

## Научная статья

УДК 551.46

DOI: 10.24412/2658-4255-2024-1-26-32



EDN: IAXSMF

## Для цитирования:

Попова В.Г., Рубченя А.В.  
Иванов Б.В. Некоторые особенности ледовых условий в северо-западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 гг. // Российская Арктика. 2024. Т. 6. № 1. С. 26-32.  
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-1-26-32>

Получена: 25.12.2023  
Принята: 05.02.2024  
Опубликована: 12.03.2024

## For citation:

Popova V.G., Rubchenya A.V.,  
Ivanov B.V. Some features of ice conditions in the northwestern part of the Arctic Ocean for the period 1979-2022. Russian Arctic, 2024, vol. 6, no. 1, pp. 26-32. (In Russian).  
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-1-26-32>

## Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

## Финансирование.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-27-00112 «Современные изменения арктического климата и экстремальные колебания погоды в западном секторе Северного морского пути».



# НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ЗА ПЕРИОД 1979-2022 ГГ.

В.Г. Попова\*<sup>1</sup>, А.В. Рубченя<sup>2</sup>, Б.В. Иванов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, Россия

<sup>3</sup> Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: \*[popovavi.popova@yandex.ru](mailto:popovavi.popova@yandex.ru)

## Аннотация

В статье представлены результаты исследования долгопериодных изменений ледовитости и сплоченности морского ледяного покрова в северо-западной части Северного Ледовитого океана (СЛО) за период 1979-2022 гг. Материалы были получены из базы данных по морскому льду, созданной в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (АНИИ). Получены количественные сравнительные оценки изменения указанных ледовых характеристик. На фоне общего понижения ледовитости в исследуемом районе, для рассматриваемого периода можно выделить два временных интервала и переходный период, различающиеся продолжительностью, абсолютными значениями ледовитости и характером межгодовой изменчивости.

**Ключевые слова:** Северный Ледовитый океан, ледовитость, сплоченность, долгопериодные изменения, Арктика

## SOME FEATURES OF ICE CONDITIONS IN THE NORTHWESTERN PART OF THE ARCTIC OCEAN FOR THE PERIOD 1979-2022

A.V. Popova\*<sup>1</sup>, A.V. Rubchenya<sup>2</sup>, B.V. Ivanov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> State Oceanographic Institute named after N.N. Zubov, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

E-mail: \*[popovavi.popova@yandex.ru](mailto:popovavi.popova@yandex.ru)

## Abstract

The article investigates the long-term changes in ice cover and concentration of ice in the northwestern part of the Arctic Ocean (AO) for the period 1979-2022. The data were obtained from the sea ice database created at Arctic and Antarctic Research Institute (AARI). Quantitative comparative assessments of these mentioned ice characteristics are obtained. Taking into account the general ice cover decrease in the study area, three time periods are to be identified. These periods differ in duration, absolute values of sea ice extent and the nature of interannual variability.

**Keywords:** Arctic Ocean, arctic, concentration of ice, long-period changes, Arctic

## Введение

Арктический бассейн является областью наиболее чувствительной к изменениям глобального климата [6]. Наиболее значимым индикатором последствий изменения климата является ледяной покров, объективный мониторинг и оперативный анализ которого стал возможен после организации и проведения регулярных спутниковых наблюдений [13].

Оценка происходящих изменений ледовых условий важна как для понимания климатических тенденций, так и для практической деятельности человека. Последнее обстоятельство связано с расширением деятельности хозяйствующих субъектов в Арктической зоне Российской Федерации, связанной с поисками и разработкой месторождений углеводородного сырья, осуществлением безопасной навигации на трассах Северного Морского пути и т.п. В то же время, наблюдаемые в Арктике изменения климата в сторону его потепления, увеличивают площадь открытой воды в морях в летний период, что способствует возникновению опасного ветрового волнения, слабо прогнозируемых перемещений отдельных скоплений дрейфующего льда, что является серьезной опасностью для транспортных судов, не обладающих требуемым ледовым классом [9]. Так называемая «атлантификация» [3, 6] приводит к вытеснению из привычной среды обитания полярных морских экосистем и замещение их более южными видами. Наверху полярной экосистемы находятся крупные млекопитающие (например, белые медведи), которые вынужденно мигрируют на север в среду с более ограниченными возможностями для питания, что может способствовать резкому сокращению их численности

Основной вывод, который присутствует в ряде основополагающих работ отечественных исследований относительно изменения ледовых условий в Арктике, это не только общее сокращение площади ледяного покрова в Северном Ледовитом океане (СЛО), но и сокращение площадей, занятых многолетними толстыми льдами и их замещение более тонкими однолетними, а также общее сокращение ледовитости в большинстве районов Арктического бассейна. Наиболее интенсивно эти события, которые можно определить, как значимая смена ледовых эпох, наблюдались с 1995 по 2005 гг., в зависимости от региона [8].

Наиболее значимыми индикаторами изменения современных ледовых условий являются такие характеристики как ледовитость и сплоченность ледяного покрова, которые определяют площадь покрытия акватории льдами различных видов.

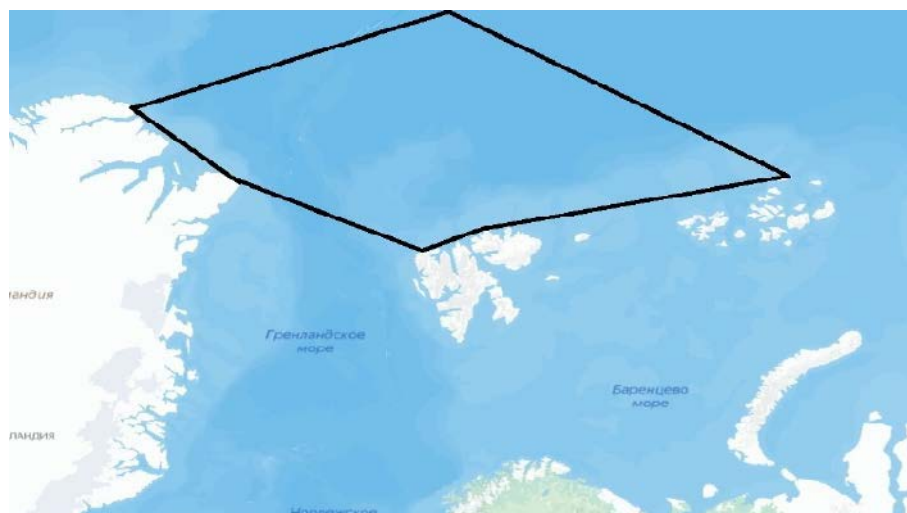
Ледовитость - степень покрытия льдом акватории водного объекта, определяется как отношение площади, занятой льдом любой сплоченности (густоты льдов), к общей площади акватории водного объекта [2]. Ледовитость может выражаться как в процентах, так и в тысячах квадратных километров.

Сплоченность льда - условная величина, которая характеризует степень покрытия поверхности воды дрейфующим льдом; её количественное значение оценивается через отношение общей площади льда к общей площади видимой морской поверхности.

В данной работе значения ледовитости представлены как в процентах покрытия льдом рассматриваемой акватории, так и в тысячах квадратных километрах и используется, так называемая, приведенная сплоченность [2, 13]. Последняя означает отношение, выраженное, в десятых долях и описывающее общую площадь морской поверхности, покрытую льдом как часть всей рассматриваемой площади.

### Материалы и методы

Источником данных, которые были использованы в нашей работе для получения количественных оценок ледовых характеристик, послужил архив данных по морскому льду Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) [13]. Исследуемый район – сектора акватории СЛО между Северным полюсом, Гренландией, Шпицбергом и Землей Франца-Иосифа, общей площадью 980,5 тыс. км<sup>2</sup> (рис. 1а).



(а)

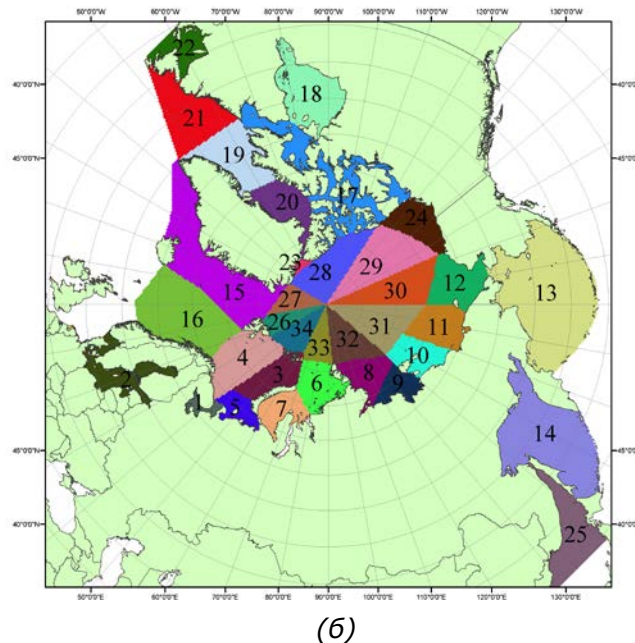


Рисунок 1. Район исследований (а) и общее районирование СЛО по классификации ААНИИ (б)

Данный район в наименьшей степени исследован российскими и зарубежными авторами. Он представляет интерес с той точки зрения, что именно здесь всегда наблюдаются максимальные площади, занятые многолетними льдами в течение всего года по сравнению с другими районами СЛО, например, примыкающими к окраинным арктическим морям. Здесь происходит основной вынос арктических льдов из центральной части бассейна (через пролив Фрама). Данный выбор сделан также вследствие того, что в данном районе можно ожидать минимальную ледовитости, поскольку ледяной покров здесь присутствует круглогодично. По классификации ААНИИ это сектора с номерами 26, 27, и 34 (рис. 16).

Для каждого сектора из базы данных по морскому льду ААНИИ получены уже готовые средние по площади сектора оценки ледовитости и сплоченности.

### Обсуждение результатов

Анализ ледовых условий в выбранном регионе был выполнен для периода 1979-2022 гг. Основным результатом представлен на рис. 2, из которого следует, что за исследуемый интервал времени наблюдается устойчивое уменьшение ледовитости, которое наиболее ярко проявилось в июне. Приблизительно с 2003 года сокращение ледовитости в исследуемом районе СЛО наблюдается во все сезоны года. При этом в некоторые года в зимний период полного покрытия района ледяным покровом (максимальная ледовитость, равная 980,5 тыс. км<sup>2</sup>) не наблюдается.

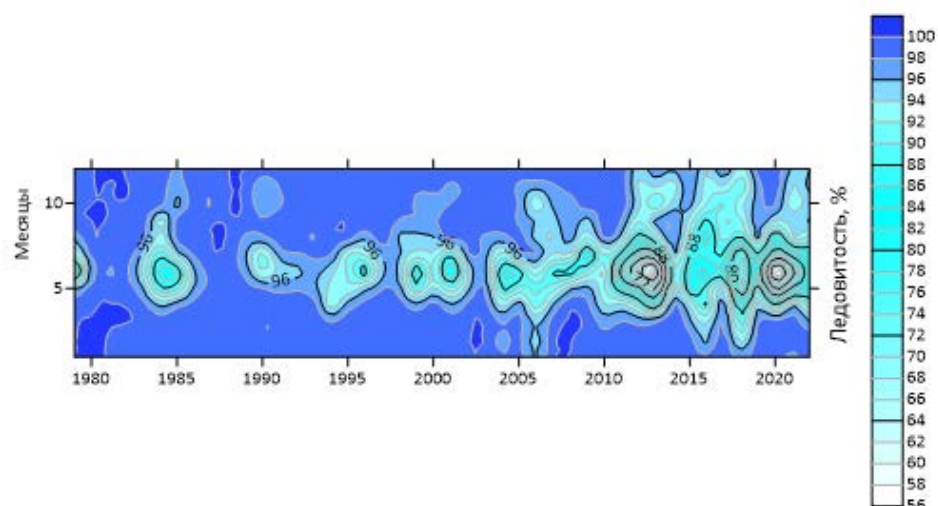


Рисунок 2. Ледовитость (в %) исследуемого района по данным ААНИИ за период 1979-2022 гг.

В работе рассчитаны значения аномальности ледовитости относительно среднего значения для всего периода наблюдений (рис. 3). Начиная с начала инструментальных наблюдений и практически до 2011 года отмечалась тенденция, соответствующая устойчивому уменьшению положительных аномалий ледовитости. После 2011 г. аномалии ледовитости сменили знак, перейдя в отрицательную область. В последующий период (2011-2022 г.) наблюдалось значительное возрастание межгодовой изменчивости аномалий ледовитости. Хотя, собственно, характер изменения аномалий ледовитости уменьшился незначительно: с  $-9,1$  тыс. км<sup>2</sup>/10 лет до  $-7,3$  тыс. км<sup>2</sup>, соответственно. При этом колебания среднегодовых значений ледовитости в этот период отмечались относительно среднего значения, находящегося на уровне отрицательной аномалии равной, приблизительно  $-42 \pm 5$  тыс. км<sup>2</sup>. При этом максимальные величины отрицательных аномалий достигали 100 тыс. км<sup>2</sup> (2018 г.), что составляет, порядка, 10% от значения максимальной ледовитости в исследуемом районе. Таким образом при сохранении общей тенденции многолетних изменений ледовитости за весь рассматриваемый период (1979-2022 гг.), период 1979-2011 гг. характеризуются слабой межгодовой изменчивостью по сравнению с периодом 2011-2022 гг.

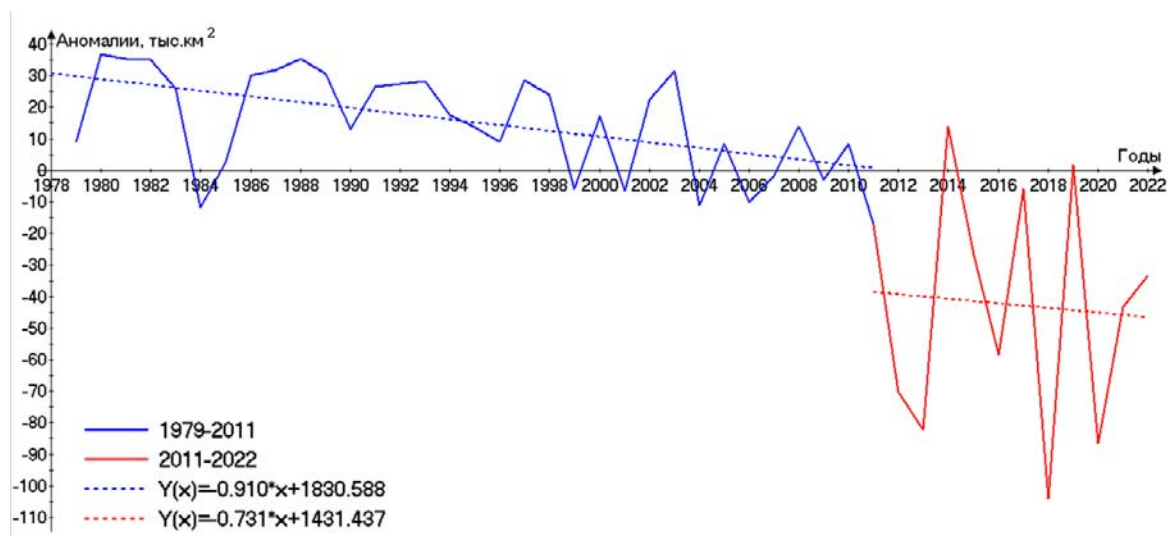


Рисунок 3. Аномалии ледовитости относительно среднего за период 1979-2022 гг. (1979-2011; 2011-2022 – периоды для оценки трендов на рисунке)

Были произведены расчеты интервалов времени (количества суток), в течение которых в зимний период (с октября по май) ледовитость района достигала максимума, т.е. покрытие акватории льдами любой сплоченности составляло 100%. Результаты представлены на рис. 4.

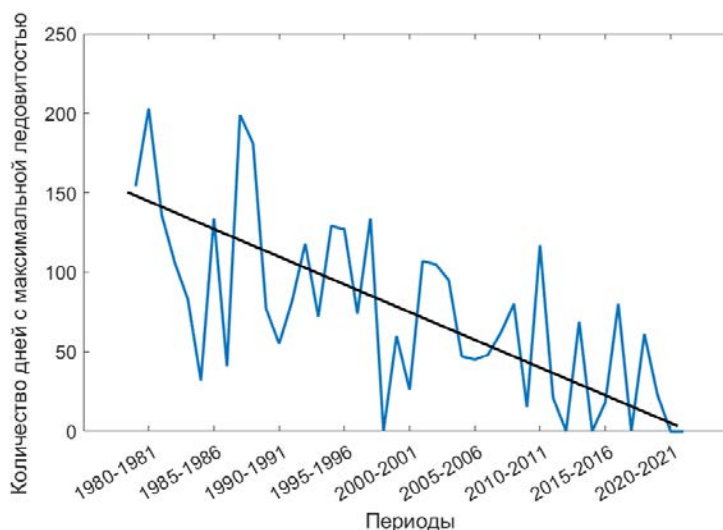


Рисунок 4. Количество дней с максимальной ледовитостью в зимний период года

В последние 10-15 лет часто показатель ледовитости даже в зимний период времени не достигает максимума (исходя из рис. 4), то есть не происходит полного заполнения льдом акватории. Тогда как ранее данная картина наблюдалась лишь 1 раз (зимой 1999-2000 гг.).

Оценки изменения сплоченности льда для исследуемых районов СЛО представлены на рис. 5. Отмечается тенденция устойчивого уменьшения сплоченности во всех районах, при этом наибольшая скорость уменьшения сплоченности наблюдается в районе №36 (сектор к северу от архипелага Земля Франца Иосифа).

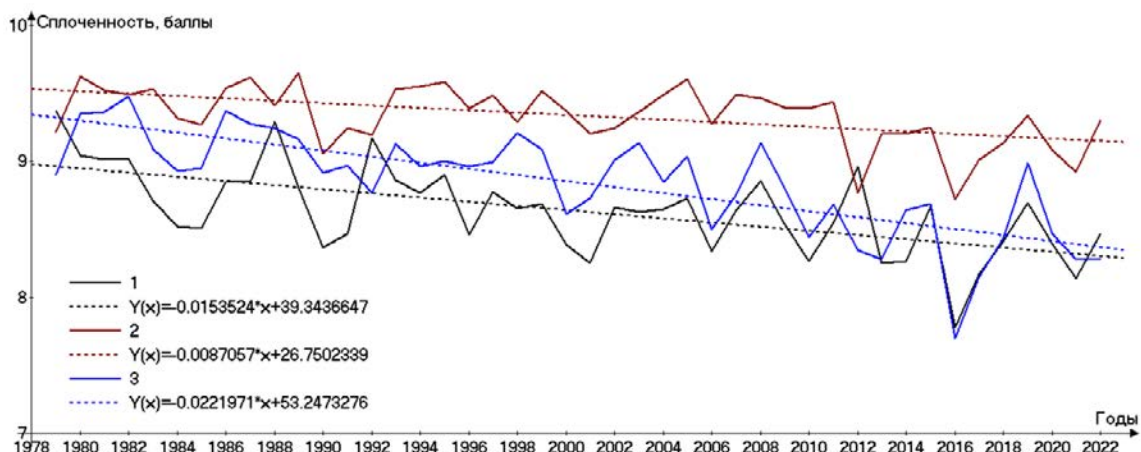
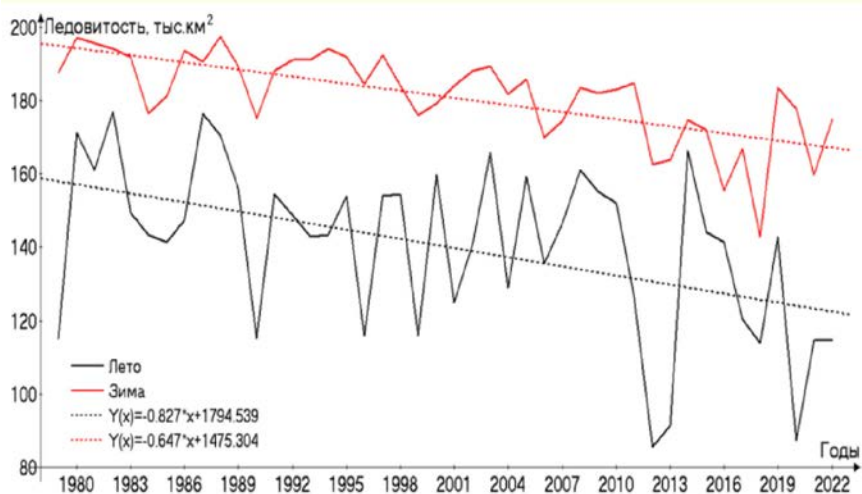
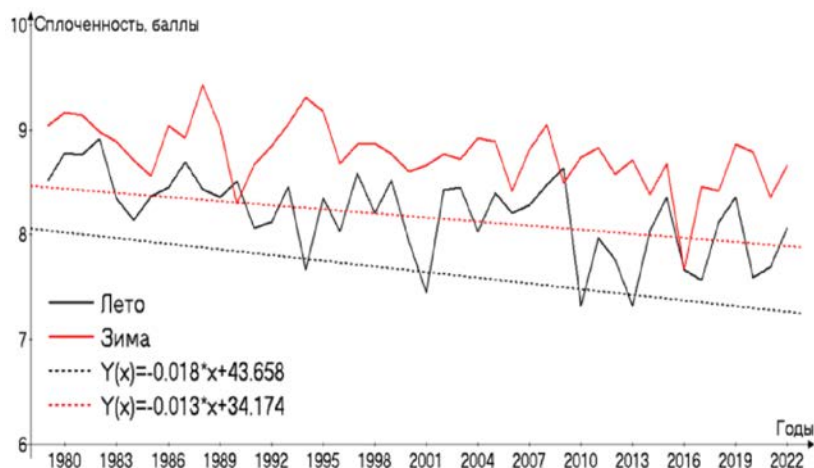


Рисунок 5. Изменения сплоченности ледяного покрова и оценки линейных трендов для каждого из районов соответственно  
1 – район №26, 2 – район №27, 3 – район №34

Сравнение характера изменения ледовитости и сплоченности за весь период наблюдений для отдельных сезонов года, которые были определены в соответствии с рекомендациями специалистов ААНИИ (зима октябрь-май, лето июнь-сентябрь), был выполнен на примере района №26 (в данном районе наиболее четко прослеживаются отрицательные тренды) и представлены на рис. 6.



(а)



(б)

Рисунок 6. Значения ледовитости (а) и сплоченности (б) в зимний и летний период года.

В целом, и в летний, и в зимний периоды тенденции изменений обоих характеристик совпадают как по знаку, так и по скорости.

Увеличение пространств чистой воды в летний период года способствует повышенному поглощению солнечной энергии и, как следствие, более интенсивному таянию льда, как с боковой, так и нижней поверхности [5]. Результат – сокращение общего количества льда. Уменьшение сплоченности в зимний период способствует увеличению теплоотдачи в атмосферу за счет турбулентных потоков явного и скрытого тепла с пространств открытой воды [7]. Это, в свою очередь, обуславливает повышение температуры в приземном слое атмосферы, что, собственно, мы и наблюдаем в высоких широтах при анализе не только средних зимних температур воздуха, но и среднегодовых оценок [12]. В целом, выявленным нами особенностям ледовых условий соответствуют ситуации, которые ведущие отечественные климатологи [1] определяют, как «положительная» фаза Арктического колебания. Данная фаза наблюдается с начала 70-х годов прошлого столетия, хотя в последние десятилетия она и переходит в более нейтральное состояние.

### **Заключение**

Выполненный анализ, результаты которого, безусловно, следует рассматривать как предварительные, позволяет сделать следующие выводы:

1. Выявлено общее уменьшение как ледовитости рассмотренной акватории, так и сплоченности (ледяного покрова), что косвенно указывает на увеличение пространств чистой воды и на соответствующее увеличение теплоотдачи в атмосферу, как минимум в зимний период года;

2. Весь исследуемый интервал времени (1979-2022 гг.) можно разделить на три периода, каждый из которых характеризуется своим собственным индивидуальным ледовым режимом:

- первый период - «устойчивый режим» (1979-2000 гг.), когда межгодовая изменчивость ледовитости была незначительна;

- второй период - «переходный режим» (2000-2005 гг.), когда происходит значительное уменьшение значений ледовитости во все сезоны года;

- третий период - «современный режим» (начиная, примерно, с 2006 г. и по настоящее время), когда наблюдается значительное увеличение межгодовой изменчивости ледовитости, а также не наблюдается полного покрытия льдом исследуемой акватории в зимний период.

### **Список литературы:**

1. Климат Арктики: процессы и изменения / Под. ред. И.И. Мохова, В.А. Семенова. М.: Физматкнига, 2022. 360 с.
2. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов / Аркт. и антаркт. НИИ. Под общ. ред. Б.А. Крутских. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 56 с.
3. Алексеев Г.В., Булатов Л.В., Захаров В.Ф., Иванов В.В. Тепловая экспансия атлантических вод в Арктическом бассейне / Метеорология и Гидрология. 1998. № 7. С. 69-78.
4. Алексеев Г.В. Формирование и динамика современного климата Арктики: монография / под ред. проф. Г.В. Алексеева. ААНИИ. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. 266 с.
5. Доронин Ю.П. Тепловое взаимодействие атмосферы и гидросферы в Арктике / Л.: Гидрометеоздат, 1969. 300 с.
6. Иванов В.В., Алексеев В.В., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из Космоса. 2013. №4. С. 50-65.
7. Макштас А.П. Тепловой баланс арктических льдов в зимний период / Л.: Гидрометеоздат, 1984. 66 с.
8. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Смоляницкий В.М., Юлин А.В., Фролов С.В. Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики // Российская Арктика. 2020. №10. С. 13-29. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12102
9. Фильчук К.В., Коробов В.Б., Юлин А.В., Шевелева Т.В. Влияние наблюдаемых изменений климатических условий на хозяйственную деятельность в морях Российской Арктики // Российская Арктика. 2022. № 17. С. 21-33. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-21-33

10. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K. [et al.] Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2022. Cambridge University Press Publ.. Cambridge, UK and New York, NY, USA. 3056 pp. DOI: 10.1017/9781009325844
11. Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Køltzow M., Aaboe S. [et al.] Exceptional warming over the Barents area. *Nature. Scientific Report*. 2022. Vol. 12. P. 9371. DOI: 10.1038/s41598-022-13568-5
12. Ivanov B.V. Comparing the «earlier» and the «modern» warming in West Arctic on example of Svalbard // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Turbulence, Atmosphere and Climate Dynamics, 2019. Vol. 231. P. 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012023
13. Мировой центр данных по морскому льду Арктического и Антарктического Научно-Исследовательского Института (МЦД МЛ ААНИИ). URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/> (дата обращения: 24.06.2023).

## References:

1. *The climate of the Arctic: processes and changes*. Edited by I.I. Mokhov, V.A. Semenova. Moscow, Fizmatkniga. 2022, 360 p. (In Russian).
2. International symbols for sea ice maps and nomenclature of sea ice. *Arkt. and Antarctica*. Research Institute. Under the general editorship of B.A. Krutskikh. L., Hydrometeoizdat Publ., 1984, 56 p. (In Russian).
3. Alekseev G.V., Bulatov L.V., Zakharov V.F., Ivanov V.V. Thermal expansion of Atlantic waters in the Arctic basin. *Meteorology and Hydrology*, 1998, no.7, pp.69-78. (In Russian).
4. Alekseev G.V. *Formation and dynamics of the modern climate of the Arctic: monograph*. In Alekseev G.V. (ed.), St. Petersburg, Hydrometeoizdat Publ., 2004, 266 p. (In Russian).
5. Doronin Yu.P. *Thermal interaction of the atmosphere and hydrosphere in the Arctic*. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1969, 300 p. (In Russian).
6. Ivanov V.V., Alekseev V.V., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Is the Arctic ice cover becoming seasonal?. *Earth Exploration from Space*. 2013, no. 4, pp. 50-65. (In Russian).
7. Makshtas A.P. *Thermal balance of Arctic ice in winter*. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1984, 66 p. (In Russian).
8. Mironov E.U., Klyachkin S.V., Smolyanitsky V.M., Yudin A.V., Frolov S.V. The current state and prospects of research on the ice cover of the seas of the Russian Arctic. *Russian Arctic*, 2020, no.10, pp. 13-29. (In Russian). DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12102
9. Filchuk K.V., Korobov V.B., Yudin A.V., Sheveleva T.V. Influence of observed changes in climatic conditions on economic activity in the seas of the Russian Arctic. *Russian Arctic*, 2022, no. 17, pp. 21-33. (In Russian). DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-21-33
10. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K. [et al.] Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2022. Cambridge University Press Publ.. Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp. DOI: 10.1017/9781009325844
11. Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Køltzow M., Aaboe S. [et al.] Exceptional warming over the Barents area. *Nature. Scientific Report*, 2022, vol. 12, p. 9371. DOI: 10.1038/s41598-022-13568-5
12. Ivanov B.V. Comparing the "earlier" and the "modern" warming in West Arctic on example of Svalbard. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Turbulence, Atmosphere and Climate Dynamics, 2019, vol. 231, p. 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012023
13. The World Sea Ice Data Center of the Arctic and Antarctic Research Institute (ICD ML AANI) (In Russian). Available at: <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/> (date of access: 06/24/2023).