 °C – на востоке). В 2016–2020 гг. температура воздуха над Баренцевым морем в большинстве месяцев по-прежнему превышала норму (см. рис. 3), а в отдельные – достигала максимальных значений с 1948 г.: на западе в мае 2016 и 2018 гг. 4,6 °C (норма 1,5 °C), в июле 2018 г. 11,6 °C (норма 7,8 °C), в ноябре 2020 г. 3,0 °C (норма –1,0 °C) и на востоке в феврале 2016 г. –2,1 °C (норма –9,6 °C), в июле 2016 г. 9,0 °C (норма 4,9 °C),

в сентябре 2016 г. 6,8 °C (норма 3,8 °C), в ноябре 2020 г. 1,2 °C, положительное значение наблюдалось впервые с 1948 г., при норме –3,8 °C. При этом наиболее низкие аномалии температуры воздуха наблюдались в 2019 г., когда штормовая активность над морем была также самая низкая в сравнении с остальными годами рассматриваемого периода. И хотя температура воздуха в 2016–2020 гг. была по-прежнему выше нормы, в её среднегодовых значениях визуально прослеживается, наиболее отчётливо с 2016 по 2019 гг., тенденция на понижение как на западе, так и на востоке Баренцева моря (см. рис. 3). Но, несмотря на это, тренды, выделенные на основе среднегодовых аномалий за 2016–2020 гг., оказались статистически незначимыми (p -value составило 0,278 на западе и 0,210 на востоке). Однако, при использовании среднемесячных аномалий за период с января 2016 г. по декабрь 2020 г. значимость трендов существенно увеличилась

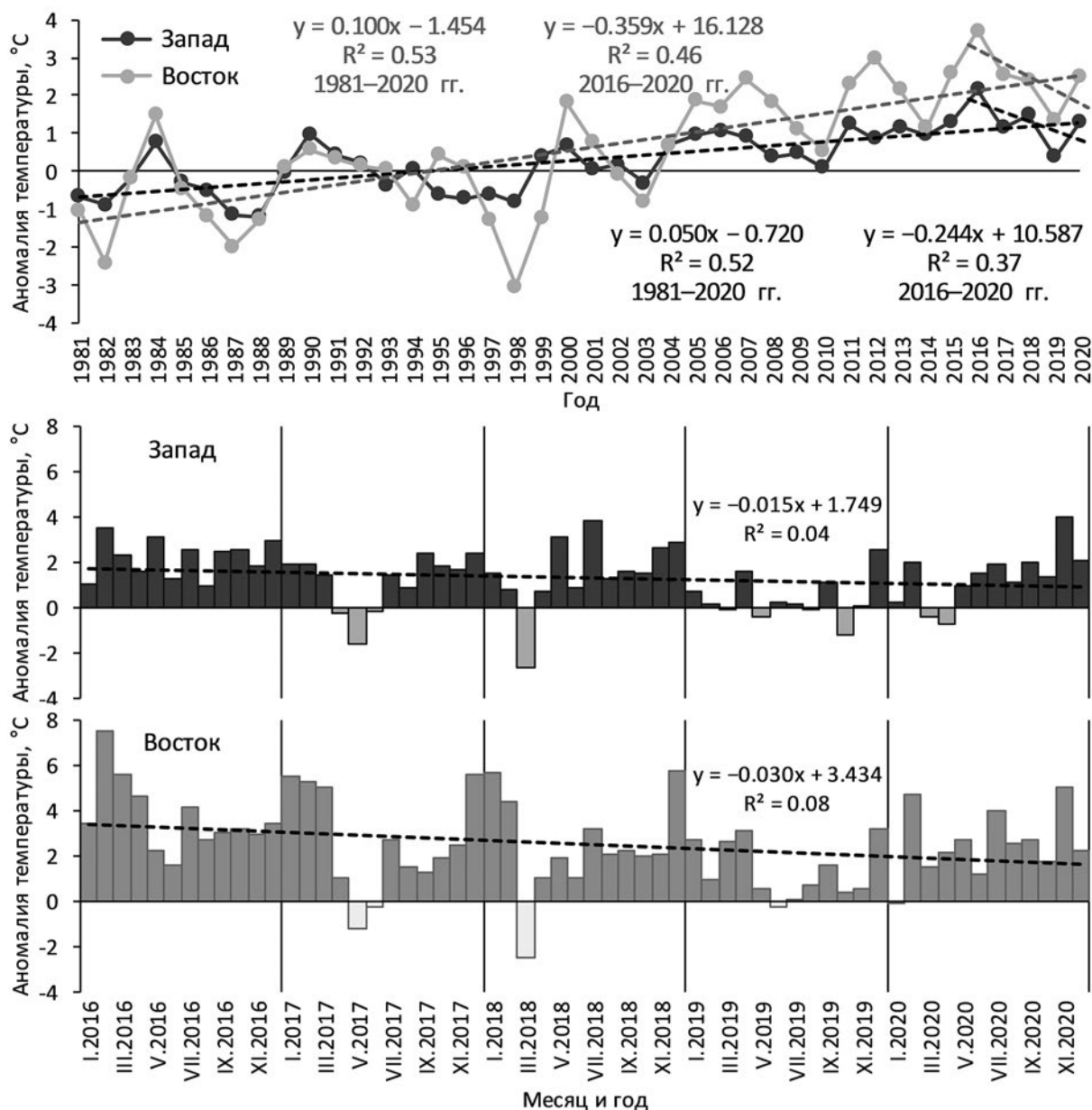


Рис. 3. Аномалии температуры воздуха в западной и восточной частях Баренцева моря: среднегодовые в 1981–2020 гг. (сверху) и среднемесячные в 2016–2020 гг. (снизу). Пунктирная линия – линейный тренд

Fig. 3. Air temperature anomalies in the western and eastern Barents Sea: annual mean values in 1981–2020 (upper) and monthly mean values in 2016–2020 (lower). The dashed line shows a linear trend

(p-value составило 0,133 на западе и 0,032 на востоке), т.е. уменьшение среднемесячных аномалий температуры воздуха на востоке Баренцева моря можно считать статистически значимым (см. рис. 3).

Ледовые условия. В период с 1981 по 2020 гг. ледовитость Баренцева моря, выраженная как процент площади, занятой льдом, от площади моря, в целом неуклонно сокращалась – отмечался статистически значимый отрицательный тренд (p-value = 0,000), при котором среднегодовая ледовитость уменьша-

лась в среднем на 0,6% в год (рис. 4). В 2016 г. ледовитость моря достигла минимальных значений с 1951 г., составив в среднем за год 14,5% при норме 34,3%. В период с 2016 по 2020 гг. площадь льдов во все месяцы была ниже среднемноголетних значений (см. рис. 4), а в отдельные – достигала минимальных значений с 1951 г.: в марте 2016 г. 32% (норма 55%), в апреле 2016 г. 31% (норма 57%), в мае 2016 г. 19% (норма 50%), в июне 2016 г. 8% (норма 37%), в ноябре 2020 г. 3% (норма 29%), в декабре 2018 г. 15% (норма 40%). При этом Баренцево море было полностью (или

практически полностью) свободным ото льда в 2016 г. с июля по октябрь (ледовитость в эти месяцы составляла 0, 0, 0 и 2% соответственно), в 2017 г. в сентябре (1%), в 2018 г. с августа по октябрь (0%), в 2019 г. в сентябре и октябре (1 и 3%), в 2020 г. с августа по ноябрь (0, 0, 1 и 3% соответственно). В 2016 и 2019 гг. сезонный максимум ледовитости, отмечающийся обычно в апреле, наступил на месяц раньше – в марте. В 2018 и 2020 гг. в весенний период происходило более интенсивное таяние льда, сопровождавшееся повышенной штормовой активностью и высокой температурой воздуха: с апреля по июнь ледовитость моря сократилась в среднем на 36%, тогда как в 2016, 2017 и 2019 гг. – лишь на 22% (в среднем за эти три года), что близко к среднелетним темпам сезонного сокращения площади льдов (на 20% с апреля по июнь). Относительно более высокая ледовитость отмечалась в 2019 г., когда штормовая активность и тем-

пература воздуха над морем были самыми низкими в сравнении с остальными годами рассматриваемого периода. Несмотря на низкую в целом ледовитость Баренцева моря, в последние годы (2016–2020) наблюдается тенденция увеличения её среднегодовых значений (p -value составило 0,080, что говорит о статистической значимости тренда с вероятностью 92%) (см. рис. 4). При использовании среднемесячных аномалий ледовитости за период с января 2016 г. по декабрь 2020 г. значимость тренда повысилась (p -value = 0,003), и он стал статистически значимым уже с вероятностью 99% (см. рис. 4).

Океанографические условия (стандартные разрезы). Разрез «Кольский меридиан», выполняемый с мая 1900 г., является одним из самых длинных и репрезентативных в мире рядов океанографических данных. Он расположен в центральной части Баренцева

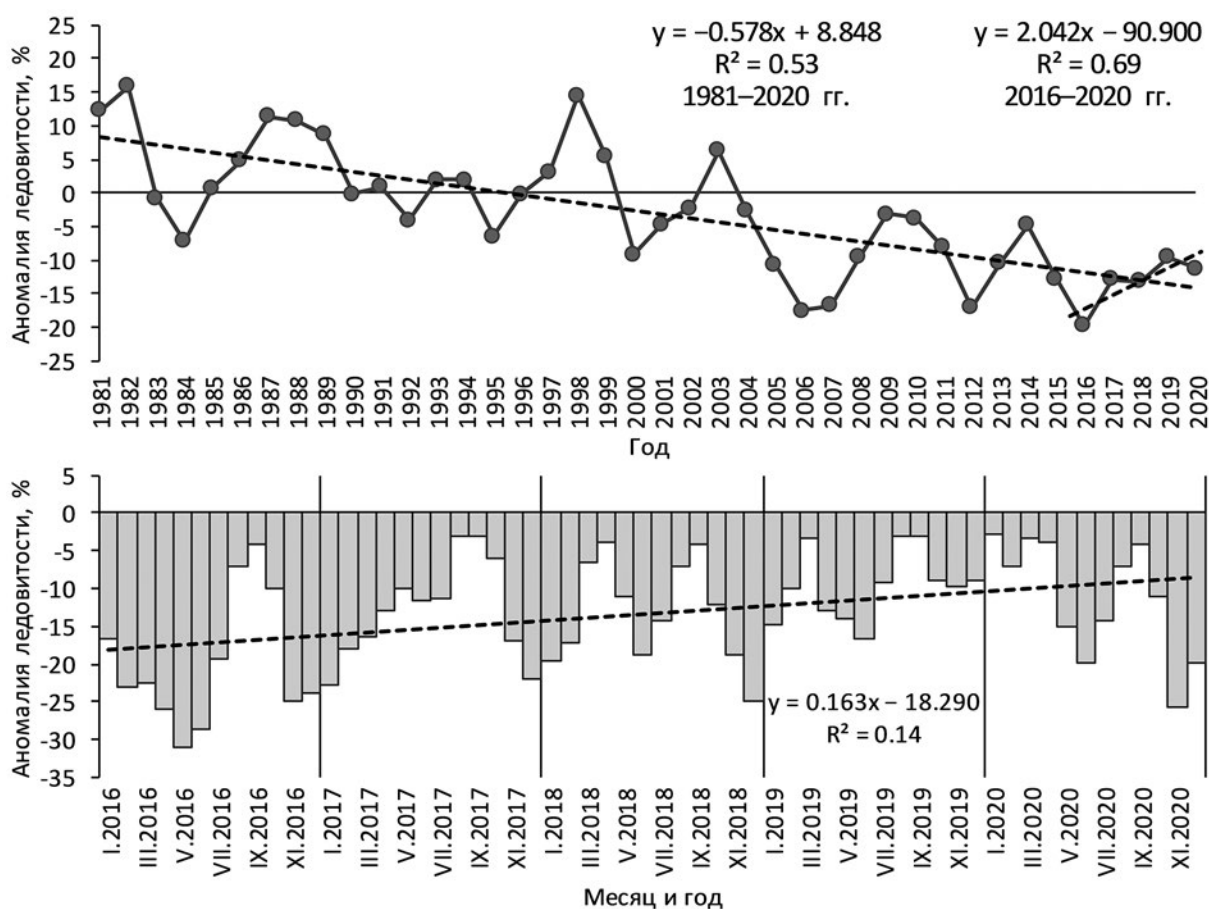


Рис. 4. Аномалии ледовитости Баренцева моря: среднегодовые в 1981–2020 гг. (сверху) и среднемесячные в 2016–2020 гг. (снизу). Пунктирная линия – линейный тренд. Данные по ледовитости получены из ФГБУ «Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»

Fig. 4. Ice coverage anomalies in the Barents Sea: annual mean values in 1981–2020 (upper) and monthly mean values in 2016–2020 (lower). The dashed line shows a linear trend. The data on ice coverage were obtained from the Murmansk Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring

моря (см. рис. 1) и пересекает прибрежные и атлантические воды, входящие в Баренцево море из Норвежского. На практике, как правило, используются средние значения температуры и солёности в разных слоях (0–50, 0–200, 50–200, 150–200 м) на трёх участках разреза (станции 1–3 – прибрежные воды Прибрежной ветви Мурманского течения, станции 3–7 – атлантические воды Основной ветви Мурманского течения и станции 8–10 – атлантические воды Центральной ветви Нордкапского течения). Далее будут рассмотрены только средние значения температуры и солёности в слое 0–200 м между станциями 3 и 7, поскольку данные именно с этого участка разреза наиболее полно отражают изменчивость свойств тёплых и солёных атлантических вод, проходящих через Баренцево море и следующих далее в Арктический бассейн.

В 1981–2020 гг. для температуры атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» был характерен статистически значимый положительный тренд

(p -value = 0,000): прирост среднегодовой температуры составил в среднем около 0,04 °C в год (рис. 5). С 2004 г. среднегодовая температура атлантических вод на разрезе находится на уровне тёплых и аномально тёплых лет, лишь в 2011 г. она опустилась до уровня нормальных лет, но уже в 2012 г. достигла рекордно высокого значения с 1900 г. (5,36 °C при норме 4,22 °C). Вторым по величине максимум был отмечен в 2016 г. (5,32 °C). В 2016–2020 гг. температура атлантических вод в подавляющем большинстве месяцев по-прежнему превышала норму и находилась на уровне тёплых и аномально тёплых лет (см. рис. 5), а в отдельные месяцы достигала максимальных значений с 1951 г.: в январе 2016 и 2017 гг. 5,2 °C (норма 4,1 °C), в феврале 2017 г. 4,9 °C (норма 3,6 °C), в марте 2016 и 2017 гг. 4,7 °C (норма 3,4 °C), в апреле 2016 г. 4,6 °C (норма 3,2 °C), в октябре 2016 г. 6,1 °C (норма 5,2 °C), в ноябре 2016 г. 6,0 °C (норма 5,0 °C), в декабре 2016 г. 5,6 °C (норма 4,5 °C). При этом наиболее низкие положительные аномалии темпера-

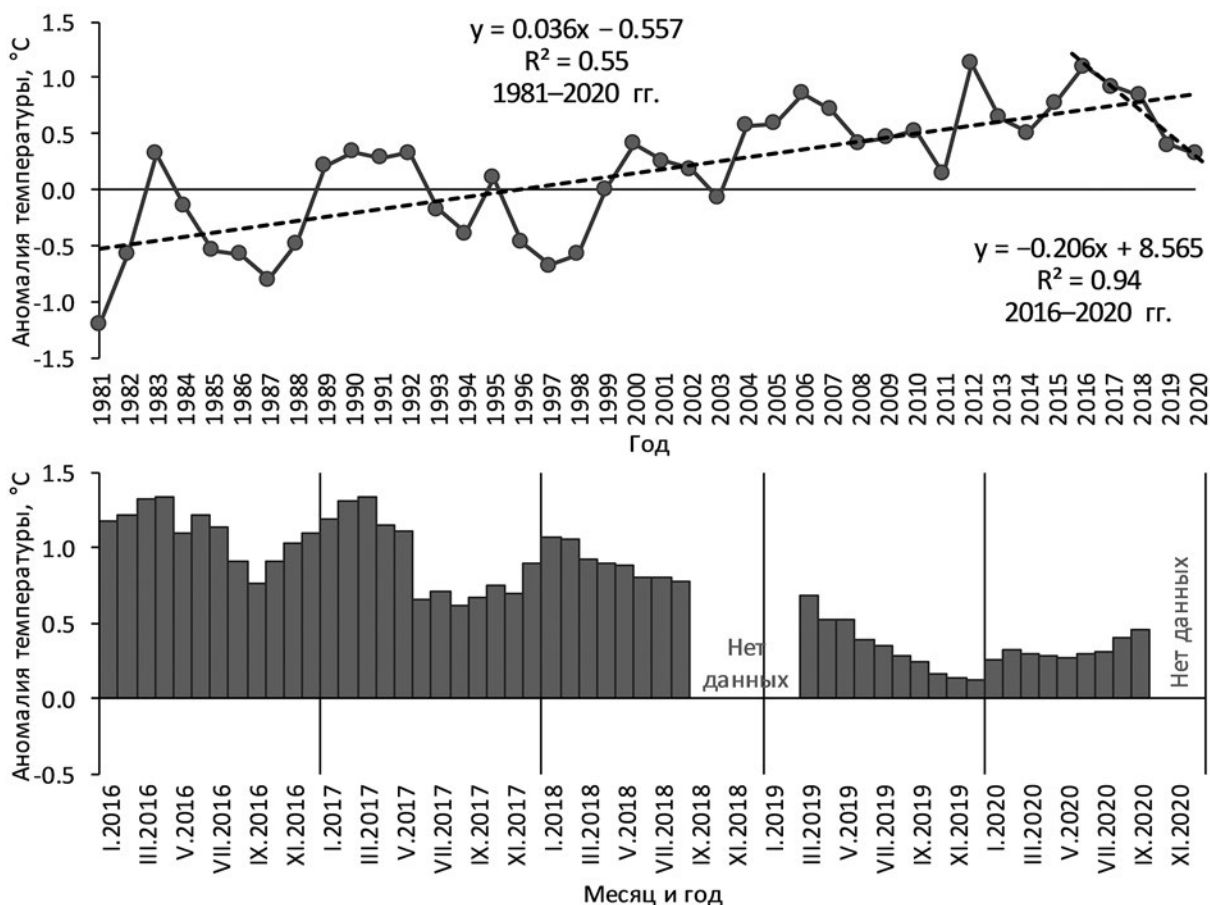


Рис. 5. Аномалии температуры (°C) в слое 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» (Основная ветвь Мурманского течения): среднегодовые в 1981–2020 гг. (сверху) и среднемесячные в 2016–2020 гг. (снизу). Пунктирная линия – линейный тренд

Fig. 5. Temperature anomalies (°C) in the 0–200 m layer in the Kola Section (Murman Current): annual mean values in 1981–2020 (upper) and monthly mean values in 2016–2020 (lower). The dashed line shows a linear trend

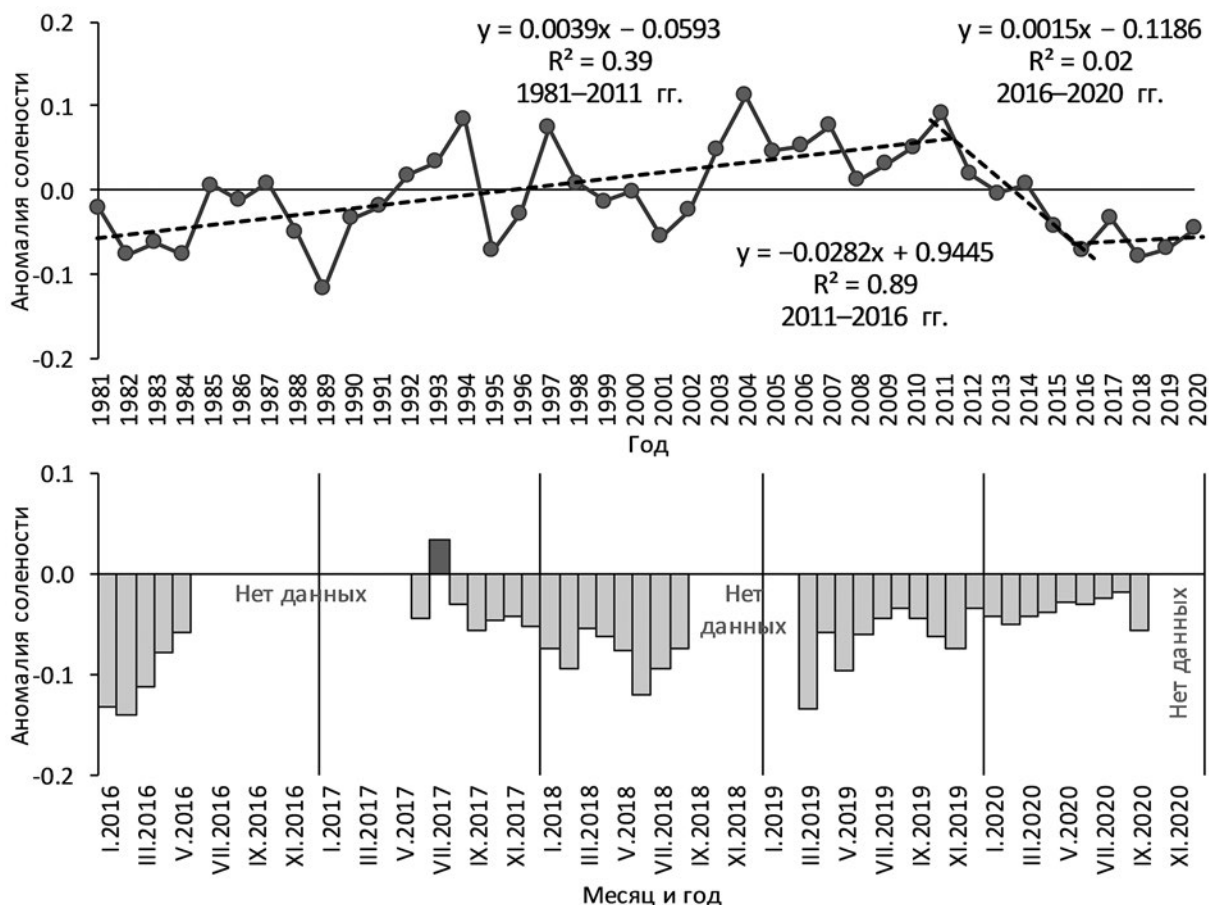


Рис. 6. Аномалии солёности в слое 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» (Основная ветвь Мурманского течения): среднегодовые в 1981–2020 гг. (сверху) и среднемесячные в 2016–2020 гг. (снизу). Пунктирная линия – линейный тренд
Fig. 6. Salinity anomalies in the 0–200 m layer in the Kola Section (Murman Current): annual mean values in 1981–2020 (upper) and monthly mean values in 2016–2020 (lower). The dashed line shows a linear trend

туры наблюдались в 2019 и 2020 гг. Несмотря на то, что в 2016–2020 гг. температура атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» была по-прежнему выше нормы, в её среднегодовых значениях отмечался статистически значимый нисходящий тренд (p -value = 0,007) (см. рис. 5).

Солёность атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» постепенно увеличивалась на протяжении 1981–2011 гг.: отмечался статистически значимый положительный тренд (p -value = 0,000), при котором среднегодовая солёность увеличивалась на 0,004 в год (рис. 6). В 2004 г. она достигла максимального значения (34,88 при норме 34,77), а в 2011 г. – второго по величине максимума (34,86) с 1981 г. При этом период с 2003 по 2011 гг. характеризовался высокой солёностью, среднегодовые положительные аномалии составляли 0,03–0,11 (или 0,6–2,0 σ , где σ – среднеквадратическое отклонение) во все годы, кроме 2008, когда средняя за год солёность была близка к норме. Однако, с 2004 г. наметилась тенденция к снижению солёности атлантических вод на разрезе,

а с 2011 по 2016 гг. в её изменениях наблюдался статистически значимый отрицательный тренд (p -value = 0,004) – уменьшение среднегодовой солёности составляло 0,03 в год (см. рис. 6). В 2013 и 2014 гг. она достигла среднемноголетнего уровня, а в 2015 г. опустилась на 0,04 (0,8 σ) ниже нормы. С 2016 по 2020 гг. солёность атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» оставалась на низком уровне (в среднем за год 34,69–34,74 при норме 34,77, аномалии от –0,6 до –1,4 σ) без какой-либо выраженной тенденции изменения (p -value = 0,840) (см. рис. 6).

Кроме разреза «Кольский меридиан» в Баренцевом море также выполняются другие основные океанографические разрезы (см. рис. 1), но гораздо реже. В рассматриваемый период с 2016 по 2020 гг. температура атлантических вод в слое 0–200 м на разрезах «Нордкап – Медвежий», «Медвежий – Восток», «Харловский» и «Канинский» была наиболее высокой в 2016 г. (положительные аномалии варьировали от 1,4 до 2,2 °C) и наиболее низкой в 2020 г. (аномалии составляли 0,3–0,9 °C). Разрез «Медвежий – Запад»

в этот период не выполнялся. Аномалии температуры на этих разрезах оказались несколько выше в сравнении с аномалиями на разрезе «Кольский меридиан» в силу того, что использовались нормы за разные периоды (при расчёте норм для перечисленных разрезов не привлекались 2000-е гг. с высокими температурами в отличие от нормы для разреза «Кольский меридиан»). В целом, по данным наблюдений на разрезах, температура вод основных тёплых течений Баренцева моря в 2016–2020 гг. превышала норму и находилась на уровне тёплых и аномально тёплых лет, но вместе с тем в её изменениях отмечалась тенденция на понижение.

Океанографические условия (поверхность, 100 м и дно). Температура поверхности моря (ТПМ),³ осреднённая по площади для юго-западной (71–74° с.ш., 20–40° в.д.) и юго-восточной (69–73° с.ш., 42–55° в.д.) частей Баренцева моря, в значительной степени зависит от температуры воздуха, которая рассматривалась выше: для периода с 1982 по 2020 гг. между среднегодовыми значениями температуры воды и воздуха выявлена статистически значимая тесная связь с коэффициентами корреляции 0,90 для запада моря и 0,89 — для востока. Таким образом, характер изменений, происходящих в ТПМ, во многом повторяет тот, что присущ температуре воздуха. Так в 1982–2020 гг. в изменениях температуры поверхности моря также отмечались статистически значимые положительные тренды (p -value = 0,000), прирост среднегодовой температуры составил в среднем 0,04 °C в год как на западе, так и на востоке моря (рис. 7). С 2004 г. в Баренцевом море наблюдается период высоких ТПМ, которые достигли в 2016 г. максимальных значений с 1982 г. (в среднем за год 6,6 °C при норме 5,1 °C — на западе моря и 4,8 °C при норме 2,6 °C — на востоке).

В 2016–2020 гг. ТПМ в подавляющем большинстве месяцев по-прежнему превышала норму (см. рис. 7), а в отдельные — достигала максимальных значений с 1982 г. (табл. 1). При этом наиболее низкие положительные аномалии ТПМ, а в некоторые месяцы слабые отрицательные, наблюдались в 2019 г., когда штормовая активность и температура воздуха над морем были также самыми низкими в сравнении с остальными годами рассматриваемого периода. И хотя температура поверхности моря в 2016–2020 гг. была по-прежнему выше нормы, в её сред-

негодовых значениях визуально прослеживается, наиболее отчётливо с 2016 по 2019 гг., тенденция на понижение как на западе, так и на востоке Баренцева моря (см. рис. 7). Но, несмотря на это, тренд, выделенный на основе среднегодовых аномалий за 2016–2020 гг., оказался статистически незначимым (p -value = 0,291) на востоке моря и значимым лишь с вероятностью 91% (p -value = 0,085) на западе. Однако, при использовании среднемесячных аномалий за период с января 2016 г. по декабрь 2020 г. значимость трендов существенно выросла (p -value составило 0,036 на востоке и 0,000 на западе), что указывает на статистически значимое уменьшение среднемесячных аномалий ТПМ как на востоке, так и на западе Баренцева моря (см. рис. 7).

В Баренцевом море ежегодно в августе-октябре выполняется совместная российско-норвежская экосистемная съёмка, которая покрывает сеткой океанографических станций практически всё море, предоставляя уникальные данные по условиям морской среды. По данным этой съёмки, в 2016–2020 гг. температура поверхностных, промежуточных и придонных вод в Баренцевом море была в целом выше среднемноголетнего уровня с максимальными положительными аномалиями в 2016 г., при этом на протяжении этого периода наблюдалась тенденция уменьшения как положительных аномалий температуры, так и площади, занятой ими (табл. 2, рис. 8). Лишь в 2020 г. поверхностные воды оказались значительно теплее среднемноголетнего уровня практически на всей исследованной акватории, что произошло из-за аномально высокой температуры воздуха в летне-осенний период. Площадь, занятая отрицательными аномалиями температуры воды, наоборот, имела тенденцию к росту в 2016–2020 гг. и была максимальной в 2019 г. (см. табл. 2 и рис. 8). Наибольшие положительные аномалии температуры воды наблюдались в основном в восточной и юго-восточной частях Баренцева моря, а отрицательные — в его северной и юго-западной частях (см. рис. 8).

В 2016–2020 гг. в изменениях солёности поверхностных, промежуточных и придонных вод Баренцева моря наблюдалась тенденция к распреснению (рис. 9). Площади, занятые положительными аномалиями солёности на поверхности, 100 м и у дна, уменьшились, соответственно, с 92, 79 и 77% в 2016 г. до 40, 17 и 15% в 2020 г., а площади, занятые отрицательными аномалиями, наоборот, увеличились, и если в 2016–2018 гг. они составляли менее половины исследованной акватории, то в 2019 г. на 100 м и у дна уже превышали две трети, а в 2020 г. — четыре пятых акватории (см. табл. 2). В результате, в августе-октябре

³ SST fields from NOAA NCEP EMC CMB GLOBAL Reyn_SmithOlv2 monthly. Climate Modeling Branch, National Centers for Environmental Prediction, National Oceanic and Atmospheric Administration. IRIDL. 20.03.2021. Accessible via: <http://iridl.ldeo.columbia.edu>.

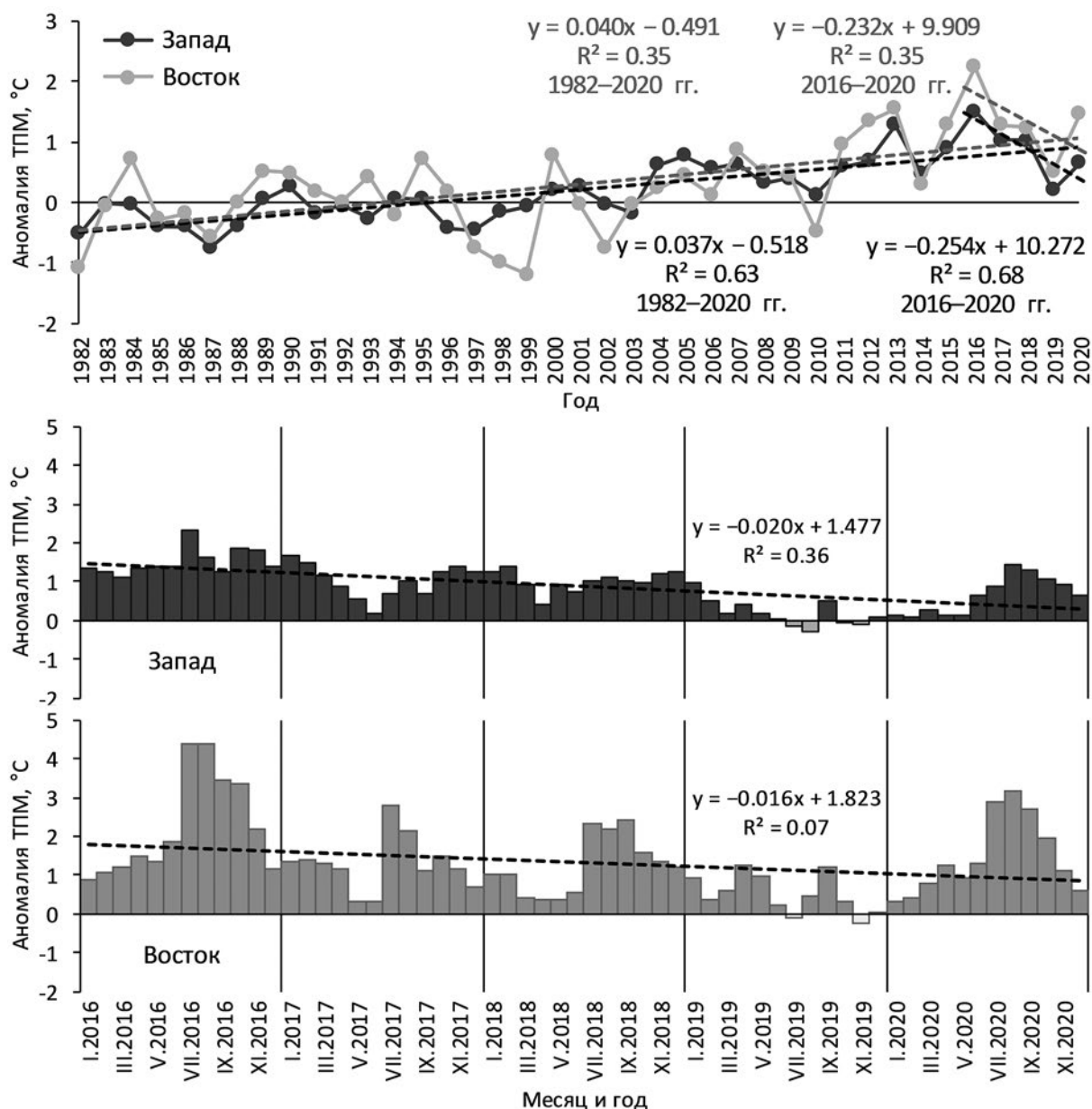


Рис. 7. Аномалии температуры поверхности моря в западной и восточной частях Баренцева моря: среднегодовые в 1982–2020 гг. (сверху) и среднемесячные в 2016–2020 гг. (снизу). Пунктирная линия – линейный тренд

Fig. 7. Sea surface temperature anomalies in the western and eastern Barents Sea: annual mean values in 1982–2020 (upper) and monthly mean values in 2016–2020 (lower). The dashed line shows a linear trend

Таблица 1. Рекордно высокие среднемесячные значения ТПМ в западной и восточной частях Баренцева моря с 1982 г.
Table 1. Record-high monthly mean SST in the western and eastern Barents Sea since 1982

Месяц	Западная часть Баренцева моря			Восточная часть Баренцева моря		
	Год	Фактическая ТПМ, °С	Норма, °С	Год	Фактическая ТПМ, °С	Норма, °С
Январь	2017	5,2	3,5	2017	2,1	0,8
Февраль	2017	4,6	3,2	2017	1,6	0,3
Март	2017	4,3	3,1	2017	1,4	0,1
Апрель	2016	4,5	3,2	2016	1,5	0,0
Май	2016	5,4	4,0	2016	2,3	0,9

Месяц	Западная часть Баренцева моря			Восточная часть Баренцева моря		
	Год	Фактическая ТПМ, °С	Норма, °С	Год	Фактическая ТПМ, °С	Норма, °С
Июнь	2013	7,2	5,5	2015	4,5	2,5
Июль	2016	10,0	7,7	2016	9,7	5,4
Август	2013	11,1	8,6	2016	11,3	7,0
Сентябрь	2013	9,7	7,6	2016	9,6	6,1
Октябрь	2016	7,7	5,8	2016	7,3	4,0
Ноябрь	2016	6,4	4,6	2016	4,3	2,2
Декабрь	2015	5,7	4,0	2018	2,7	1,5

Таблица 2. Площади Баренцева моря (А, % от исследованной акватории), занятые положительными и отрицательными аномалиями температуры и солёности воды, а также средние по площади значения положительных и отрицательных аномалий температуры (ΔT , °С) и солёности (ΔS)

Table 2. Areas of the Barents Sea (A,% of the surveyed area) occupied by positive and negative anomalies of water temperature and salinity as well as area-averaged positive and negative anomalies of temperature (ΔT , °C) and salinity (ΔS)

Горизонт	Аномалия температуры				Аномалия солёности			
	положительная		отрицательная		положительная		отрицательная	
	А, %	ΔT , °С	А, %	ΔT , °С	А, %	ΔS	А, %	ΔS
2016 г.								
Поверхность	100	1,85	0	–	92	0,44	8	–0,10
100 м	100	1,47	0	–	79	0,06	21	–0,05
Дно	100	1,63	0	–	77	0,08	23	–0,10
2017 г.								
Поверхность	83	1,08	17	–0,77	64	0,30	36	–0,26
100 м	90	0,77	10	–0,54	51	0,05	49	–0,05
Дно	88	1,10	12	–1,03	59	0,07	41	–0,06
2018 г.								
Поверхность	92	0,98	8	–0,26	87	0,48	13	–0,10
100 м	89	0,73	11	–0,29	50	0,06	50	–0,07
Дно	89	0,78	11	–0,41	68	0,05	32	–0,06
2019 г.								
Поверхность	63	0,71	37	–0,46	53	0,32	47	–0,26
100 м	64	0,73	36	–0,45	31	0,08	69	–0,06
Дно	72	0,83	28	–0,80	31	0,06	69	–0,07
2020 г.								
Поверхность	94	1,45	6	–0,72	40	0,30	60	–0,16
100 м	73	0,46	27	–0,43	17	0,04	83	–0,07
Дно	70	0,60	30	–0,59	15	0,07	85	–0,08

2016–2018 гг. в Баренцевом море всё ещё преобладали положительные аномалии солёности, а в 2019 и 2020 гг. – уже отрицательные. Наибольшие аномалии солёности как положительные, так и отрицательные (более 0,1 по абсолютной величине) наблюдались в поверхностных водах, тогда как в промежуточных и придонных водах средние по площади положитель-

ные и отрицательные аномалии не превышали по абсолютной величине 0,1 (см. табл. 2).

Согласно данным совместной российско-норвежской осенней съёмки Баренцева моря, выполняемой с 1965 г., с конца 1970-х гг. происходило увеличение площади атлантических вод (>3 °С): отмечался статистически значимый положительный тренд

THE CURRENT TRENDS IN OCEANOGRAPHIC CONDITIONS OF THE BARENTS SEA

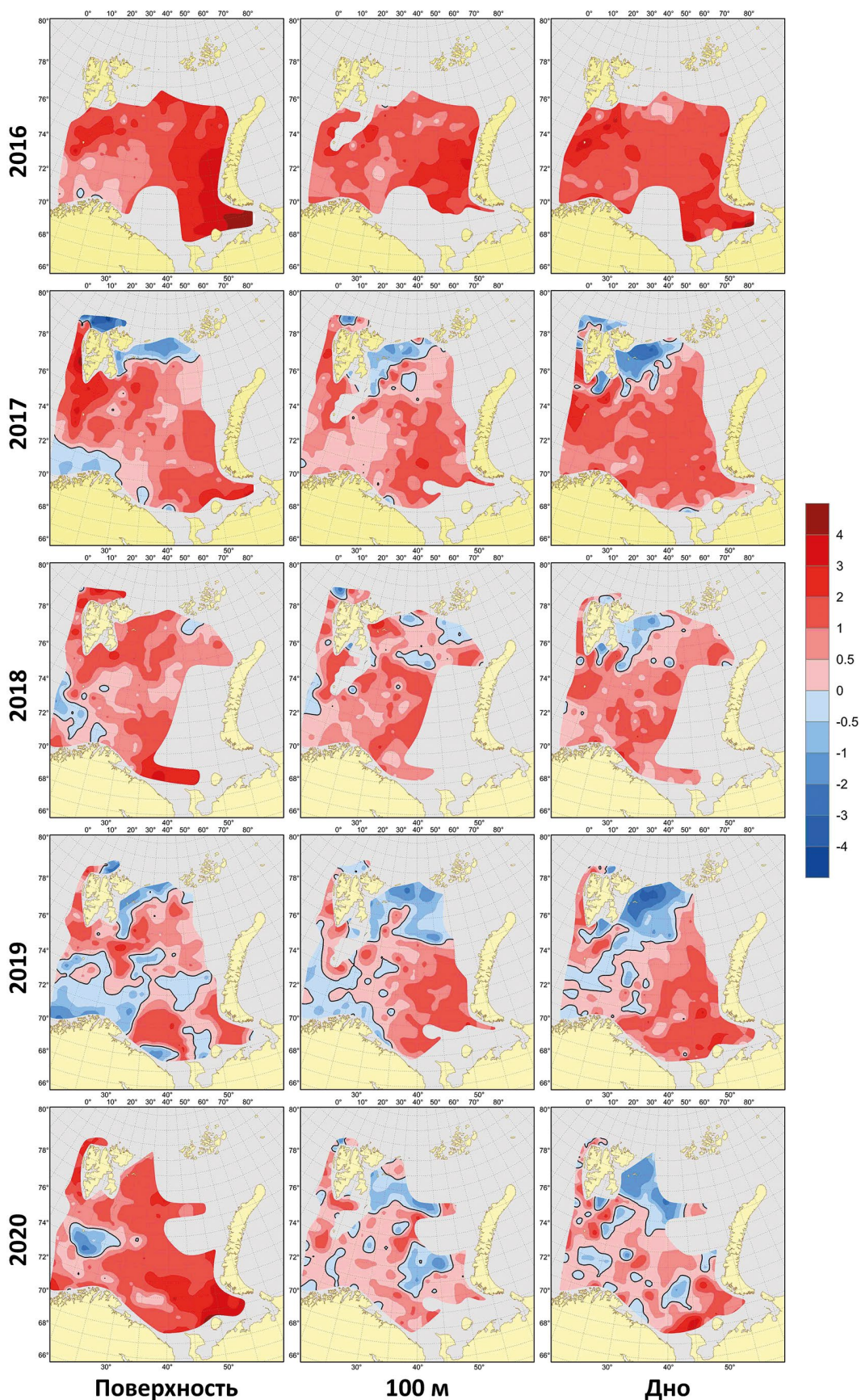


Рис. 8. Аномалии температуры (°C) поверхностного слоя, на 100 м и у дна в Баренцевом море в августе-октябре 2016–2020 гг.
 Fig. 8. Temperature anomalies (°C) at the surface, 100 m and near the bottom in the Barents Sea in August-October 2016–2020

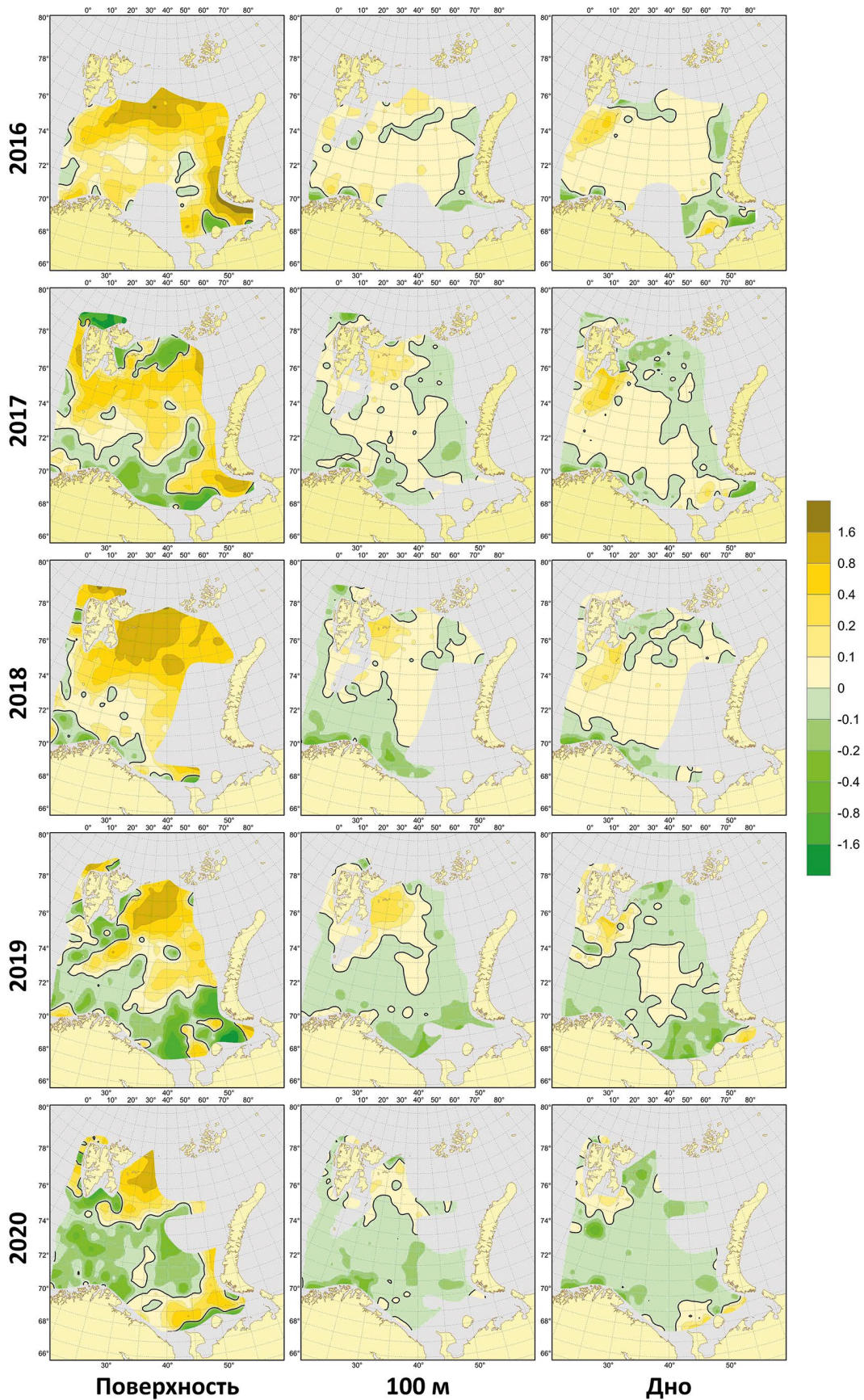


Рис. 9. Аномалии солёности поверхностного слоя, на 100 м и у дна в Баренцевом море в августе-октябре 2016–2020 гг.

Fig. 9. Salinity anomalies at the surface, 100 m and near the bottom in the Barents Sea in August-October 2016–2020

(p -value = 0,000), при котором площадь увеличивалась в среднем на 4,0 тыс. км² в год (рис. 10). Площадь арктических вод (<0 °С), наоборот, уменьшалась: в её изменениях наблюдался статистически значимый отрицательный тренд (p -value = 0,000), при котором она сокращалась в среднем на 6,5 тыс. км² в год. В 2016 г. площадь атлантических вод достигла максимального значения (402 тыс. км² при норме 233 тыс. км²) за весь период наблюдений, а площадь арктических – минимального (91 тыс. км² при норме 291 тыс. км²) (см. рис. 10). В 2017–2020 гг. атлантические воды по-прежнему занимали достаточно большую площадь (293–341 тыс. км²), а арктические – небольшую (158–189 тыс. км²). Тем не менее, в последние годы (2016–2020) в Баренцевом море наблюдается отчётливая тенденция сокращения площади атлантических вод (p -value = 0,047) и увеличения площади арктических (p -value = 0,080).

С 2000 г. площадь, занятая в августе-октябре холодными придонными водами (<0 °С), была наибольшей в 2003 г. (63% от расчётной области) и очень небольшой (3–11%) в 2007, 2008, 2012 и 2016–2018 гг. (рис. 11). В 2016 г. она достигла рекордно низкого значения 3% (с 1965 г.) и с тех пор увеличивается вот уже на протяжении последних четырёх лет, достигнув в 2020 г. 38% – максимального значения за последние десять лет. Площадь, занятая тёплыми придонными водами (>1 °С), напротив, в 2003 г. была наименьшей (19%) с 2000 г., а в 2006–2008, 2012 и 2016–

2018 гг. – достаточно большой (45–59%) с максимальным значением (59%) в 2016 г., тогда как в 2019 и 2020 гг. она существенно сократилась, достигнув 25 и 27%, соответственно (см. рис. 11). С 2016 г. в изменениях площади холодных и тёплых придонных вод наблюдаются статистически значимые тренды: положительный (p -value = 0,011) – для холодных вод и отрицательный (p -value = 0,020) – для тёплых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С начала 1980-х гг. в Баренцевом море на фоне увеличения штормовой активности наблюдается тенденция на потепление: среднегодовая температура воздуха повышалась в среднем на 0,05 °С в год на западе моря и на 0,10 °С – на востоке, а среднегодовая температура поверхности моря и атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» – на 0,04 °С в год, площадь атлантических вод увеличивалась на 4,0 тыс. км² в год, тогда как средняя за год ледовитость моря сокращалась на 0,6% в год, а площадь арктических вод – на 6,5 тыс. км² в год. При этом солёность атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» возрастала в среднем на 0,004 в год, но с 2004 г. в её изменениях наметилась тенденция на снижение, наиболее отчётливо проявившаяся с 2011 по 2016 гг.

Пик потепления в Баренцевом море наблюдался в 2016 г., когда были отмечены максимальные среднегодовые значения температуры воздуха с 1948 г.

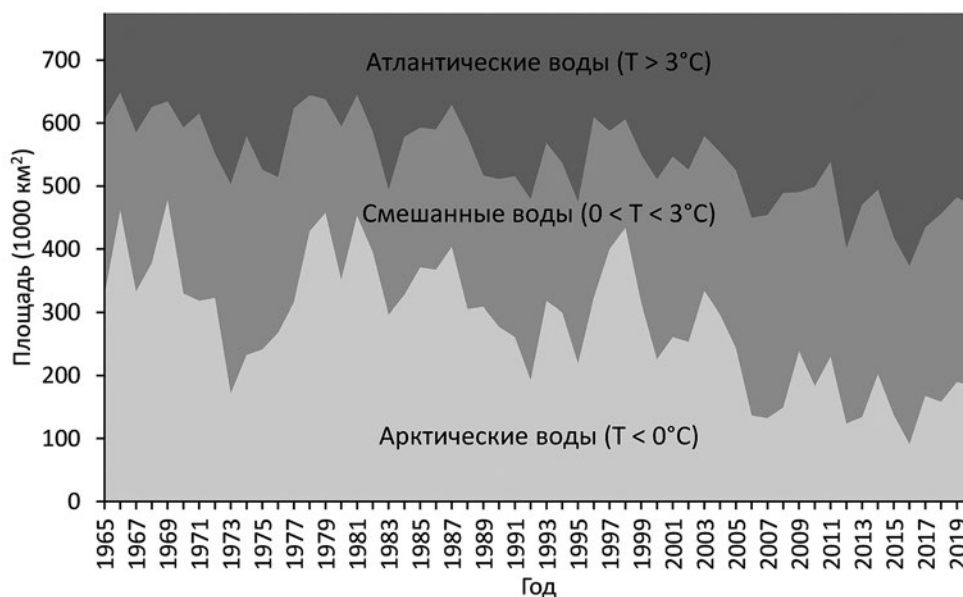


Рис. 10. Площади водных масс в Баренцевом море (71–79° с.ш., 25–55° в.д.) в августе-октябре 1965–2020 гг. (на основе температуры, осреднённой в слое 50–100 м)

Fig. 10. Areas of water masses in the Barents Sea (71–79°N, 25–55°E) in August-October 1965–2020 (based on 50–100 m averaged temperature)

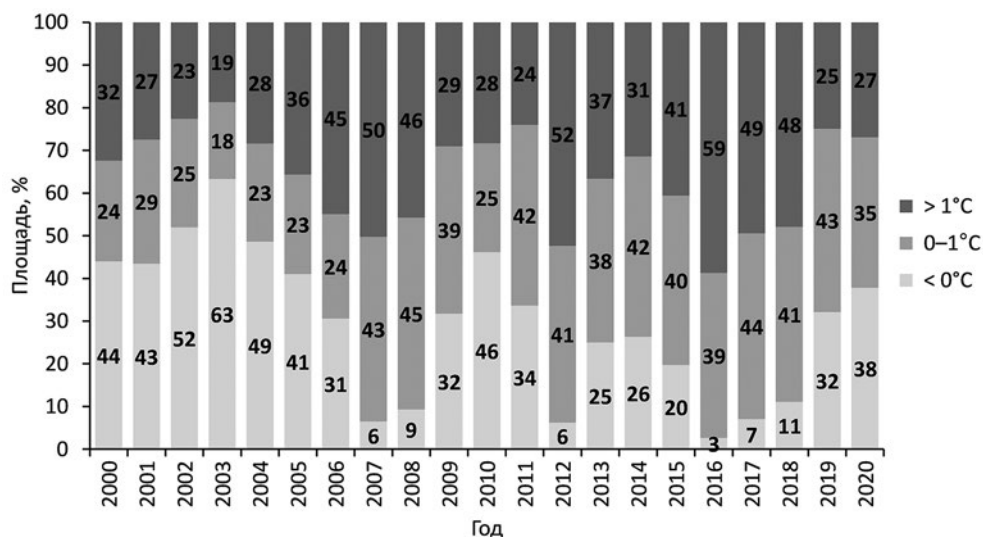


Рис. 11. Площади, занятые придонными водами с разной температурой в Баренцевом море (71–79° с.ш., 25–55° в.д.) в августе-октябре 2000–2020 гг. Цифры – площади вод в процентах

Fig. 11. Areas covered by bottom waters with different temperatures in the Barents Sea (71–79°N, 25–55°E) in August-October 2000–2020. The figures are areas of water masses in percent

(3,3 °C при норме 1,2 °C – на западе моря и 1,1 °C при норме –2,6 °C – на востоке), температуры поверхности моря с 1982 г. (6,6 °C при норме 5,1 °C – на западе моря и 4,8 °C при норме 2,6 °C – на востоке) и температуры атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» с 1900 г. (5,32 °C при норме 4,22 °C, второй максимум после 2012 г.– 5,36 °C), а также минимальная среднегодовая ледовитость моря с 1951 г. (14,5% при норме 34,3%). В осенний период 2016 г. площадь атлантических вод была максимальной (402 тыс. км² при норме 233 тыс. км²), а площадь арктических – минимальной (91 тыс. км² при норме 291 тыс. км²) с 1965 г.

С 2016 г., несмотря на сохранение тёплых, мало-ледных и штормовых условий в Баренцевом море, отмечается тенденция на понижение его теплового состояния: происходит снижение температуры воздушных и водных масс, а также сокращение площади, занятой атлантическими водами, тогда как ледовитость моря и площади, занятые арктическими и холодными придонными водами, увеличиваются. При этом штормовая активность в последние годы остаётся на высоком уровне (142–161 штормовых дней за год при норме 104 дня), а солёность атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» – низкой (в среднем за год 34,69–34,74 при норме 34,77) без какой-либо выраженной тенденции изменения, хотя в осенний период в поверхностных, промежуточных и придонных водах Баренцева моря в эти годы отмечается тенденция к распреснению.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них 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

- Гершанович Д.Е., Муромцев А.М. 1983. Океанологические основы биологической продуктивности Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат. 320 с.
- Елисеева И.И., Юзбашев М.М. 2004. Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика. 656 с.
- Ижевский Г.К. 1961. Океанологические основы формирования промысловой продуктивности морей. М.: Пищепромиздат. 215 с.
- Карсаков А.Л., Трофимов А.Г., Ившин В.А., Анциферов М.Ю., Густоев Д.В., Аверкиев А.С. 2018. Восстановление данных по температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» в 2016–2017 гг. // Труды ВНИРО. Т. 173. С. 193–206. doi:10.36038/2307–3497–2018–173–193–206.
- Коросов А.В., Горбач В.В. 2007. Компьютерная обработка биологических данных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ. 76 с.
- Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю. 2016. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 260 с.

- Ожигин В.К., Третьяк В.Л., Ярагина Н.А., Ившин В.А. 1999. Океанографические условия Баренцева моря и их влияние на выживание и развитие молоди северо-восточной арктической трески. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 88 с.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации – Общее резюме. 2008. М.: Росгидромет. 29 с.
- Трофимов А.Г. 2003. Динамика вод Баренцева моря и её влияние на распределение икры, личинок, 0-группы трески и пикши. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 87 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. doi:10.36038/2307–3497–2018–173–79–91.
- Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. 2010. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин // Проблемы Арктики и Антарктики. № 2(85). С. 52–61.
- Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Клячкин С.В., Фролов С.В. 2012. Глава 10. Морской лёд // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет. С. 400–429.
- Цатуров Ю.С., Клепиков А.В. 2012. Современное изменение климата Арктики: результаты нового оценочного доклада Арктического совета // Арктика: экология и экономика. № 4(8). С. 76–81.
- Шевченко А.В. 2000. Океанологические условия формирования промысловой продуктивности в морях Северо-Европейского бассейна. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 100 с.
- Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B. 2012. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat // J. of Climate. V. 25. № 13. P. 4736–4743. doi:10.1175/JCLI-D-11–00466.1.
- 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. doi:10.1093/icesjms/fss075.
- Dalpadado P., Arrigo K.R., Hjøllo S.S., Rey F., Ingvaldsen R.B., Sperfeld E., van Dijken G.L., Stige L.C., Olsen A., Ottersen G. 2014. Productivity in the Barents Sea – response to recent climate variability // PLoS ONE. V. 9. № 5. Art. e95273. doi:10.1371/journal.pone.0095273.
- Dalpadado P., Ingvaldsen R.B., Stige L.C., Bogstad B., Knutsen T., Ottersen G., Ellertsen B. 2012. Climate effects on Barents Sea ecosystem dynamics // ICES J. of Marine Science. V. 69. № 7. P. 1303–1316. doi:10.1093/icesjms/fss063.
- Drinkwater K.F., Miles M., Medhaug I., Otterå O.H., Kristiansen T., Sundby S., Gao Y. 2014. The Atlantic Multidecadal Oscillation: Its manifestations and impacts with special emphasis on the Atlantic region north of 60°N // J. of Marine Systems. V. 133. P. 117–130. doi:10.1016/j.jmarsys.2013.11.001.
- Eriksen E., Skjoldal H.R., Gjøsæter H., Primicerio R. 2017. Spatial and temporal changes in the Barents Sea pelagic compartment during the recent warming // Progress in Oceanography. V. 151. P. 206–226. doi:10.1016/j.pocan.2016.12.009.
- Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitsky V.M. 2009. Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas: Centennial Ice Cover Observations. Springer Praxis Books. 224 pp. doi:10.1007/978–3–540–85875–1.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. (Eds.). 2020. ICES Report on Ocean Climate 2019 // ICES Cooperative Research Report. № 350. 136 pp. doi:10.17895/ices.pub.7537.
- Ingvaldsen R., Loeng H., Ottersen G., Ådlandsvik B. 2003. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s // ICES Marine Science Symposia. V. 219. P. 160–168.
- Ingvaldsen R.B., Asplin L., Loeng H. 2004. The seasonal cycle in the Atlantic transport to the Barents Sea during the years 1997–2001 // Continental Shelf Research. V. 24. № 9. P. 1015–1032. doi:10.1016/j.csr.2004.02.011.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 pp.
- Jakobsen T., Ozhigin V.K. (Eds.). 2011. The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim: Tapir Academic Press. 825 pp.
- Johannesen E., Ingvaldsen R.B., Bogstad B., Dalpadado P., Eriksen E., Gjøsæter H., Knutsen T., Skern-Mauritzen M., Stiansen J.E. 2012. Changes in Barents Sea ecosystem state, 1970–2009: climate fluctuations, human impact, and trophic interactions // ICES J. of Marine Science. V. 69. № 5. P. 880–889. doi:10.1093/icesjms/fss046.
- 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. doi:10.1016/j.dsr2.2007.08.013.
- Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J.L., Semtner A.J. 2004. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // J. of Geophysical Research. V. 109. Art. C03032. doi:10.1029/2001JC001039.
- Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fahrbach E., Frohlov I.E., Gerdes R., Hansen E., Holfort J., Ivanov V.V., Johnson M.A., Karcher M., Kauker F., Morison J., Orvik K.A., Schauer U., Simmons H.L., Skagseth O., Sokolov V.T., Steele M., Timokhov L.A., Walsh D., Walsh J.E. 2005. One more step toward a warmer Arctic // Geophysical Research Letters. V. 32. № 17. Art. L17605. doi:10.1029/2005GL023740.
- 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., Risebrakken B., Sandø A.B., Semenov V.A., Sorokina S.A. 2013. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // Reviews of Geophysics. V. 51. № 3. P. 415–449. doi:10.1002/rog.20017.
- Yashayev I., Seidov D. 2015. The role of the Atlantic Water in multidecadal ocean variability in the Nordic and Barents Seas // Progress in Oceanography. V. 132. P. 68–127. doi:10.1016/j.pocan.2014.11.009.

REFERENCES

- Gershanovich D.E., Muromtsev A.M. 1983. Oceanological bases of biological productivity of the World Ocean. Leningrad: Gydrometeoizdat Press. 320 pp. (In Russ.).
- Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. 2004. General theory of statistics. Moscow: Finansy i Statistika Press. 656 pp. (In Russ.).
- Izhevsky G.K. 1961. Oceanological bases of forming commercial productivity of the seas. Moscow: Pishchepromizdat Press. 215 pp. (In Russ.).
- Karsakov A.L., Trofimov A.G., Ivshin V.A., Antsiferov M.YU., Gustoev D.V., Averkiev A.S. 2018. Restoration of data on water temperature in the Kola Section for 2016–2017 // Trudy VNIRO. V. 173. P. 193–206. doi:10.36038/2307–3497–2018–173–193–206. (In Russ.).
- Korosov A.V., Gorbach V.V. 2007. Computer processing of biological data. Petrozavodsk: PetrGU Press. 76 pp. (In Russ.).
- Ozhigin V.K., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Antsiferov M. Yu. 2016. The Barents Sea waters: structure, circulation, variability. Murmansk: PINRO Press. 260 pp. (In Russ.).
- Ozhigin V.K., Tretyak V.L., Yaragina N.A., Ivshin V.A. 1999. The Barents Sea oceanographic conditions and their impact on the survival and development of juvenile Northeast Arctic cod. Murmansk: PINRO Press. 88 pp. (In Russ.).
- Assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation – General summary. 2008. Moscow: Rosgidromet Press. 29 pp. (In Russ.).
- Trofimov A.G. 2003. The Barents Sea circulation and its influence on the distribution of eggs, larvae, 0-group of cod and haddock. Murmansk: PINRO Press. 87 pp. (In Russ.).
- 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. doi:10.36038/2307–3497–2018–173–79–91. (In Russ.).
- Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitsky V.M. 2010. Climate changes in the Arctic and Antarctic – a result of acting natural causes // Problems of the Arctic and Antarctic. № 2(85). P. 52–61. (In Russ.).
- Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitsky V.M., Klyachkin S.V., Frolov S.V. 2012. Chapter 10. Sea ice // Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems. Moscow: Rosgidromet Press. P. 400–429. (In Russ.).
- Tsaturov Yu.S., Klepikov A.V. 2012. Present climate changes in the Arctic: results from a new assessment report of the Arctic Council // Arctic: Ecology and Economics. № 4(8). P. 76–81. (In Russ.).
- Shevchenko A.V. 2000. Oceanological conditions for forming commercial productivity in the seas of the North European basin. Murmansk: PINRO Press. 100 pp. (In Russ.).
- Arthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B. 2012. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat // J. of Climate. V. 25. № 13. P. 4736–4743. doi:10.1175/JCLI-D-11–00466.1.
- 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. doi:10.1093/icesjms/fss075.
- Dalpadado P., Arrigo K.R., Hjøllø S.S., Rey F., Ingvaldsen R.B., Sperfeld E., van Dijken G.L., Stige L.C., Olsen A., Ottersen G. 2014. Productivity in the Barents Sea – response to recent climate variability // PLoS ONE. V. 9. № 5. Art. e95273. doi:10.1371/journal.pone.0095273.
- Dalpadado P., Ingvaldsen R.B., Stige L.C., Bogstad B., Knutsen T., Ottersen G., Ellertsen B. 2012. Climate effects on Barents Sea ecosystem dynamics // ICES J. of Marine Science. V. 69. № 7. P. 1303–1316. doi:10.1093/icesjms/fss063.
- Drinkwater K.F., Miles M., Medhaug I., Otterå O.H., Kristiansen T., Sundby S., Gao Y. 2014. The Atlantic Multidecadal Oscillation: Its manifestations and impacts with special emphasis on the Atlantic region north of 60°N // J. of Marine Systems. V. 133. P. 117–130. doi:10.1016/j.jmarsys.2013.11.001.
- Eriksen E., Skjoldal H.R., Gjørseter H., Primicerio R. 2017. Spatial and temporal changes in the Barents Sea pelagic compartment during the recent warming // Progress in Oceanography. V. 151. P. 206–226. doi:10.1016/j.pocean.2016.12.009.
- Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitsky V.M. 2009. Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas: Centennial Ice Cover Observations. Springer Praxis Books. 224 pp. doi:10.1007/978–3–540–85875–1.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. (Eds.). 2020. ICES Report on Ocean Climate 2019 // ICES Cooperative Research Report. № 350. 136 pp. doi:10.17895/ices.pub.7537.
- Ingvaldsen R., Loeng H., Ottersen G., Ådlandsvik B. 2003. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s // ICES Marine Science Symposia. V. 219. P. 160–168.
- Ingvaldsen R.B., Asplin L., Loeng H. 2004. The seasonal cycle in the Atlantic transport to the Barents Sea during the years 1997–2001 // Continental Shelf Research. V. 24. № 9. P. 1015–1032. doi:10.1016/j.csr.2004.02.011.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 pp.
- Jakobsen T., Ozhigin V.K. (Eds.). 2011. The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim: Tapir Academic Press. 825 pp.
- Johannessen E., Ingvaldsen R.B., Bogstad B., Dalpadado P., Eriksen E., Gjørseter H., Knutsen T., Skern-Mauritzen M., Stiansen J.E. 2012. Changes in Barents Sea ecosystem state, 1970–2009: climate fluctuations, human impact, and trophic interactions // ICES J. of Marine Science. V. 69. № 5. P. 880–889. doi:10.1093/icesjms/fss046.
- 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. doi:10.1016/j.dsr2.2007.08.013.
- Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J.L., Semtner A.J. 2004. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation

- // J. of Geophysical Research. V. 109. Art. C03032. doi:10.1029/2001JC001039.
- Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fahrbach E., Frohlov I.E., Gerdes R., Hansen E., Holfort J., Ivanov V.V., Johnson M.A., Karcher M., Kauker F., Morison J., Orvik K.A., Schauer U., Simmons H.L., Skagseth O., Sokolov V.T., Steele M., Timokhov L.A., Walsh D., Walsh J.E.* 2005. One more step toward a warmer Arctic // Geophysical Research Letters. V. 32. № 17. Art. L17605. doi:10.1029/2005GL023740.
- 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.* 2013. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // Reviews of Geophysics. V. 51. № 3. P. 415–449. doi:10.1002/rog.20017.
- Yashayev I., Seidov D.* 2015. The role of the Atlantic Water in multidecadal ocean variability in the Nordic and Barents Seas // Progress in Oceanography. V. 132. P. 68–127. doi:10.1016/j.pocean.2014.11.009.
- Поступила в редакцию 19.05.2021 г.
Принята после рецензии 12.12.2021 г.*