



Среда обитания водных биологических ресурсов

Изменчивость и тренды ледовитости Баренцева моря и Арктики в 1979–2022 гг.

А.Г. Трофимов

Полярный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича), ул. Академика Книповича, 6, Мурманск, 183038

E-mail: trofimov@pinro.vniro.ru

SPIN-код: А.Г. Трофимов: 6762–9699

Цель работы: оценить межгодовую и декадную изменчивость ледовитости Баренцева моря и Арктики в разные сезоны за период с 1979 по 2022 гг.

Материалы: спутниковые данные по площади льда в Баренцевом море и Арктике, климатические индексы, океанографические данные, собранные в ходе экспедиций ПИНРО в Баренцево море, и другая доступная информация о его гидрометеорологических условиях в 1979–2022 гг.

Методы: сравнительный анализ данных, методы описательной статистики, корреляционный, регрессионный, гармонический и кластерный анализы.

Результаты: дана характеристика межгодовых изменений ледовитости Баренцева моря и Арктики в разные сезоны за 1979–2022 г. Современные изменения климата, проявившиеся в значительном потеплении воздушных и водных масс в Арктике, привели к существенному сокращению площади льдов в исследуемых районах в последние десятилетия: во все месяцы и сезоны имели место хорошо выраженные отрицательные тренды. Среднегодовая ледовитость Арктики сокращалась со скоростью 532 тыс. км² за десятилетие, Баренцева моря – со скоростью 105 тыс. км² за десятилетие. За последние 40 лет площадь льда в Арктике сократилась на 14%, а в Баренцевом море – вдвое (на 51%), при этом продолжительность безлёдного периода в Баренцевом море увеличилась с одного до трёх месяцев. Выявлены гидрометеорологические параметры, наиболее тесно связанные с ледовитостью Арктики ($|r| \geq 0,40$) и Баренцева моря ($|r| \geq 0,60$), для которой построены надёжные регрессионные модели, объясняющие 45,2 и 88,0% её изменчивости соответственно. Количественно оценён вклад отдельных факторов в объясняемую уравнениями регрессии изменчивость ледовитости, и отмечена ведущая роль температуры воздуха.

Практическая значимость: полученные результаты позволят лучше понимать климатические процессы, происходящие в последние десятилетия в Арктике в целом, и в Баренцевом море в частности, и могут быть использованы для оценки влияния изменений климата на основные объекты российского рыболовства в этих районах.

Ключевые слова: Арктика, Баренцево море, ледовитость, межгодовая изменчивость, тренды.

Arctic and Barents Sea ice extent variability and trends in 1979–2022

Alexander G. Trofimov

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

The aim of the paper is to assess interannual and decadal variability of the Barents Sea and Arctic ice extent in various seasons for the period from 1979 to 2022.

The material for the study was satellite data on the Barents Sea and Arctic ice extent, climate indices, oceanographic data obtained during surveys in the Barents Sea by PINRO and other available information on hydro-meteorological conditions of the sea in 1979–2022.

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

Results: The year-to-year changes in the Barents Sea and Arctic ice extent in various seasons are described for 1979–2022. The modern climate changes, manifested in substantial warming of air and water masses in the Arctic, resulted in a considerable ice extent reduction in the studied areas in recent decades. Well-marked negative trends took place in all months and seasons. The annual mean ice extent was decreasing at a rate of 532 thousand km² per decade in the Arctic, and at a rate of 105 thousand km² per decade in the Barents Sea. Over the past 40 years, the ice extent in the Arctic has decreased by 14%, and in the Barents Sea – by half (by 51%), while the ice-free period duration has increased in the Barents Sea from one to three months. Hydrometeorological parameters were identified that are most closely related to the ice extent in the Arctic ($|r| \geq 0.40$) and Barents Sea ($|r| \geq 0.60$). Reliable regression models were developed that explain 45.2 and 88.0% of its variability, respectively. The contribution of individual factors to the ice extent variability explained by regression equations was quantitatively assessed, and the leading role of air temperature was noted.

Practical significance: The obtained results are useful for a better understanding of the climate processes occurring in the Arctic and Barents Sea in recent decades and can be used to assess the impact of climate changes on the main objects of Russian fishery in these areas.

Keywords: Arctic, Barents Sea, ice extent, interannual variability, trends.

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море относится к шельфовым морям Северного Ледовитого океана и благодаря своему географическому положению играет важную роль в водообмене между Северной Атлантикой и Арктическим бассейном [Ingvaldsen et al., 2004; Masłowski et al., 2004; Boitsov et al., 2012; Ожигин и др., 2016]. Кроме того, оно является ценным рыбохозяйственным водоёмом с высокой биопродуктивностью, которая во многом определяется океанографическими условиями, а они, в свою очередь, – упомянутым выше водообменом [Ижевский, 1961; Гершанович, Муромцев, 1983; Ожигин и др., 1999; Ожигин и др., 2016; Шевченко, 2000; Loeng, Drinkwater, 2007; Jakobsen, Ozhigin, 2011; Dalpadado et al., 2014].

В последние десятилетия в морях Северного Ледовитого океана наблюдаются существенные изменения климата: температура воздушных и водных масс неуклонно растёт, а площадь льдов сокращается [Ingvaldsen et al., 2003; Boitsov et al., 2012; Трофимов и др., 2018; González-Pola et al., 2020]. Особое внимание здесь обращает на себя ледовитость – площадь покрытой льдом акватории этих морей, которая не только служит общепризнанным индикатором изменений климата в Арктике [Serreze et al., 2007; Гудкович и др., 2009; Årthun et al., 2012; Mohamed et al., 2022; Лис и др., 2023], но и является важным компонентом окружающей среды, оказывающим значительное влияние на функционирование морских экосистем и хозяйственную деятельность человека [Денисов, 2002; Фролов и др., 2007; Parkinson, Cavalieri, 2008; Жичкин, 2015]. Лёд оказывает воздействие на окружающую среду, ограничивая обмен теплом, влагой и количеством движения между океаном и атмосферой и отражая большую часть падающей на него солнечной радиации [Stroeve, Notz, 2018]. Процессы формирования и таяния льда приводят, соответственно, к увеличению и уменьшению солёности подстилающих вод, оказывая влияние на их конвективное перемешивание и океаническую циркуляцию [Безруков, 2006; Parkinson, Cavalieri, 2008]. Дрейфуя, лёд переносит в другие районы свою холодную распресснённую массу, изменяя температуру и солёность поверхностных вод [Parkinson, 1996]. Изменение площади льдов влияет на жизнь морских млекопитающих Арктики, например, белых медведей, для которых лёд является платформой, с которой они охотятся, получая свой преимущественно морской рацион [Денисов, 2002; Stirling,

Parkinson, 2006; Kovacs et al., 2011]. Ледовитость также оказывает большое влияние на деятельность человека, связанную с промыслом морских гидробионтов, разработкой нефтегазовых месторождений в арктических морях и перевозкой грузов по Северному морскому пути [Jakobsen, Ozhigin, 2011; Жичкин, 2015; Лис и др., 2023].

Многие исследователи, которые будут упомянуты далее при обсуждении результатов данной работы, в своё время изучали межгодовую изменчивость ледовитости Северного Ледовитого океана в целом и его морей по отдельности. Но поскольку массивы данных постоянно обновляются, пополняясь новой информацией, исследования в этом направлении не теряют свою востребованность. Задача мониторинга, изучения и анализа океанографических условий в этом регионе, в том числе такого важного компонента морской среды, как лёд, по-прежнему остаётся актуальной, особенно в условиях современных глобальных изменений климата, и учитывая важность Арктики и её морей, в первую очередь Баренцева, для рыбохозяйственной и нефтегазовой отраслей, а также как транспортной артерии.

Цель данной работы – оценить межгодовую и десятилетнюю изменчивость ледовитости Баренцева моря и Арктики в разные сезоны за период с 1979 по 2022 гг.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В качестве меры ледовитости обычно используют площадь льда в границах моря, выраженную в квадратных километрах, или, чаще, отношение площади льда к площади моря, выраженное в процентах [Тимохов и др., 2019; Вязигина и др., 2021]. В настоящей работе под ледовитостью будем понимать площадь льда, выраженную в квадратных километрах.

Для анализа межгодовых изменений ледовитости Баренцева моря и Арктики, а также её связи с другими климатическими параметрами использовались следующие данные за 1979–2022 гг. (среднегодовые значения, если не сказано иного): среднемесячные и среднегодовые площади льда в Баренцевом море¹ и Арктике (здесь под Арктикой имеется в виду весь Северный Ледовитый океан со всеми арктическими морями и прилегающими водами),² годовой и зимний индексы

¹ Regional Sea Ice. NOAA. National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/regional-sea-ice/> 10.03.2023.

² Sea Ice Index Daily and Monthly Image Viewer. NSIDC. https://nsidc.org/data/seaice_index/data-and-image-archive 10.03.2023.

Арктического³ и Северо-Атлантического⁴ колебаний, индекс Атлантического мультideкадного колебания,⁵ теплозапас вод Норвежского моря в слое 0–800 м в мае,⁶ количество штормовых дней (с ветром более 15 м/с) в целом за год в центральной части Баренцева моря (68–80° с. ш. 30–40° в. д.),⁷ температура воздуха, осреднённая для западной (70–76° с. ш. 15–35° в. д.) и восточной (69–77° с. ш. 35–55° в. д.) частей Баренцева моря,⁸ температура воды на разрезе «Кольский меридиан» (слой 0–200 м, 70°30′–72°30′ с. ш. 33°30′ в. д.) [Карсаков и др., 2022], средняя по площади (71–79° с. ш. 25–55° в. д.) температура воды на глубине 100 м, а также площади атлантических и арктических вод в слое 50–100 м в Баренцевом море в августе–сентябре. Расчёт площадей вод и средней по площади температуры выполнялся на основе данных по температуре, взятых из океанографической базы данных ПИНРО. Аномалии рассчитывались на основе среднесезонных значений за период с 1981 по 2020 гг., а их нормирование выполнялось с помощью стандартного отклонения (σ) за тот же период.

В работе применялись методы описательной статистики, а также сравнительный, корреляционный, регрессионный, гармонический и кластерный анализы [Елисеева, Юзбашев, 2004; Протасов, Юров, 2016; Малинин, 2020]. Статистическая обработка данных и построение графиков выполнялись в программах Microsoft Excel 2016 (надстройка «Анализ данных») и Statgraphics 19.

Достоверность трендов в изменениях ледовитости оценивалась с помощью критерия Стьюдента и соответствующего ему уровня значимости p -value. Если p -value было меньше 0,05, тренд считался статистически значимым с вероятностью 95%, а если меньше 0,01, то, соответственно, с вероятностью 99% [Корозов, Горбач, 2007]. Аналогичный подход использовался при оценке значимости рассчитанных в работе коэффициентов корреляции.

При выполнении кластерного анализа применялся метод Уорда, а в качестве метрики использовалось квадратичное евклидово расстояние. Данные предварительно стандартизовались путём вычитания из них среднего значения и последующего деления на стандартное отклонение.

Для корреляционного и регрессионного анализов использовались данные, из которых во избежание эффекта ложной корреляции предварительно удалялся линейный тренд с тем, чтобы переменные отвечали условиям стационарности по математическому ожиданию. Расчёт вклада отдельных независимых переменных (предикторов) регрессионного уравнения в изменчивость зависимой переменной (функции отклика) выполнялся по формуле: $\Delta_j = 100 \times r(x_j, y) \times \beta_j$, где: Δ_j – вклад (%) j -го предиктора; $r(x_j, y)$ – коэффициент парной корреляции между j -м предиктором и зависимой переменной; $\beta_j = b_j \times \sigma(x_j) / \sigma(y)$ – стандартизованный коэффициент регрессии при j -м предикторе; b_j – коэффициент регрессии при j -м предикторе; $\sigma(x_j)$ – стандартное отклонение j -й независимой переменной; $\sigma(y)$ – стандартное отклонение зависимой переменной [Малинин, 2008].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ледовитость Арктики имеет хорошо выраженный годовой ход: среднесезонный сезонный максимум наступает в феврале – марте и составляет 15,1–15,2 млн км², тогда как минимум (6,0 млн км²) приходится на сентябрь (рис. 1, табл. 1). Сокращение площади льда происходит в течение 6 месяцев (март – август) с наибольшей скоростью в июне – июле (2,0–2,4 млн км²/мес.), её увеличение длится также полгода (сентябрь – февраль) с наибольшей скоростью в октябре – декабре (1,9–2,4 млн км²/мес.). В период активного таяния льда ледовитость за два месяца (с июня по август) сокращается на 4,8 млн км² (51% от размаха среднесезонных сезонных колебаний, составляющего 9,3 млн км²), а в период наиболее интенсивного ледообразования она также за два месяца (с октября по декабрь) увеличивается на ту же величину – 4,8 млн км².

Ледовитость Баренцева моря, как и Арктики в целом, имеет хорошо выраженный годовой ход: среднесезонный сезонный максимум (0,85 млн км²) наступает в марте–апреле, в конце гидрологической зимы, тогда как минимум (0,04–0,06 млн км²) приходится на август–сентябрь, самые тёплые месяцы (см. рис. 1, табл. 1). При этом в отдельные годы сроки наступления сезонных экстремумов могут смещаться относительно среднесезонных, а их продолжительность может варьировать от одного до четырёх

³ Arctic Oscillation. NOAA. Climate Prediction Center. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml 10.03.2023.

⁴ Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (PC-based). NCAR. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based> 10.03.2023.

⁵ AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index. NOAA PSL. <https://www.psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/> 10.03.2023.

⁶ ICES Report on Ocean Climate (IROC). ICES. <https://ocean.ices.dk/core/iroc#> 10.03.2023.

⁷ Данные получены из ФГБУ «Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды».

⁸ Monthly mean time series from the NCEP Reanalysis Dataset. NOAA PSL. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl> 10.03.2023.

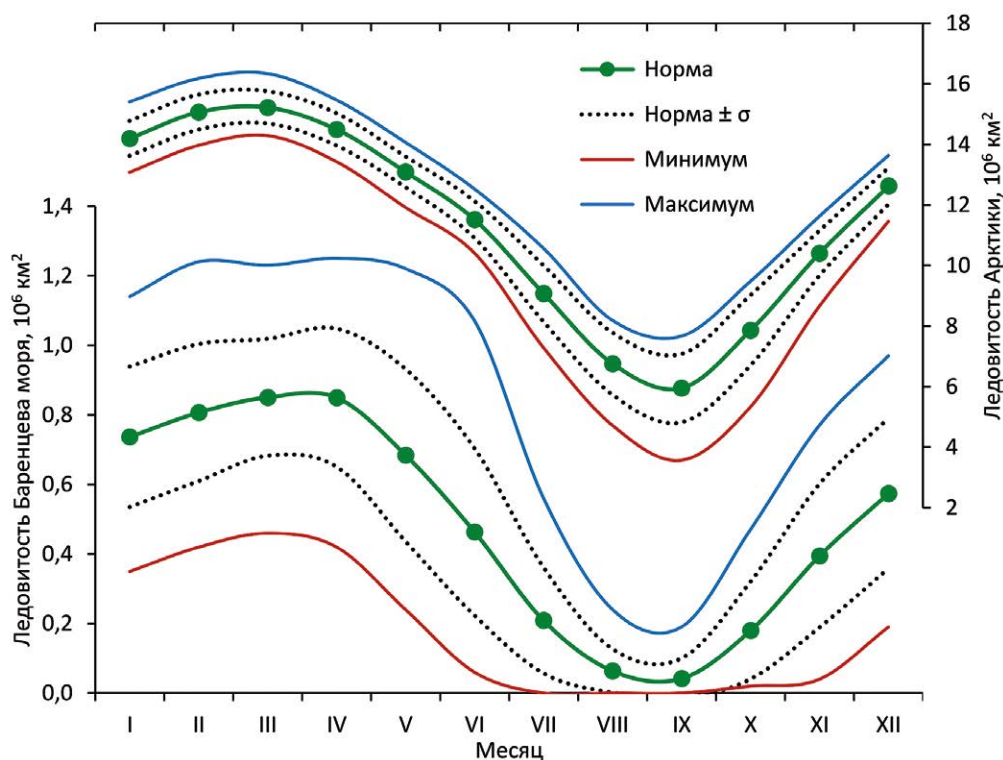


Рис. 1. Норма (среднеголетние значения за 1981–2020 гг., σ – стандартное отклонение), минимумы и максимумы ледовитости Баренцева моря и Арктики по месяцам

Fig. 1. Norm (long-term means for the period 1981–2020, σ – standard deviation), minima and maxima of the Barents Sea and Arctic ice extent by months

Таблица 1. Статистические характеристики внутригодовых изменений ледовитости Баренцева моря и Арктики
Table 1. Statistical characteristics of intra-annual changes in the Barents Sea and Arctic ice extent

Месяц	Количество лет с максимальной ледовитостью		Количество лет с минимальной ледовитостью		Среднеголетнее значение, 10^6 км^2		Стандартное отклонение, 10^6 км^2		Скорость изменения, $10^6 \text{ км}^2/\text{месяц}$		Коэффициент вариации	
	БМ	Ар	БМ	Ар	БМ	Ар	БМ	Ар	БМ	Ар	БМ	Ар
I	4	–	–	–	0,74	14,20	0,20	0,57	0,12	1,22	0,27	0,04
II	17	32	–	–	0,81	15,07	0,20	0,58	0,06	0,51	0,24	0,04
III	20	44	–	–	0,85	15,23	0,17	0,53	0,02	–0,29	0,20	0,03
IV	26	–	–	–	0,85	14,50	0,20	0,53	–0,08	–1,07	0,23	0,04
V	2	–	–	–	0,68	13,09	0,25	0,51	–0,19	–1,49	0,36	0,04
VI	–	–	–	–	0,46	11,52	0,24	0,61	–0,24	–2,01	0,52	0,05
VII	–	–	5	–	0,21	9,08	0,15	0,93	–0,20	–2,38	0,73	0,10
VIII	–	–	27	–	0,06	6,76	0,06	1,03	–0,08	–1,56	0,98	0,15
IX	–	–	43	44	0,04	5,95	0,06	1,13	0,06	0,55	1,35	0,19
X	–	–	5	–	0,18	7,86	0,14	1,16	0,18	2,23	0,78	0,15
XI	–	–	–	–	0,40	10,41	0,21	0,74	0,20	2,38	0,52	0,07
XII	1	–	–	–	0,57	12,63	0,22	0,60	0,17	1,90	0,38	0,05

Примечание: БМ – Баренцево море; Ар – Арктика; прочерк означает, что в годовом цикле в этом месяце максимум (минимум) не наблюдался; за максимальные (минимальные) значения принимались абсолютные максимумы (минимумы), а также значения, отличающиеся от них не более чем на 3% размаха среднеголетнего годового хода; количество лет с максимальной и минимальной ледовитостью по месяцам подсчитывалось за период с 1979 по 2022 гг.

месяцев. Так, в 1979–2022 гг. сезонный максимум ледовитости в разные годы наблюдался в широком диапазоне месяцев: с декабря по май, но наиболее часто в марте-апреле, тогда как сезонный минимум отмечался в более узком диапазоне: с июля по октябрь, но в основном в сентябре (см. табл. 1). В отличие от Арктики в целом, в Баренцевом море сокращение площади льда начинается на месяц позже и происходит на протяжении 5 месяцев (апрель – август) с наибольшей скоростью в мае – июле (0,19–0,24 млн км²/мес.), тогда как её увеличение длится дольше – 7 месяцев (сентябрь – март), с наибольшей скоростью в октябре – декабре (0,17–0,20 млн км²/мес.). В период активного таяния льда ледовитость Баренцева моря за два месяца (с мая по июль) сокращается на 0,48 млн км² (59% от размаха среднесезонных колебаний, составляющего 0,81 млн км²), а в период наиболее интенсивного ледообразования она также за два месяца (с октября по декабрь) увеличивается на 0,39 млн км² (48% от размаха годового хода).

Межгодовая изменчивость ледовитости Арктики существенно меньше сезонной. Несмотря на то, что размах межгодовых колебаний ледовитости (разница между абсолютными максимумом и минимумом) в отдельные месяцы может достигать 4σ, составляя в разные месяцы от 2,0 до 4,2 млн км² и в среднем за год

2,3 млн км², он тем не менее примерно в 3–4 раза меньше размаха среднесезонных колебаний – 9,3 млн км² (табл. 2). Наибольшая межгодовая изменчивость площади льда в Арктике (стандартное отклонение более 1,0 млн км², коэффициент вариации больше 0,15) характерна для месяцев с низкой ледовитостью, август – октябрь, а наименьшая (стандартное отклонение около 0,6 млн км² и менее, коэффициент вариации меньше 0,05) – для месяцев с высокой ледовитостью, декабрь – июнь (см. табл. 1).

Межгодовая изменчивость ледовитости Баренцева моря весьма высока, размах её межгодовых колебаний в отдельные месяцы может достигать 4σ, составляя в разные месяцы от 0,19 до 1,01 млн км² и в среднем за год 0,59 млн км². При этом по величине он соизмерим с размахом среднесезонных колебаний – 0,81 млн км² (см. табл. 2). Наибольшая межгодовая изменчивость площади льдов в Баренцевом море характерна для весны, когда происходит их активное таяние, – стандартное отклонение в мае-июне составляет 0,24–0,25 млн км², а наименьшая отмечается в самые тёплые месяцы, август и сентябрь (стандартное отклонение 0,06 млн км²), что объясняется небольшим количеством льда, а то и полным его отсутствием в море в эти месяцы, на которые приходится сезонный минимум ледовитости (см. табл. 1). Следует отметить, что оценка межгодовой изменчи-

Таблица 2. Размах межгодовых и среднесезонных колебаний ледовитости Баренцева моря и Арктики
Table 2. Range of interannual and long-term mean seasonal fluctuations in the Barents Sea and Arctic ice extent

Месяц	Арктика				Баренцево море			
	IAA, млн км ²	SA, млн км ²	SA/IAA	IAA/σ	IAA, млн км ²	SA, млн км ²	SA/IAA	IAA/σ
I	2,33		4,0	4,1	0,79		1,0	3,9
II	2,21		4,2	3,8	0,82		1,0	4,2
III	2,05		4,5	3,9	0,77		1,0	4,6
IV	2,04		4,5	3,8	0,83		1,0	4,2
V	2,15		4,3	4,2	0,98		0,8	4,0
VI	2,12		4,4	3,5	1,01		0,8	4,2
VII	3,28		2,8	3,5	0,56		1,4	3,7
VIII	3,47		2,7	3,4	0,24		3,4	3,8
IX	4,10		2,3	3,6	0,19		4,3	3,3
X	4,15		2,2	3,6	0,45		1,8	3,2
XI	2,97		3,1	4,0	0,73		1,1	3,5
XII	2,18		4,3	3,6	0,78		1,0	3,6
Год	2,30	9,27	4,0	3,3	0,59	0,81	1,4	3,8

Примечание: IAA – размах межгодовых колебаний ледовитости; SA – размах среднесезонных колебаний ледовитости; σ – стандартное отклонение ледовитости.

ности ледовитости Баренцева моря и Арктики по стандартному отклонению отличается от таковой по коэффициенту вариации, который определяется как отношение стандартного отклонения к среднему значению и позволяет сравнивать ряды данных независимо от их масштаба и единиц измерения. Так, если судить по стандартному отклонению, в тёплые месяцы с низкой ледовитостью (июль – октябрь), когда изменчивость площади льда в Баренцевом море наименьшая (стандартное отклонение 0,06–0,15 млн км² в сравнении с 0,17–0,25 млн км² в остальные месяцы), в Арктике она, наоборот, наибольшая (стандартное отклонение 0,93–1,16 млн км² в сравнении с 0,51–0,74 млн км² в остальные месяцы), поскольку там лёд в тёплое время года полностью не исчезает, продолжая активно таять. А если судить по коэффициенту вариации, максимальная изменчивость площади льда и в Баренцевом море, и в Арктике приходится на тёплые месяцы с низкой ледовитостью: в июле – октябре он составляет 0,73–1,35 и 0,10–0,19 для Баренцева моря и Арктики соответственно (с максимумами 1,35 и 0,19 в сентябре), а в остальные месяцы – всего 0,20–0,52 и 0,03–0,07. Изменяясь в разные месяцы от 0,20 до 1,35, коэффициент вариации ледовитости Баренцева моря значительно (в среднем в 7 раз) превышает таковой для Арктики (0,03–0,19) (см. табл. 1), что свидетельствует о высокой изменчивости площади льдов в Баренцевом море, которое считается показательным районом Арктики в плане отражения происходящих в ней климатических изменений.

Полученные результаты по сезонной и межгодовой изменчивости ледовитости Баренцева моря

согласуются с выводами других исследователей [Тимохов и др., 2019; Лис, Егорова, 2022], а некоторые имеющие место различия обусловлены, скорее всего, разной структурой исходных данных и длиной выборки. Так, в настоящей работе использовались данные по ледовитости за 1979–2022 гг., основанные на спутниковых наблюдениях и единой методике их обработки, тогда как в упомянутых выше работах, помимо спутниковых данных, также привлекались авиационные и судовые наблюдения за более ранний период, которые удлинители ряды исходных данных, но вместе с тем внесли в них определённую неоднородность.

На протяжении последних 40 лет в Арктике происходит неуклонное сокращение площади льдов, обусловленное современным потеплением воздушных и водных масс в этом регионе [Трофимов и др., 2018; González-Pola et al., 2020]. Уменьшение ледовитости отмечено во все месяцы и сезоны – все тренды отрицательные и статистически значимые (p -value = 0,000) (рис. 2). Наибольшее сокращение площади льда наблюдалось летом (в среднем за сезон на 734 тыс. км² или 8,3% за десятилетие), наименьшее – зимой (414 и 391 тыс. км² или 2,6 и 2,8% за десятилетие соответственно), а осенью оно составляло 588 тыс. км² или 5,1% за десятилетие. В тёплую часть года (июль – октябрь) ледовитость уменьшалась на 685–804 тыс. км² или 6,5–10,3% за десятилетие, тогда как в холодную (декабрь – май) – почти в два раза медленнее – на 337–443 тыс. км² или 2,4–3,3% за десятилетие (см. рис. 2). Среднегодовая ледовитость Арктики в последние десятилетия сокращалась со скоростью 532 тыс. км² или 4,2% за десятилетие (рис. 3).

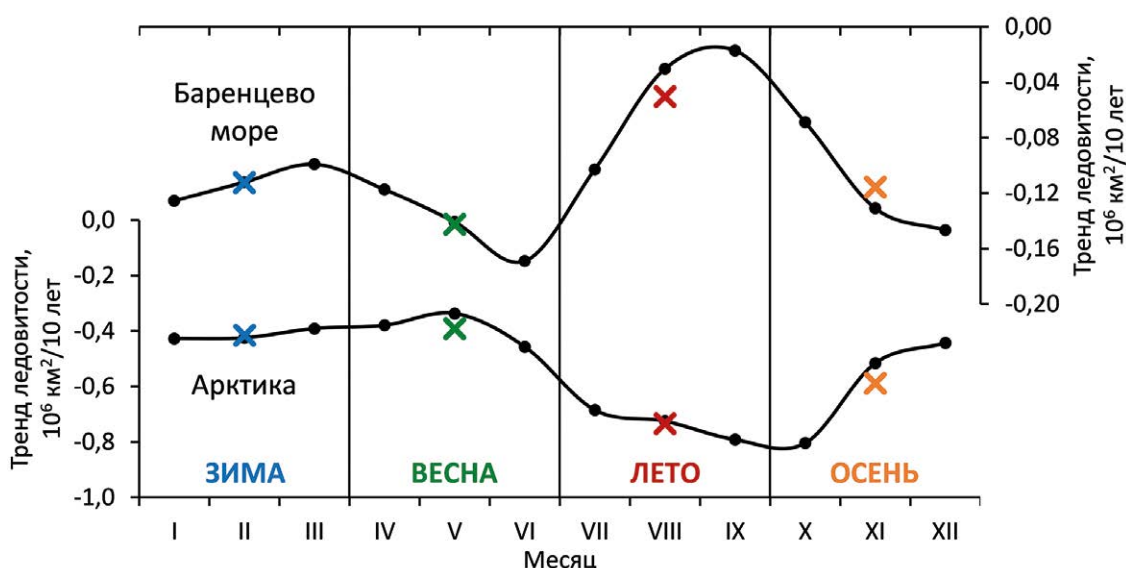


Рис. 2. Тренды ледовитости Баренцева моря и Арктики по каждому месяцу и сезону за период 1979–2022 гг.
 Fig. 2. Barents Sea and Arctic ice extent trends by months and seasons over the period 1979–2022

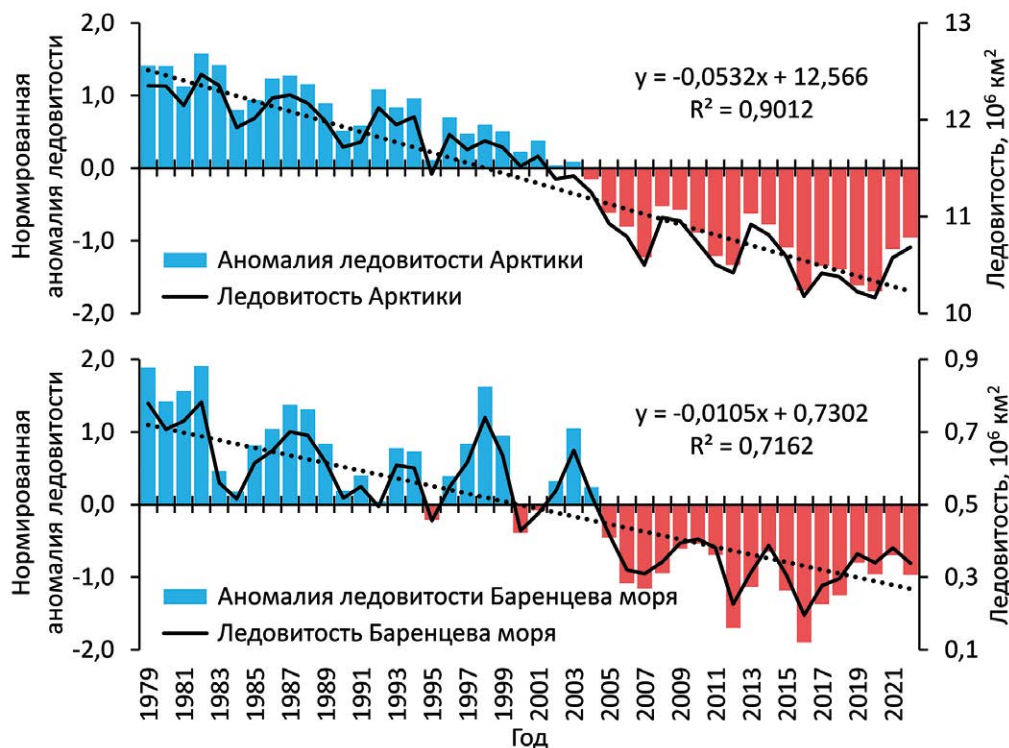


Рис. 3. Ледовитость Баренцева моря и Арктики, а также её нормированные аномалии в 1979–2022 гг.

Fig. 3. Barents Sea and Arctic ice extent as well as its normalized anomalies in 1979–2022

В Баренцевом море, как и в Арктике в целом, площадь льдов в последние десятилетия неуклонно сокращалась: тренды во все месяцы и сезоны были отрицательные и статистически значимые (для сентября $p\text{-value} = 0,008$, а для остальных месяцев и всех сезонов $p\text{-value} = 0,000$) (см. рис. 2). Наибольшее сокращение площади льда в Баренцевом море наблюдалось весной (в среднем за сезон на 142 тыс. км² или 14,5% за десятилетие), особенно в июне (169 тыс. км² или 20,3% за десятилетие), а наименьшее – летом (50 тыс. км² или 23,4% за десятилетие), особенно в августе и сентябре (30 и 17 тыс. км² или 23,6 и 22,4% за десятилетие соответственно). В осенне-зимний период оно составляло 116 и 112 тыс. км² или 18,2 и 10,7% за десятилетие. Здесь следует уточнить, что наибольшие и наименьшие величины трендов, выраженные в абсолютных значениях, т. е. в квадратных километрах, не всегда соответствуют таковым, выраженным в относительных значениях, т. е. в процентах. Это связано с тем, что процентное выражение тренда рассчитывается относительно его начального значения (за 1979 г.), которое в Баренцевом море в самые тёплые месяцы в 11 раз меньше, чем в самые холодные (для сравнения, в Арктике начальное значение тренда в тёплые месяцы лишь в два раза меньше, чем в холодные). На рис. 2 видно, что в тёплый период

года выраженные в квадратных километрах тренды ледовитости в Баренцевом море были наименьшими по модулю (–55 тыс. км² за десятилетие в среднем за июль – октябрь при –130 тыс. км² за десятилетие в среднем за остальные месяцы), тогда как в Арктике они в этот период, наоборот, были наибольшими (–751 тыс. км² за десятилетие в июле – октябре при –422 тыс. км² за десятилетие в остальные месяцы), что и понятно, поскольку в Баренцевом море в тёплый сезон льда мало, или он отсутствует полностью, поэтому и сокращение его площади невелико, тогда как в Арктике лёд в летний период полностью не исчезает, его остаётся достаточно много, чтобы позволить его площади в более тёплые годы продолжать интенсивно сокращаться. Если рассматривать тренды, выраженные в процентах, то их наибольшие по модулю значения отмечаются в тёплый период как для Баренцева моря (–22,7% за десятилетие в июле – октябре при –14,1% за десятилетие в остальные месяцы), так и для Арктики (–8,5% за десятилетие в июле – октябре при –3,0% за десятилетие в остальные месяцы). Среднегодовая ледовитость Баренцева моря в последние десятилетия сокращалась на 105 тыс. км² или 14,6% за десятилетие (см. рис. 3).

Результаты, полученные другими авторами [Фролов и др., 2007; Parkinson, Cavalieri, 2008; Гудкович

и др., 2009; Cavalieri, Parkinson, 2012; Onarheim et al., 2018; Stroeve, Notz, 2018; Крашенинникова, Крашенинникова, 2019; Тимохов и др., 2019; Wu, Wang, 2019; Kumar et al., 2021; Mohamed et al., 2022], также указывают на наличие в ледовитости Арктики и Баренцева моря отрицательных трендов. По сравнению с более короткими периодами 1979–2006 и 1979–2010 гг. [Parkinson, Cavalieri, 2008; Cavalieri, Parkinson, 2012] в настоящей работе для периода 1979–2022 гг. отмечено увеличение по модулю трендов в ледовитости Арктики как для среднегодовых значений, так и для средних за разные сезоны (табл. 3), что свидетельствует о более интенсивном сокращении площади льдов в этом регионе в 2010-е годы. Однако, если сравнивать тренды, полученные в данной работе, с трендами за 1979–2018 гг. [Kumar et al., 2021], можно отметить уменьшение их величины (см. табл. 3), что объясняется наметившейся в последние годы тенденцией на увеличение площади льдов в Арктике, о чём будет сказано ниже. В другой работе [Stroeve, Notz, 2018] за период 1979–2018 гг. отрицательные линейные тренды ледовитости для зимы (март) и лета (сентябрь) составили соответственно –113 и –14 тыс. км² за десятилетие в Баренцевом море и –422 и –833 тыс. км² за десятилетие в Арктике, что достаточно близко к нашим значениям за 1979–2022 гг.: в самые холодные месяцы (февраль – апрель) от –99 до –117 тыс. км² за десятилетие в Баренцевом море и от –379 до –425 тыс. км² за десятилетие в Арктике, а в самые тёплые месяцы, август и сентябрь, соответственно –30

и –17 тыс. км² за десятилетие в Баренцевом море и –725 и –791 тыс. км² за десятилетие в Арктике.

Если взглянуть на среднедекадный (средний за десятилетие) годовой ход ледовитости Арктики (рис. 4), то, начиная с 1980-х гг., отчётливо видно неуклонное сокращение площади льдов от десятилетия к десятилетию, отмечавшееся во все месяцы. К 2010-м гг. уменьшение площади льда в Арктике относительно 1980-х гг. составило в разные месяцы 7,4–35,6% или 1,06–2,56 млн км²: максимальное (35,6% или 2,56 млн км²) в сентябре – самый тёплый месяц, когда наблюдается сезонный минимум ледовитости, а минимальное (7,4–7,8% или 1,06–1,18 млн км²) в марте – мае – сезонный максимум ледовитости и начало таяния льда (см. рис. 4, табл. 4). Если рассматривать отдельные сезоны, то наибольшее относительное сокращение среднедекадной ледовитости произошло летом (в среднем за сезон на 28,2% – с 8,41 до 6,04 млн км²), а наименьшее – зимой и весной (на 8,2% – с 15,47 до 14,21 млн км² и на 8,9% – с 13,67 до 12,44 млн км² соответственно), тогда как осенью оно составило 16,6% (с 11,21 до 9,34 млн км²). В среднем за год в 2010-е гг. льда в Арктике стало на 1,68 млн км² меньше по сравнению с 1980-ми гг.: сокращение составило 13,8% (с 12,19 до 10,51 млн км²) (см. табл. 4).

Среднедекадная ледовитость Баренцева моря, как и Арктики в целом, во все месяцы неуклонно сокращалась на протяжении последних четырёх десятилетий (см. рис. 4). К 2010-м гг. площадь льда в Баренце-

Таблица 3. Тренды ледовитости Арктики и Баренцева моря для разных периодов

Table 3. Arctic and Barents Sea ice extent trends for different periods

Район	Сезон	Величина тренда (тыс. км ² за десятилетие) по разным периодам и источникам			
		1979–2006 гг. [Parkinson, Cavalieri, 2008]	1979–2010 гг. [Cavalieri, Parkinson, 2012]	1979–2018 гг. [Kumar et al., 2021]	1979–2022 гг. (результаты данной работы)
Арктика	Зима	–395	–400	–462	–414
	Весна	–397	–381	–	–391
	Лето	–534	–701	–763	–734
	Осень	–477	–573	–	–588
	Год	–451	–515	–546	–532
БМ	Зима	–95	–122	–133	–112
	Весна	–124	–140	–	–142
	Лето	–112	–138	–41	–50
	Осень	–91	–138	–	–116
	Год	–106	–135	–104	–105

Примечание: БМ – Баренцево море; для периодов 1979–2006 и 1979–2010 гг. в графах для Баренцева моря приведены объединённые данные по Баренцеву и Карскому морям.

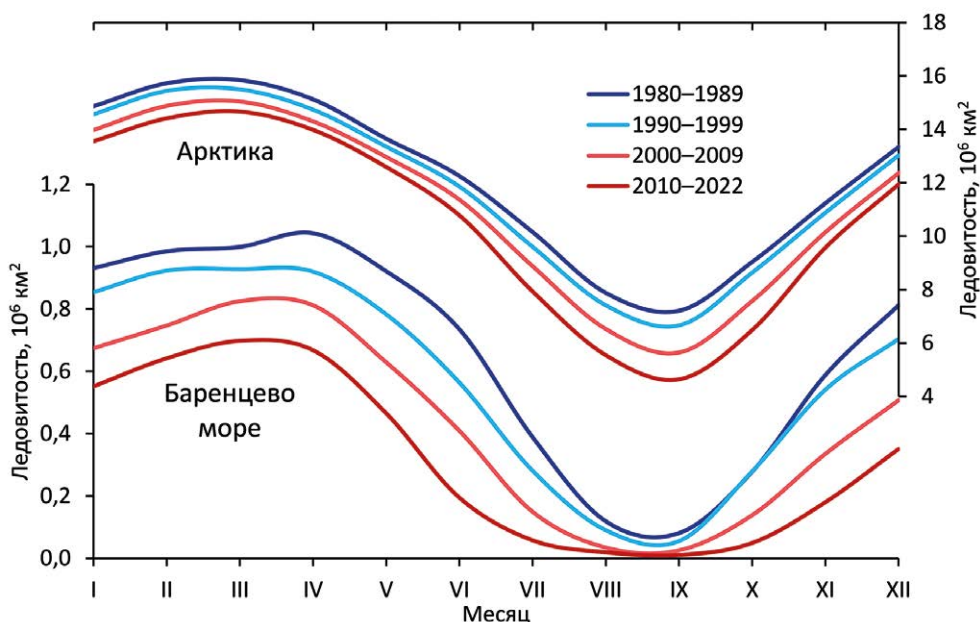


Рис. 4. Среднедекадный годовой ход ледовитости Баренцева моря и Арктики
 Fig. 4. Decadal mean seasonal cycles of the Barents Sea and Arctic ice extent

Таблица 4. Среднедекадная ледовитость Арктики (10^6 км^2) по месяцам, сезонам и в целом за год, а также её сокращение (%) с 1980-х по 2010-е гг.

Table 4. Decadal mean ice extent (10^6 км^2) in the Arctic by months, seasons and for the whole year as well as its reduction (%) from the 1980s to 2010s

Месяц, сезон	Десятилетие				Сокращение ледовитости, %
	1980–1989 гг.	1990–1999 гг.	2000–2009 гг.	2010–2022 гг.	
I	14,86	14,57	13,97	13,55	8,8
II	15,72	15,44	14,88	14,41	8,3
III	15,84	15,50	15,04	14,66	7,4
IV	15,12	14,74	14,29	13,98	7,5
V	13,64	13,35	12,96	12,58	7,8
VI	12,24	11,85	11,36	10,77	12,0
VII	10,15	9,60	8,87	7,92	21,9
VIII	7,87	7,41	6,52	5,54	29,6
IX	7,21	6,66	5,65	4,64	35,6
X	9,04	8,64	7,58	6,50	28,1
XI	11,24	10,89	10,15	9,58	14,8
XII	13,34	13,03	12,37	11,95	10,5
Зима	15,47	15,17	14,63	14,21	8,2
Весна	13,67	13,31	12,87	12,44	8,9
Лето	8,41	7,89	7,01	6,04	28,2
Осень	11,21	10,85	10,03	9,34	16,6
Год	12,19	11,81	11,14	10,51	13,8

вом море в разные месяцы уменьшилась относительно 1980-х гг. на 30,2–86,7% или 0,07–0,54 млн км². Наибольшее относительное сокращение среднедекадной ледовитости произошло летом (в среднем за сезон на 85,1% – с 0,20 до 0,03 млн км²), а наименьшее – зимой (на 35,1% – с 0,97 до 0,63 млн км²), тогда как весной и осенью оно составило 50,8% (с 0,90 до 0,44 млн км²) и 65,4% (с 0,56 до 0,19 млн км²) соответственно (см. рис. 4, табл. 5). Здесь нужно уточнить, что из-за разной площади льда в разные сезоны её сокращение в абсолютных величинах, как уже отмечалось ранее, было наибольшим весной (на 0,46 млн км² с 1980-х по 2010-е гг.), а наименьшим – летом (на 0,17 млн км²). При этом продолжительность безлёдного периода (с площадью льда менее 3% от площади моря) увеличилась в среднем с одного месяца в 1980-е и 1990-е гг. до двух месяцев в 2000-е гг. и трёх – в 2010-е гг. (см. рис. 4). В среднем за год в 2010-е гг. льда в Баренцевом море оказалось вдвое меньше по сравнению с 1980-ми гг.: сокращение на 50,7% (с 0,66 до 0,32 млн км²) (см. табл. 5).

В табл. 6 представлены нормированные аномалии ледовитости Арктики за разные месяцы, сезоны и в среднем за год, по которым хорошо можно про-

следить её межгодовые изменения. Наибольшая площадь льда наблюдалась в 1979–1983, 1986–1988, 1992 и 1994 гг., а наименьшая – в 2007, 2011, 2012 и 2015–2022 гг., когда её нормированная аномалия по модулю была больше одного стандартного отклонения (см. табл. 6). Самыми суровыми в плане ледовитости были 1979, 1980, 1982 и 1983 гг. (в среднем за год она превышала 12,3 млн км² с максимальным значением 12,5 млн км² в 1982 г.), а самыми мягкими – 2016, 2018–2020 гг. (площадь льда менее 10,4 млн км² с рекордно низким значением 10,2 млн км² в 2016 и 2020 гг.). Несмотря на то, что ледовитость Арктики в последние годы остаётся всё ещё на низком уровне, после 2016 г. намечается слабая (p -value = 0,134) тенденция на её увеличение (см. рис. 3, табл. 6). Следует также отметить, что в разные месяцы характер межгодовых изменений ледовитости несколько отличался. Так, кластерный анализ позволил выделить четыре группы месяцев со схожей изменчивостью ледовитости: холодные месяцы с наибольшей ледовитостью (январь – май), тёплые месяцы с наименьшей ледовитостью (август – октябрь) и переходные месяцы, преимущественно охватывающие периоды таяния льда (июнь – июль) и его образова-

Таблица 5. Среднедекадная ледовитость Баренцева моря (10⁶ км²) по месяцам, сезонам и в целом за год, а также её сокращение (%) с 1980-х по 2010-е гг.

Table 5. Decadal mean ice extent (10⁶ km²) in the Barents Sea by months, seasons and for the whole year as well as its reduction (%) from the 1980s to 2010s

Месяц, сезон	Десятилетие				Сокращение ледовитости, %
	1980–1989 гг.	1990–1999 гг.	2000–2009 гг.	2010–2022 гг.	
I	0,93	0,85	0,67	0,55	40,8
II	0,99	0,92	0,75	0,64	34,9
III	1,00	0,93	0,83	0,70	30,2
IV	1,04	0,92	0,81	0,67	36,0
V	0,92	0,78	0,63	0,47	49,5
VI	0,74	0,56	0,41	0,19	73,5
VII	0,39	0,28	0,15	0,06	85,2
VIII	0,12	0,09	0,03	0,02	83,8
IX	0,08	0,06	0,03	0,01	86,7
X	0,28	0,28	0,14	0,05	82,3
XI	0,59	0,54	0,34	0,18	69,4
XII	0,81	0,70	0,51	0,35	56,8
<i>Зима</i>	<i>0,97</i>	<i>0,90</i>	<i>0,75</i>	<i>0,63</i>	<i>35,1</i>
<i>Весна</i>	<i>0,90</i>	<i>0,76</i>	<i>0,62</i>	<i>0,44</i>	<i>50,8</i>
<i>Лето</i>	<i>0,20</i>	<i>0,14</i>	<i>0,07</i>	<i>0,03</i>	<i>85,1</i>
<i>Осень</i>	<i>0,56</i>	<i>0,51</i>	<i>0,33</i>	<i>0,19</i>	<i>65,4</i>
Год	0,66	0,58	0,44	0,32	50,7

Таблица 6. Нормированные аномалии ледовитости Арктики
Table 6. Normalised anomalies of the Arctic ice extent

Год	Месяц												Сезон				Средняя за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Зима	Весна	Лето	Осень	
1979	2,1	1,9	2,1	1,8	1,5	1,7	1,3	1,2	1,0	0,8	0,7	1,2	2,1	1,7	1,2	0,9	1,4
1980	1,1	1,5	1,5	1,7	1,4	1,1	1,1	1,2	1,5	1,1	1,3	1,6	1,4	1,5	1,3	1,3	1,4
1981	1,2	0,9	0,8	1,0	1,4	1,5	1,3	1,1	1,1	0,9	0,7	1,2	1,0	1,4	1,1	0,9	1,1
1982	1,7	1,6	1,5	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2	1,3	1,6	1,7	1,6	1,8	1,3	1,6	1,6
1983	1,3	1,6	1,6	1,3	0,8	1,3	1,6	1,4	1,3	1,3	1,4	1,1	1,5	1,2	1,4	1,3	1,4
1984	0,5	0,4	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,6	0,6	0,6	0,5	1,0	0,9	0,6	0,8
1985	0,9	0,7	1,3	1,6	1,9	1,2	0,7	0,6	0,7	0,6	0,8	0,7	1,0	1,6	0,7	0,7	0,9
1986	1,2	1,2	1,3	1,1	0,6	0,8	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,0	1,3	0,8	1,2	1,3	1,2
1987	1,3	1,7	1,1	1,3	1,3	1,6	1,3	0,8	1,2	1,0	1,1	1,1	1,4	1,5	1,1	1,1	1,3
1988	0,9	0,9	1,4	1,2	0,9	0,7	0,8	1,1	1,3	1,1	1,2	1,7	1,1	1,0	1,1	1,3	1,2
1989	1,3	0,7	0,4	-0,3	-0,1	1,2	1,1	1,1	0,9	0,8	1,0	1,3	0,8	0,3	1,1	1,0	0,9
1990	1,0	0,9	1,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,0	0,2	0,5	0,9	0,8	1,0	0,3	0,1	0,7	0,5
1991	0,3	0,3	0,4	0,7	0,7	1,0	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,3	0,8	0,5	0,6	0,6
1992	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2	1,0	1,3	1,1	1,3	1,3	1,3	1,3	0,7	0,6	1,3	1,3	1,1
1993	1,2	1,1	1,1	1,1	0,5	0,6	0,4	0,6	0,4	0,8	1,2	1,2	1,2	0,8	0,5	1,0	0,8
1994	0,9	0,9	0,6	0,7	1,0	0,8	0,9	0,9	1,1	0,9	1,0	1,1	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0
1995	0,7	0,3	0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,0	0,5	0,5	0,4	-0,2	0,0	0,3	0,1
1996	0,0	0,1	-0,2	-0,5	0,0	0,9	1,2	1,4	1,4	1,1	0,0	0,4	0,0	0,2	1,4	0,6	0,7
1997	0,4	0,6	0,5	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5	0,7	0,4	0,4	0,8	0,5	0,2	0,5	0,5	0,5
1998	0,9	1,2	0,7	0,7	1,0	0,3	0,4	0,7	0,5	0,5	0,0	0,2	1,0	0,7	0,6	0,3	0,6
1999	0,3	0,4	0,3	1,1	1,3	0,4	0,4	0,5	0,1	0,6	0,5	0,0	0,3	1,0	0,3	0,5	0,5
2000	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,5	0,4	0,3	0,4	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,2	0,2
2001	0,0	0,2	0,6	0,7	0,8	-0,1	0,0	0,7	0,7	0,4	0,3	-0,2	0,3	0,5	0,5	0,2	0,4
2002	0,1	0,5	0,2	-0,4	-0,2	0,1	0,2	-0,2	-0,1	0,3	-0,1	0,0	0,3	-0,2	0,0	0,1	0,0
2003	0,3	0,2	0,5	0,0	-0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	-0,4	-0,1	0,3	0,0	0,2	-0,1	0,1
2004	-0,3	-0,3	-0,4	-1,0	-1,1	-0,1	0,4	0,1	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,7	0,2	0,0	-0,2
2005	-0,9	-1,2	-1,0	-0,8	-0,4	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,7	-1,1	-0,6	-0,4	-0,4	-0,6
2006	-1,3	-1,3	-1,5	-1,1	-1,1	-1,0	-0,7	-0,3	-0,1	-0,3	-1,0	-1,1	-1,4	-1,1	-0,3	-0,7	-0,8
2007	-0,9	-1,0	-1,3	-1,2	-0,6	-0,5	-1,2	-1,4	-1,5	-1,6	-0,9	-1,0	-1,1	-0,8	-1,4	-1,3	-1,2
2008	-0,5	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-0,5	-0,4	-0,8	-1,1	-0,4	-0,1	-0,4	-0,3	-0,4	-0,8	-0,3	-0,5
2009	-0,5	-0,5	-0,5	0,0	0,2	-0,3	-0,7	-0,6	-0,6	-0,8	-0,9	-0,7	-0,5	-0,1	-0,6	-0,8	-0,6
2010	-0,8	-0,8	-0,2	0,3	-0,4	-1,5	-1,1	-0,9	-1,0	-0,8	-1,1	-1,3	-0,6	-0,6	-1,0	-1,0	-0,9
2011	-1,3	-1,2	-1,3	-0,7	-0,8	-1,3	-1,5	-1,2	-1,2	-1,2	-0,9	-0,8	-1,3	-1,0	-1,3	-1,0	-1,2
2012	-0,8	-0,9	0,0	0,2	-0,2	-1,4	-1,5	-2,0	-2,1	-1,7	-1,4	-1,0	-0,6	-0,5	-1,9	-1,5	-1,3
2013	-0,9	-0,6	-0,4	-0,4	-0,2	-0,3	-1,0	-0,7	-0,7	-0,4	-0,6	-0,7	-0,6	-0,3	-0,8	-0,5	-0,6
2014	-1,0	-1,1	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8	-1,0	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-1,0	-0,8	-0,8	-0,5	-0,8
2015	-1,0	-1,2	-1,6	-1,1	-1,2	-1,1	-0,8	-1,1	-1,2	-0,8	-0,8	-1,0	-1,3	-1,2	-1,0	-0,8	-1,1
2016	-1,3	-1,5	-1,6	-1,5	-2,3	-1,8	-1,2	-1,4	-1,3	-1,5	-2,4	-1,9	-1,5	-2,0	-1,3	-1,9	-1,7
2017	-1,8	-1,6	-1,8	-1,4	-0,9	-1,2	-1,2	-1,2	-1,0	-0,9	-1,2	-1,5	-1,7	-1,3	-1,2	-1,2	-1,3
2018	-2,0	-1,9	-1,7	-1,5	-1,7	-1,2	-0,9	-1,1	-1,0	-1,5	-0,8	-1,3	-1,9	-1,5	-1,0	-1,3	-1,4
2019	-1,1	-1,2	-1,2	-2,0	-1,8	-1,5	-1,6	-1,7	-1,4	-1,8	-1,4	-1,2	-1,2	-1,8	-1,6	-1,6	-1,6
2020	-1,0	-0,7	-0,9	-1,6	-1,5	-1,5	-1,9	-1,6	-1,7	-2,2	-1,9	-1,5	-0,9	-1,6	-1,8	-2,0	-1,7
2021	-1,2	-1,2	-1,1	-1,3	-0,8	-1,2	-1,5	-1,0	-0,9	-0,9	-0,8	-0,8	-1,2	-1,2	-1,1	-0,9	-1,1
2022	-0,6	-0,8	-1,2	-0,9	-0,4	-1,1	-0,9	-0,7	-1,0	-1,1	-0,9	-1,2	-0,9	-0,8	-0,9	-1,1	-1,0

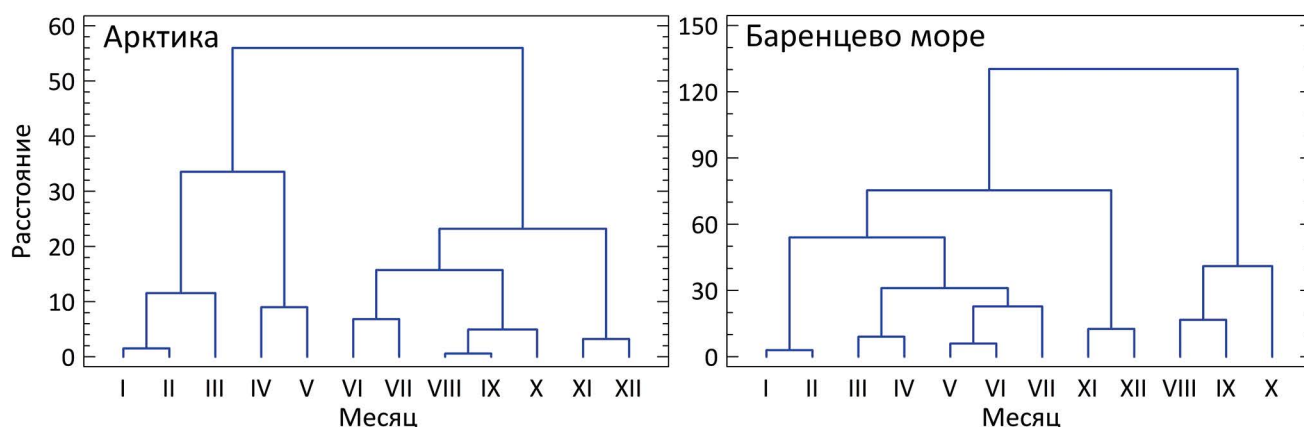


Рис. 5. Дендрограмма кластеризации месяцев по ледовитости Арктики и Баренцева моря за 1979–2022 гг.

Fig. 5. Dendrogram of clustering months by Arctic and Barents Sea ice extent for 1979–2022

ния (ноябрь – декабрь) (рис. 5). Однако эти различия были незначительными – связь между ледовитостью в разные месяцы была достаточно тесной, коэффициенты корреляции составляли 0,76–0,99.

По аналогии с Арктикой в табл. 7 представлены нормированные аномалии ледовитости Баренцева моря за разные месяцы, сезоны и в среднем за год. Наибольшая площадь льда наблюдалась в 1979–1982, 1986–1988, 1998, 1999 и 2003 гг., а наименьшая – в 2006, 2007, 2012, 2013, 2015–2018, 2020 и 2022 гг. – её нормированная аномалия по модулю была больше одного стандартного отклонения (см. табл. 7). Самыми суровыми в плане ледовитости были 1979–1982, 1987 и 1998 гг. (в среднем за год она превышала 0,70 млн км² с максимальным значением 0,78 млн км² в 1979 и 1982 гг.), а самыми мягкими – 2012, 2016–2018 гг. (площадь льда не превышала 0,30 млн км² с рекордно низким значением 0,20 млн км² в 2016 г.). Несмотря на то, что ледовитость Баренцева моря в последние годы остаётся всё ещё на низком уровне, после 2016 г., как и для Арктики в целом, наблюдается отчётливая (p -value = 0,021) тенденция на её увеличение (см. рис. 3, табл. 7). В табл. 7 также хорошо видно, что в тёплые месяцы с низкой ледовитостью (август – октябрь) характер межгодовых изменений площади льда в Баренцевом море отличался от такового в остальные преимущественно холодные месяцы с высокой ледовитостью (декабрь – июнь). Это подтверждают и результаты кластерного анализа: на построенной по его результатам дендрограмме отчётливо видны две группы месяцев (см. рис. 5). В отличие от Арктики в Баренцевом море различия между выделенными группами месяцев выражены гораздо лучше. Так, связь между ледовитостью тёплых (август – октябрь) и холодных (декабрь – июнь) месяцев была существенно слабее (коэффициент корреляции не пре-

вышал 0,70 и составлял 0,40–0,69, в среднем 0,55), чем связь внутри каждой из этих двух групп по отдельности (коэффициент корреляции превышал 0,75 и составлял 0,78–0,90 для тёплых месяцев и 0,76–0,93 для холодных, в среднем 0,84 в обоих случаях). Такая ситуация, вероятно, обусловлена тем, что в тёплый период, когда льда в море мало, возрастает роль местных, скорее всего, метеорологических влияющих факторов, что сказывается на характере межгодовых изменений ледовитости в эти месяцы.

На фоне общего тренда на сокращение ледовитости Арктики и Баренцева моря, объясняющего соответственно 90 и 72% изменчивости её среднегодовых значений (см. рис. 3), в детрендированных рядах, полученных путём исключения тренда из исходных рядов, с помощью гармонического анализа выявлены циклические составляющие. В изменениях ледовитости Арктики обнаружены квази 2-, 5- и 21-летние циклы, вклад которых в остаточную дисперсию составил соответственно 11, 36 и 14%, а их уровень значимости (p -value) – 0,030, 0,000 и 0,014. В изменениях ледовитости Баренцева моря найдены циклы с периодами 4, 5, 5, 11 и 22 года и вкладом в дисперсию детрендированного ряда соответственно 9, 32, 10 и 21% при уровне значимости (p -value) 0,046, 0,000, 0,034 и 0,002.

Выявленные циклы по своей продолжительности соответствуют следующим циклам в изменениях гидрометеорологических индексов и астрогеофизических параметров [Герман, Голдберг, 1981; Лис и др., 2023]:

– солнечному циклу Хейла (22 года), который подразумевает, что состояние общего магнитного поля Солнца возвращается к исходному через два полных 11-летних цикла солнечной активности, т. е. через 22 года;

Таблица 7. Нормированные аномалии ледовитости Баренцева моря
Table 7. Normalised anomalies of the Barents Sea ice extent

Год	Месяц												Сезон				Средняя за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Зима	Весна	Лето	Осень	
1979	2,0	2,2	2,3	2,0	2,2	2,5	2,0	0,7	-0,7	-0,1	0,8	1,3	2,2	2,3	1,2	0,8	1,9
1980	1,4	1,3	1,1	0,9	1,0	1,3	1,8	0,9	0,1	0,9	1,6	1,8	1,3	1,1	1,3	1,6	1,4
1981	1,3	0,8	1,8	1,8	2,1	2,2	1,8	1,1	0,0	-0,1	0,5	1,7	1,3	2,1	1,3	0,8	1,6
1982	2,0	1,9	1,7	1,4	1,3	1,9	2,3	2,8	2,4	1,9	1,5	0,8	2,0	1,6	2,6	1,4	1,9
1983	0,2	0,2	0,1	0,3	0,5	0,7	0,1	-0,4	-0,7	-0,1	1,2	1,2	0,1	0,5	-0,2	0,9	0,5
1984	0,5	-0,3	0,2	0,6	0,3	0,5	0,6	-0,7	-0,7	-0,9	0,2	0,2	0,1	0,5	0,0	-0,1	0,2
1985	0,5	0,8	0,5	1,1	1,1	1,2	0,5	-0,1	-0,4	0,0	0,6	1,1	0,6	1,1	0,2	0,7	0,8
1986	1,0	1,1	0,8	1,1	1,2	1,1	1,0	0,4	0,3	0,4	0,6	1,2	1,0	1,1	0,8	0,8	1,0
1987	1,0	1,4	1,4	1,6	1,3	1,4	1,7	0,7	1,0	1,5	0,8	0,6	1,3	1,5	1,4	0,9	1,4
1988	0,5	0,9	0,7	1,0	1,1	0,7	0,9	2,0	2,2	2,1	1,8	1,6	0,7	1,0	1,5	1,9	1,3
1989	1,5	1,0	0,5	0,0	-0,3	0,4	1,3	2,0	2,6	1,4	0,6	0,8	1,1	0,0	1,8	0,9	0,8
1990	0,7	0,2	0,4	0,0	-0,4	-0,2	-0,4	0,3	0,1	-0,2	0,8	0,6	0,5	-0,2	-0,1	0,5	0,2
1991	0,4	0,0	0,3	0,0	0,5	0,3	0,3	0,6	0,0	0,9	0,7	0,3	0,2	0,3	0,3	0,6	0,4
1992	0,1	0,2	-0,5	0,0	-1,1	-0,5	0,2	0,6	0,0	1,6	0,7	0,4	-0,1	-0,6	0,3	0,9	0,0
1993	0,1	0,1	0,4	0,5	0,4	0,6	1,1	2,3	2,2	1,6	0,9	0,8	0,2	0,5	1,7	1,1	0,8
1994	0,9	0,9	0,8	0,4	0,9	0,4	0,1	-0,4	-0,6	1,1	1,1	0,5	0,9	0,6	-0,2	1,0	0,7
1995	0,2	-0,1	-0,4	-1,5	-0,9	-0,4	-0,3	-0,5	-0,6	0,0	0,9	1,0	-0,1	-0,9	-0,5	0,7	-0,2
1996	0,6	0,9	0,2	0,4	0,4	0,4	0,7	0,1	-0,4	0,3	-0,2	0,2	0,6	0,4	0,4	0,1	0,4
1997	0,8	1,2	0,9	1,2	1,0	0,4	0,8	0,1	-0,6	0,0	0,7	1,0	1,0	0,9	0,4	0,6	0,8
1998	1,0	1,4	1,8	1,6	1,6	1,7	1,7	0,4	1,0	1,4	1,5	1,2	1,4	1,7	1,4	1,4	1,6
1999	1,1	1,2	0,8	1,1	1,5	1,4	0,5	0,7	1,0	0,3	0,0	0,1	1,1	1,4	0,7	0,1	1,0
2000	0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,3	-0,4	0,1	-0,9	-0,7	-1,0	-0,8	-0,3	-0,1	-0,3	-0,3	-0,7	-0,4
2001	-0,5	-0,1	0,6	0,5	0,3	-0,1	-0,8	-0,7	-0,7	-0,9	0,3	0,1	0,0	0,2	-0,9	-0,1	-0,1
2002	0,3	0,4	0,2	-0,1	0,2	0,4	-0,7	-0,2	0,1	0,6	0,7	0,9	0,3	0,2	-0,5	0,8	0,3
2003	1,2	0,8	1,1	0,9	0,9	1,2	1,3	0,9	1,4	0,6	0,6	0,9	1,1	1,0	1,3	0,7	1,0
2004	0,9	0,8	0,7	0,2	0,0	0,0	0,2	-0,7	-0,6	-0,3	0,4	-0,1	0,8	0,1	-0,2	0,0	0,2
2005	-0,6	-1,1	-0,2	0,0	0,3	-0,5	-0,6	-1,0	-0,7	0,1	-0,4	-0,8	-0,7	-0,1	-0,8	-0,4	-0,5
2006	-0,9	-0,9	-0,4	-0,8	-1,7	-1,3	-1,2	-1,0	-0,7	0,2	-0,8	-1,2	-0,8	-1,3	-1,1	-0,8	-1,1
2007	-1,3	-0,5	-1,3	-1,4	-1,1	-0,6	-0,8	-0,7	-0,7	-1,0	-1,2	-1,2	-1,1	-1,0	-0,9	-1,2	-1,2
2008	-1,7	-1,7	-1,4	-1,0	-0,8	-0,4	-0,5	-0,2	0,0	-0,4	-0,3	-0,7	-1,7	-0,7	-0,3	-0,5	-0,9
2009	-0,5	-0,6	-0,7	0,0	0,0	-0,5	-0,8	-0,2	-0,2	-0,9	-1,3	-0,6	-0,6	-0,2	-0,6	-1,0	-0,6
2010	-0,5	-0,3	0,3	0,3	-0,8	-1,2	-1,0	-1,0	-0,6	-1,1	-0,3	0,2	-0,2	-0,7	-1,0	-0,3	-0,5
2011	0,1	0,1	-0,7	-0,6	-0,5	-0,7	-0,7	-0,9	-0,7	-1,1	-0,9	-1,2	-0,1	-0,6	-0,8	-1,1	-0,7
2012	-1,7	-1,8	-1,9	-1,4	-1,7	-1,6	-1,4	-1,0	-0,7	-1,1	-1,6	-1,3	-1,8	-1,6	-1,3	-1,5	-1,7
2013	-1,3	-1,2	-0,3	-0,3	-1,0	-1,2	-1,4	-1,0	-0,7	-1,1	-1,4	-0,9	-1,0	-0,9	-1,3	-1,2	-1,1
2014	-0,8	-1,3	-1,4	-1,0	-0,7	-1,0	-0,8	0,9	1,2	0,4	0,3	-0,3	-1,2	-0,9	0,0	0,1	-0,7
2015	-0,1	-0,1	-1,3	-1,9	-1,3	-0,9	-0,7	-0,7	-0,7	-1,1	-1,6	-1,6	-0,5	-1,4	-0,7	-1,6	-1,2
2016	-1,3	-2,0	-2,3	-2,2	-1,8	-1,7	-1,4	-0,9	-0,7	-1,1	-1,7	-1,8	-1,9	-1,9	-1,2	-1,7	-1,9
2017	-1,9	-1,5	-1,6	-1,3	-0,8	-0,8	-0,8	-0,5	-0,7	-0,9	-1,2	-1,6	-1,8	-1,0	-0,8	-1,4	-1,4
2018	-1,8	-1,5	-0,8	-0,3	-0,5	-1,1	-1,1	-0,9	-0,7	-1,1	-1,2	-1,7	-1,5	-0,7	-1,1	-1,5	-1,2
2019	-1,2	-0,7	-0,4	-1,1	-0,7	-0,7	-0,6	-0,2	-0,4	-0,6	-0,5	-0,6	-0,9	-0,9	-0,5	-0,6	-0,8
2020	-0,3	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0	-1,0	-1,0	-0,7	-1,1	-1,7	-1,2	-0,3	-0,9	-1,0	-1,5	-1,0
2021	-1,0	0,1	-0,2	-0,9	-0,8	-1,1	-0,8	-1,0	-0,7	-1,1	-0,3	-0,1	-0,4	-0,9	-0,9	-0,4	-0,7
2022	0,0	-0,4	-0,9	-0,6	-0,3	-1,5	-1,3	-1,0	-0,7	-1,0	-1,4	-1,4	-0,4	-0,8	-1,2	-1,4	-1,0

– одиннадцатилетнему циклу солнечной активности, также называемому цикл Швабе или цикл Швабе-Вольфа, который характеризуется довольно быстрым (примерно за 4 года) увеличением числа солнечных пятен и последующим, более медленным (около 7 лет), его уменьшением;

– квази 2- и 4–6-летним циклам, присутствующим в изменениях таких глобальных гидрометеорологических индексов, как индексы Арктического диполя, Арктического, Северо-Атлантического, Тихоокеанско-Североамериканского и Атлантического мультидекадного колебаний, а также в изменениях таких астрогеофизических параметров, как число Вольфа и расстояние от Земли до Солнца.

Здесь следует отметить, что ранее другие авторы уже выделяли в изменениях ледовитости Арктики, но чаще Баренцева моря, циклы с периодами: 2–5,5, 7–8, 9–12, 20 и 50–60 лет в западных (Гренландское, Баренцево, Карское) и восточных (Лап-

тевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) морях за 1900–2003 гг. [Фролов и др., 2007], 2–3 и 50–60 лет в Баренцево море за 1899–2013 гг. [Жичкин, 2015], 2–3, 6–7, 9–11 и 22 года в Гренландском и Баренцевом морях за 1930–2016 гг. [Тимохов и др., 2019], 3–4, 6–8, 10–11 и более 20 лет в Баренцевом море за 1900–2014 гг. [Крашенинникова, Крашенинникова, 2019], 2–4, 5–8, 9–11, 14 и 17,5 лет в Баренцевом море за 1950–2022 гг. [Лис и др., 2023]. Если обобщить представленные выше сведения, то в основном можно говорить о циклах с периодами 2–4, 6–8, 9–11, 20–22 и 50–60 лет. Некоторые отличия в них по данным разных авторов обусловлены, скорее всего, разной длиной использованных рядов и разными подходами при выделении значимых гармоник. В настоящей работе приведены лишь статистически значимые циклы, что было оценено с помощью критериев Фишера и Стьюдента на уровне значимости p -value < 0,05.

Таблица 8. Коэффициенты корреляции ледовитости Баренцева моря и Арктики с другими климатическими параметрами. Корреляции рассчитаны после удаления линейных трендов. В скобках приведён уровень значимости p -value

Table 8. Correlation coefficients of the Barents Sea and Arctic ice extent with other climatic parameters. Correlations were calculated after removing linear trends. The significance level p -value is given in brackets

Параметр	Ледовитость	
	Баренцево море	Арктика
Индекс Арктического колебания	–0,299 с лагом 1 год (0,051)	незначимый (>0,05)
Зимний индекс Арктического колебания	незначимый (>0,05)	0,396 с лагом 6 лет (0,014)
Индекс Северо-Атлантического колебания	–0,304 с лагом 1 год (0,047)	0,317 с лагом 6 лет (0,052)
Зимний индекс Северо-Атлантического колебания	0,338 с лагом 5 лет (0,035)	0,407 с лагом 6 лет (0,011)
Индекс Атлантического мультидекадного колебания	незначимый (>0,05)	–0,395 с лагом 8 лет (0,017)
Теплозапас вод Норвежского моря в слое 0–800 м	–0,413 с лагом 1 год (0,007)	–0,417 с лагом 1 год (0,006)
Количество штормовых дней в центральной части Баренцева моря	незначимый (>0,05)	незначимый (>0,05)
Температура воздуха на западе Баренцева моря	–0,611 (0,000)	–0,414 (0,005)
Температура воздуха на востоке Баренцева моря	–0,896 (0,000)	–0,571 (0,000)
Температура воды на разрезе «Кольский меридиан»	–0,741 (0,000)	–0,319 (0,035)
Среднеплощадная температура воды на 100 м в Баренцевом море	–0,845 (0,000)	–0,457 (0,002)
Площадь атлантических вод в слое 50–100 м в Баренцевом море	–0,780 (0,000)	–0,369 (0,014)
Площадь арктических вод в слое 50–100 м в Баренцевом море	0,855 (0,000)	0,371 (0,013)

В табл. 8 представлены результаты корреляционного анализа ледовитости и других гидрометеорологических параметров как для Арктики, так и для Баренцева моря. Площадь льда в Арктике лучше всего ($|r| \geq 0,40$, $p\text{-value} < 0,05$) коррелирует с зимними индексами Арктического и Северо-Атлантического колебаний ($r = 0,40\text{--}0,41$ со сдвигом 6 лет), индексом Атлантического мультидекадного колебания ($r = -0,40$ со сдвигом 8 лет), теплозапасом вод Норвежского моря ($r = -0,42$ со сдвигом 1 год), температурой воздуха над западной ($r = -0,41$) и восточной ($r = -0,57$) частями Баренцева моря и средней по площади температурой воды на 100 м ($r = -0,46$). Тогда как площадь льда в Баренцевом море наиболее тесно ($|r| \geq 0,60$, $p\text{-value} < 0,01$) связана с температурой воздуха над западной ($r = -0,61$) и восточной ($r = -0,90$) частями моря, температурой атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» ($r = -0,74$), средней по площади температурой воды на 100 м ($r = -0,85$) и площадями атлантических ($r = -0,78$) и арктических ($r = 0,86$) вод. Ледовитость Арктики ожидаемо показала более слабую, чем для Баренцева моря, связь с гидрометеорологическими параметрами, имеющими непосредственное отношение к этому морю, тогда как с «удалёнными» параметрами, такими как климатические индексы и теплозапас Норвежского моря, у неё, наоборот, связь в целом оказалась несколько лучше.

При использовании исходных рядов (без удаления из них трендов) ледовитость не имеет статистически значимой связи лишь с зимним и годовым индексами Арктического и Северо-Атлантического колебаний. С остальными гидрометеорологическими параметрами связь значимая и достаточно тесная: коэффициенты корреляции составляют по модулю 0,64–0,95 для Баренцева моря и 0,74–0,83 для Арктики. Их более высокие значения (на 0,05–0,59 для Баренцева моря и на 0,26–0,68 для Арктики), чем в случае использования детрендрованных рядов, обусловлены как раз наличием в данных ярко выраженных линейных трендов ($R^2 = 0,53\text{--}0,90$).

Ранее тема поиска связей ледовитости Арктики и её отдельных морей, в том числе Баренцева, с другими гидрометеорологическими параметрами уже неоднократно затрагивалась многими авторами [Årthun et al., 2012; Carmack et al., 2015; Алексеев и др., 2016; Ogi et al., 2016; Вязигина и др., 2021; Kumar et al., 2021; Прохорова, 2022; Mohamed et al., 2022]. В качестве влияющих факторов они рассматривали поток тепла через западную границу Баренцева моря, объёмный перенос атлантических вод и их температуру, меридиональный ветер, температуру воздуха и поверхности океана, теплообмен с атмосферой,

индексы Атлантического мультидекадного, Северо-Атлантического и Арктического колебаний, а также такие астрогеофизические параметры, как положение полюса и скорость вращения Земли, нутацию её оси, расстояние от Земли до Солнца и числа Вольфа. В отличие от упомянутых выше исследований в настоящей работе в качестве независимых переменных дополнительно были рассмотрены площади, занятые атлантическими и арктическими водами в Баренцевом море, средняя по морю температура воды на глубине 100 м, которая может служить интегральной характеристикой теплового состояния Баренцева моря в целом, а также осреднённая над западной и восточной частями моря температура воздуха. При этом температура воздуха на востоке Баренцева моря и средняя по площади температура воды на 100 м обнаружили очень тесную связь с его ледовитостью даже при использовании детрендрованных рядов (см. табл. 8).

В ходе регрессионного анализа всех использованных в работе переменных выбраны лучшие модели для ледовитости Арктики и Баренцева моря. Уравнение регрессии для ледовитости Арктики (IceAO) объясняет 45,2% её изменчивости и включает в себя в качестве предикторов индекс Атлантического мультидекадного колебания (AMO), теплосодержание вод Норвежского моря с лагом 1 год (Heat) и температуру воздуха на востоке Баренцева моря (Ta): $\text{IceAO} = 0,0077 - 0,6014 \times \text{AMO} - 0,0141 \times \text{Heat} - 0,1231 \times \text{Ta}$ ($R^2 = 0,452$, $p\text{-value} = 0,000$). Вклад отдельных предикторов в изменчивость функции отклика составил 4,2% (AMO), 8,7% (Heat) и 32,3% (Ta). Тогда как уравнение регрессии для ледовитости Баренцева моря (IceBS) объясняет 88,0% её изменчивости и включает в себя температуру воздуха на востоке моря и среднюю по площади температуру воды на 100 м (AAT): $\text{IceBS} = -0,0460 \times \text{Ta} - 0,0967 \times \text{AAT}$ ($R^2 = 0,880$, $p\text{-value} = 0,000$). Здесь вклад предикторов составил 52,4% (Ta) и 35,6% (AAT). Как и в случае с корреляционным анализом, уравнение регрессии для ледовитости Арктики оказалось слабее, чем для Баренцева моря, поскольку использовавшиеся влияющие переменные в большей степени относятся к Баренцеву морю, нежели ко всей Арктике. Тем не менее в обоих случаях отмечена ведущая роль температуры воздуха в изменениях площади льдов.

В случае использования в регрессионном анализе исходных рядов (без удаления из них трендов) наилучшие уравнения регрессии включают те же предикторы, что и при использовании детрендрованных рядов, но имеют более высокие R^2 , а именно: 0,881 для Арктики и 0,947 для Баренцева моря, т. е. объясняют 88,1 и 94,7% изменчивости ледовитости соответ-

ственно. При этом вклад температуры воздуха в изменчивость площади льда остаётся ведущим и почти на том же уровне, составляя 35,4 и 51,0% в уравнениях регрессии для ледовитости Арктики и Баренцева моря соответственно, а вклад остальных предикторов существенно возрастает: АМО с 4,2 до 29,2%, Heat с 8,7 до 23,5% и ААТ с 35,6 до 43,7%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные изменения климата, проявившиеся в значительном потеплении воздушных и водных масс Арктики, привели к существенному сокращению площади льдов в этом регионе в последние десятилетия.

Анализ межгодовой изменчивости ледовитости показал, что и в Арктике, и в Баренцевом море во все месяцы и сезоны наблюдались ярко выраженные отрицательные тренды: площадь льда в Арктике сокращалась в разные месяцы на 34–80 тыс. км²/год (медленнее зимой и весной, быстрее летом), а в Баренцевом море – на 2–17 тыс. км²/год (медленнее летом, быстрее весной).

По сравнению с 1980-ми гг. среднедекадная ледовитость Арктики в 2010-е годы уменьшилась зимой и весной на 1,27 и 1,22 млн км² (8,2 и 8,9%), летом на 2,37 млн км² (28,2%), осенью на 1,87 млн км² (16,6%), тогда как в Баренцевом море она уменьшилась весной на 0,46 млн км² (50,8%), летом на 0,17 млн км² (85,1%), осенью и зимой на 0,37 и 0,34 млн км² (65,4 и 35,1%).

За последние 40 лет среднегодовая площадь льда в Арктике сократилась на 13,8% (на 1,68 млн км²), а в Баренцевом море – вдвое (на 0,33 млн км²), при этом продолжительность безлёдного периода в Баренцевом море увеличилась с 1 до 3 месяцев. Наряду с отрицательным линейным трендом, который объясняет 72 и 90% изменчивости ледовитости Баренцева моря и Арктики соответственно, в изменениях площади льда в Баренцевом море присутствуют циклы с периодами 4, 5,5, 11 и 22 года и вкладом в дисперсию детрендированного ряда от 9 до 32%, а в Арктики – квази 2-, 5- и 21-летние циклы со вкладом от 11 до 36%.

Межгодовая изменчивость ледовитости Арктики существенно меньше сезонной: размах межгодовых колебаний её среднегодовых значений составил 2,3 млн км² при размахе сезонных колебаний 9,3 млн км². Тогда как межгодовая изменчивость ледовитости Баренцева моря соизмерима с сезонной: размах межгодовых колебаний составил 0,59 млн км², сезонных – 0,81 млн км².

Ледовитость исследованных районов имеет хорошо выраженный годовой ход: сезонный максимум обычно наступает в феврале-марте в Арктике (15,1–

15,2 млн км²) и в марте – апреле в Баренцевом море (0,85 млн км²), тогда как минимум приходится на сентябрь в Арктике (6,0 млн км²) и на август-сентябрь в Баренцевом море (0,04–0,06 млн км²). В период активного таяния льда ледовитость Арктики за два месяца сокращается на 4,8 млн км² (51% от размаха среднемноголетних сезонных колебаний), а ледовитость Баренцева моря на 0,48 млн км² (59% от размаха сезонных колебаний), тогда как в период наиболее интенсивного ледообразования также за два месяца площадь льда увеличивается на 4,8 млн км² в Арктике и на 0,39 млн км² в Баренцевом море.

Результаты корреляционного анализа показали, что площадь льда в Арктике лучше всего коррелирует с зимними индексами Арктического и Северо-Атлантического колебаний, индексом Атлантического мультидекадного колебания, теплозапасом вод Норвежского моря, температурой воздуха над западной и восточной частями Баренцева моря и средней по площади температурой воды на 100 м. Тогда как площадь льда в Баренцевом море наиболее тесно связана с температурой воздуха над западной и восточной частями моря, температурой атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан», средней по площади температурой воды на 100 м и площадями атлантических и арктических вод.

Для ледовитости Арктики и Баренцева моря построены надёжные регрессионные модели, объясняющие 45,2 и 88,0% её изменчивости соответственно. Уравнение регрессии для ледовитости Арктики включает в себя в качестве предикторов индекс Атлантического мультидекадного колебания (вклад 4,2%), теплосодержание вод Норвежского моря с лагом 1 год (8,7%) и температуру воздуха на востоке Баренцева моря (32,3%). Тогда как уравнение регрессии для ледовитости Баренцева моря включает температуру воздуха на востоке моря (52,4%) и среднюю по площади температуру воды на 100 м (35,6%). В обоих случаях отмечена ведущая роль температуры воздуха в изменениях площади льдов.

Результаты выполненных исследований позволят лучше понимать климатические процессы, происходящие в последние десятилетия в Арктике в целом, и в Баренцевом море в частности, и могут быть использованы для оценки влияния изменений климата на основные объекты российского рыболовства в этих районах.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Полярного филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н. М. Книповича).

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев Г. В., Глок Н. И., Смирнов А. В., Вязилова А. Е. 2016. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в районе Баренцева моря и их предсказуемость // Метеорология и гидрология. № 8. С. 38–56.
- Безруков Ю. Ф. 2006. Океанология. Часть I. Физические явления и процессы в океане. Симферополь: Таврический НУ им. В. И. Вернадского. 159 с.
- Вязигина Н. А., Тимохов Л. А., Егорова Е. С., Юлин А. В. 2021. Информативность гидрометеорологических и астрогеофизических факторов в задаче описания межгодовых колебаний ледовитости Гренландского моря // Лёд и Снег. Т. 61. № 3. С. 431–444. DOI: 10.31857/S2076673421030099.
- Герман Дж. Р., Голдберг Р. А. 1981. Солнце, погода и климат. Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат. 319 с. (Herman J. R., Goldberg R. A. 1978. Sun Wather, and climate. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration. U.S. Govt. Print)
- Гершанович Д. Е., Муромцев А. М. 1983. Океанологические основы биологической продуктивности Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат. 320 с.
- Гудкович З. М., Карклин В. П., Смоляницкий В. М., Фролов И. Е. 2009. О характере и причинах изменений климата Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. № 81. С. 15–23.
- Денисов В. В. 2002. Эколого-географические основы устойчивого природопользования в шельфовых морях (экологическая география моря). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 502 с.
- Елисеева И. И., Юзбашев М. М. 2004. Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика. 656 с.
- Жичкин А. П. 2015. Особенности межгодовых и сезонных колебаний аномалий ледовитости Баренцева моря // Метеорология и гидрология. № 5. С. 52–62.
- Ижевский Г. К. 1961. Океанологические основы формирования промысловой продуктивности морей. М.: Пищепромиздат. 215 с.
- Карсаков А. Л., Трофимов А. Г., Анциферов М. Ю., Ившин В. А., Губанищев М. А. 2022. 120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан». Мурманск: ПИНРО. 145 с.
- Коросов А. В., Горбач В. В. 2007. Компьютерная обработка биологических данных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ. 76 с.
- Крашенинникова С. Б., Крашенинникова М. А. 2019. Причины и особенности долговременной изменчивости ледовитости Баренцева моря // Лёд и Снег. Т. 59. № 1. С. 112–122. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-112-122.
- Лис Н. А., Егорова Е. С. 2022. Климатическая изменчивость ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 68. № 3. С. 234–247. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247.
- Лис Н. А., Чернявская Е. А., Миронов Е. У., Тимохов Л. А., Егорова Е. С. 2023. Информативность факторов, формирующих долгопериодные колебания ледовитости отдельных районов Баренцева моря // Российская Арктика. Т. 5. № 2. С. 17–32. DOI: 10.24412/2658-4255-2023-2-17-32.
- Малинин В. Н. 2008. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ. 408 с.
- Малинин В. Н. 2020. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Том 2. Анализ временных рядов и случайных полей. СПб.: РГГМУ. 196 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.
- Протасов Ю. М., Юров В. М. 2016. Гармонический анализ периодических колебаний объёмов продаж компании на основе инструмента «регрессия» MS EXCEL // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика. № 2. С. 115–121. DOI: 10.18384/2310-6646-2016-2-115-121.
- Прохорова У. В. 2022. Оценка влияния метеорологических параметров на изменчивость площади и толщины морского льда в Карском море // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 68. № 1. С. 64–75. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75.
- Тимохов Л. А., Вязигина Н. А., Миронов Е. У., Юлин А. В. 2019. Климатические изменения сезонных и долгопериодных колебаний ледовитости Гренландского и Баренцева морей // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 65. № 2. С. 148–168. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168.
- 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., Ковалев Е. Г., Смоляницкий В. М. 2007. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. № 75. С. 149–160.
- 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 // Journal of Climate. V. 25. Iss. 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 Journal of Marine Science. V. 69. № 5. P. 833–840. DOI: 10.1093/icesjms/fss075.
- Carmack E., Polyakov I., Padman L., Fer I., Hunke E., Hutchings J., Jackson J., Kelley D., Kwok R., Layton C., Melling H., Perovich D., Persson O., Ruddick B., Timmermans M.-L., Toole J., Ross T., Vavrus S., Winsor P. 2015. Toward quantifying the increasing role of oceanic heat in sea ice loss in the new Arctic // Bulletin of the American Meteorological Society. V. 96. Iss. 12. P. 2079–2105. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00177.1.
- Cavalieri D.J., Parkinson C.L. 2012. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // The Cryosphere. V. 6. Iss. 4. P. 881–889. DOI: 10.5194/tc-6-881-2012.
- 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.
- 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.
- 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.
- Kovacs K.M., Lydersen C., Overland J.E., Moore S.E. 2011. Impacts of changing sea-ice conditions on Arctic marine mammals // Marine Biodiversity. V. 41. P. 181–194. DOI: 10.1007/s12526-010-0061-0.
- Kumar A., Yadav J., Mohan R. 2021. Spatio-temporal change and variability of Barents-Kara sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications // Science of The Total Environment. V. 753. Art. 142046. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142046.
- 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 // Journal of Geophysical Research. V. 109. Art. C03032. DOI: 10.1029/2001JC001039.
- Mohamed B., Nilsen F., Skogseth R. 2022. Interannual and decadal variability of sea surface temperature and sea ice concentration in the Barents Sea // Remote Sensing. V. 14. Iss. 17. Art. 4413. DOI: 10.3390/rs14174413.
- Ogi M., Rysgaard S., Barber D.G. 2016. Importance of combined winter and summer Arctic Oscillation (AO) on September sea ice extent // Environmental Research Letters. V. 11. № 3. Art. 034019. DOI: 10.1088/1748-9326/11/3/034019.
- Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. 2018. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss // Journal of Climate. V. 31. Iss. 12. P. 4917–4932. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0427.1.
- Parkinson C.L. 1996. Sea ice. In Encyclopedia of climate and weather. V. 2. Oxford University Press, New York. P. 669–675.
- Parkinson C.L., Cavalieri D.J. 2008. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006 // Journal of Geophysical Research. V. 113. Art. C07003. DOI: 10.1029/2007JC004558.
- Serreze M.C., Holland M.M., Stroeve J. 2007. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover // Science. V. 315. Iss. 5818. P. 1533–1536. DOI: 10.1126/science.1139426.
- Stirling I., Parkinson C.L. 2006. Possible effects of climate warming on selected populations of polar bears (*Ursus maritimus*) in the Canadian Arctic // Arctic. V. 59. № 3. P. 261–275. DOI: 10.14430/arctic312.
- Stroeve J., Notz D. 2018. Changing state of Arctic sea ice across all seasons // Environmental Research Letters. V. 13. № 10. Art. 103001. DOI: 10.1088/1748-9326/aade56.
- Wu Z., Wang X. 2019. Variability of Arctic sea ice (1979–2016) // Water. V. 11. Iss. 1. Art. 23. DOI: 10.3390/w11010023.

REFERENCES

- Alekseev G.V., Glock N.I., Smirnov A.V., Vyazilova A.E. 2016. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability // Meteorology and hydrology. № 8. P. 38–56. (In Russ.).
- Bezrukov Yu.F. 2006. Oceanology. Part I. Physical phenomena and processes in the ocean. Simferopol: V.I. Vernadsky Tauride National University. 159 pp. (In Russ.).
- Viazigina N.A., Timokhov L.A., Egorova E.S., Yulin A.V. 2021. Informativeness (information-bearing) of hydrometeorological and astrogeophysical factors in the problem of describing interannual fluctuations of the Greenland Sea ice coverage // Ice and Snow. V. 61. № 3. P. 431–444. DOI: 10.31857/S2076673421030099. (In Russ.).
- Herman J.R., Goldberg R.A. 1981. Sun, weather, and climate. Leningrad: Gidrometeoizdat Press. 319 pp. (In Russ.). (Herman J.R., Goldberg R.A. 1978. Sun Wather, and climate. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration. U.S. Govt. Print)
- Gershanovich D.E., Muromtsev A.M. 1983. Oceanological bases of biological productivity of the World Ocean. Leningrad: Gydrometeoizdat Press. 320 pp. (In Russ.).
- Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitsky V.M., Frolov I.E. 2009. On the character and causes of the Earth's climate changes // Arctic and Antarctic Research. № 81. P. 15–23. (In Russ.).

- Denisov V.V. 2002. Ecological-geographical bases of sustainable nature management in the offshore seas (ecological geography of the sea). Apatity: KNT RAS Press. 502 pp. (In Russ.).
- Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. 2004. General theory of statistics. Moscow: Finansy i Statistika Press. 656 pp. (In Russ.).
- Zhichkin A.P. 2015. Peculiarities of interannual and seasonal variations of the Barents Sea ice coverage anomalies // Meteorologiya i Hydrologiya. № 5. P. 52–62. (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., Antsiferov M.Yu., Ivshin V.A., Gubanishchev M.A. 2022. 120 years of oceanographic observations along the Kola Section. Murmansk: PINRO Publish. 145 pp. (In Russ.).
- Korosov A.V., Gorbach V.V. 2007. Computer processing of biological data. Petrozavodsk: PetrGU Press. 76 pp. (In Russ.).
- Krasheninnikova S.B., Krasheninnikova M.A. 2019. Causes and features of the long-term variability of the ice extent of the Barents Sea // Ice and Snow. V. 59. № 1. P. 112–122. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-112-122. (In Russ.).
- Lis N.A., Egorova E.S. 2022. Climatic variability of the ice extent of the Barents Sea and its individual areas // Arctic and Antarctic Research. V. 68. № 3. P. 234–247. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247. (In Russ.).
- Lis N.A., Cherniavskaia E.A., Mironov E.U., Timokhov L.A., Egorova E.S. 2023. Informativeness (information-bearing) of factors forming interannual variability of the Barents Sea and its individual areas ice coveren // Russian Arctic. V. 5. № 2. P. 17–32. DOI: 10.24412/2658-4255-2023-2-17-32. (In Russ.).
- Malinin V.N. 2008. Statistical methods for analyzing hydrometeorological information. Saint Petersburg: RGGMU Press. 408 pp. (In Russ.).
- Malinin V.N. 2020. Statistical methods for analyzing hydrometeorological information. Volume 2. Analysis of temporal series and random fields. Saint Petersburg: RGGMU Press. 196 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.).
- Protasov Yu.M., Yurov V.M. 2016. The harmonic analysis of periodic fluctuations in sales volumes of the company by means of «Regression» MS Excel tool // Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Economics. № 2. P. 115–121. DOI: 10.18384/2310-6646-2016-2-115-121. (In Russ.).
- Prokhorova U.V. 2022. Assessing the influence of meteorological parameters on sea ice area and thickness variability in the Kara Sea // Arctic and Antarctic Research. V. 68. № 1. P. 64–75. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75. (In Russ.).
- Timokhov L.A., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Yulin A.V. 2019. Climatic changes of seasonal and inter-annual variability of the ice cover of the Greenland and Barents Seas // Arctic and Antarctic Research. V. 65. № 2. P. 148–168. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168. (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., Kovalev E.G., Smolyanitsky V.M. 2007. Climatic changes of ice conditions in the Arctic seas of the Eurasian shelf // Arctic and Antarctic Research. № 75. P. 149–160. (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.).
- 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 // Journal of Climate. V. 25. Iss. 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 Journal of Marine Science. V. 69. № 5. P. 833–840. DOI: 10.1093/icesjms/fss075.
- Carmack E., Polyakov I., Padman L., Fer I., Hunke E., Hutchings J., Jackson J., Kelley D., Kwok R., Layton C., Melling H., Perovich D., Persson O., Ruddick B., Timmermans M.-L., Toole J., Ross T., Vavrus S., Winsor P. 2015. Toward quantifying the increasing role of oceanic heat in sea ice loss in the new Arctic // Bulletin of the American Meteorological Society. V. 96. Iss. 12. P. 2079–2105. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00177.1.
- Cavalieri D.J., Parkinson C.L. 2012. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // The Cryosphere. V. 6. Iss. 4. P. 881–889. DOI: 10.5194/tc-6-881-2012.
- 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.
- 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.
- 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.
- Kovacs K.M., Lydersen C., Overland J.E., Moore S.E.* 2011. Impacts of changing sea-ice conditions on Arctic marine mammals // *Marine Biodiversity*. V. 41. P. 181–194. DOI: 10.1007/s12526-010-0061-0.
- Kumar A., Yadav J., Mohan R.* 2021. Spatio-temporal change and variability of Barents-Kara sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications // *Science of The Total Environment*. V. 753. Art. 142046. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142046.
- 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 // *Journal of Geophysical Research*. V. 109. Art. C03032. DOI: 10.1029/2001JC001039.
- Mohamed B., Nilsen F., Skogseth R.* 2022. Interannual and decadal variability of sea surface temperature and sea ice concentration in the Barents Sea // *Remote Sensing*. V. 14. Iss. 17. Art. 4413. DOI: 10.3390/rs14174413.
- Ogi M., Rysgaard S., Barber D.G.* 2016. Importance of combined winter and summer Arctic Oscillation (AO) on September sea ice extent // *Environmental Research Letters*. V. 11. № 3. Art. 034019. DOI: 10.1088/1748-9326/11/3/034019.
- Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C.* 2018. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss // *Journal of Climate*. V. 31. Iss. 12. P. 4917–4932. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0427.1.
- Parkinson C.L.* 1996. Sea ice. In *Encyclopedia of climate and weather*. V. 2. Oxford University Press, New York. P. 669–675.
- Parkinson C.L., Cavalieri D.J.* 2008. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006 // *Journal of Geophysical Research*. V. 113. Art. C07003. DOI: 10.1029/2007JC004558.
- Serreze M.C., Holland M.M., Stroeve J.* 2007. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover // *Science*. V. 315. Iss. 5818. P. 1533–1536. DOI: 10.1126/science.1139426.
- Stirling I., Parkinson C.L.* 2006. Possible effects of climate warming on selected populations of polar bears (*Ursus maritimus*) in the Canadian Arctic // *Arctic*. V. 59. № 3. P. 261–275. DOI: 10.14430/arctic312.
- Stroeve J., Notz D.* 2018. Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environmental Research Letters*. V. 13. № 10. Art. 103001. DOI: 10.1088/1748-9326/aade56.
- Wu Z., Wang X.* 2019. Variability of Arctic sea ice (1979–2016) // *Water*. V. 11. Iss. 1. Art. 23. DOI: 10.3390/w11010023.

Поступила в редакцию 08.12.2023 г.

Принята после рецензии 10.06.2024 г.