

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247>  
УДК 551.326.1.



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## Климатическая изменчивость ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов

*Н.А. Лис\*, Е.С. Егорова*

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

*\*nalis@aari.ru*

### Резюме

В работе представлена статистическая структура как синоптической, так и климатической изменчивости ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов по базе данных ФГБУ «ААНИИ». Выявлены климатические периоды колебаний ледовитости, характеризующиеся относительной стабильностью (1928–1985 гг.) и активным таянием ледяного покрова (1986–2021 гг.). Показаны числовые оценки значимой разницы между предлагаемыми временными выборками. Рассмотрены характеристики тренда изменчивости площади льдов зимнего и летнего сезонов за выделенные периоды для всей акватории Баренцева моря и отдельных его районов. Установлены статистические оценки сравнения рядов ледовитости районов между собой. Оценена инерционность изменчивости площади льдов. Представленные результаты могут послужить основой при разработке моделей, описывающих долгопериодные колебания площади льдов Баренцева моря.

**Ключевые слова:** Баренцево море, долгопериодные колебания, морской лед, площадь льда, статистическая структура.

**Для цитирования:** Лис Н.А., Егорова Е.С. Климатическая изменчивость ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 3. С. 234–247. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247>.

Поступила 16.06.2022

После переработки 11.08.2022

Принята 30.08.2022

## Climatic variability of the ice extent of the Barents Sea and its individual areas

*Natalya A. Lis\*, Elizaveta S. Egorova*

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

*\*nalis@aari.ru*

### Summary

The ongoing decrease in the ice cover is one of the main consequences of global climate change. The Barents Sea, as part of the North European basin, is an area that is one of the first to react to these changes. According

to the AARI database, before the start of the current century the ice extent in the winter season varied from  $600 \cdot 10^3 \text{ km}^2$  to  $900 \cdot 10^3 \text{ km}^2$  in different years, while over the past 20 years the lower border has dropped to  $350 \cdot 10^3 \text{ km}^2$ . At the same time, the ice extent in the summer season has decreased more than 3 times. The aim of the article is to study the statistical structure of the longterm variability of the ice extent on the basis of the latest data, in order to identify the patterns of change characteristic of individual areas of the Barents Sea over the past decades. The main research methods include basic statistics, linear trend, stationary assessment, autocorrelation and the correlation coefficient. The work contains numerical estimates of the trend component for all the parts of the water area. The maximum contribution of the linear trend is due to the northeastern region and comprises 63 %. The maximum seasonal fluctuations are characteristic of the southeastern region, with almost complete freezing in winter (up to 99 %, as in the northeast) and complete clearing in summer and the absence of old ice. The same area has the least connection with the other parts ( $R$  less than 0.25) and the variability of its characteristics depends to a greater extent not only on the circulation of cold Arctic waters and the entry of warm Atlantic water, but also on river runoff. The north-eastern region is characterized by the capacity for retaining the “memory” of the previous state for more than 5 years, which indicates the highest inertia of the factors making for the variability of the ice extent. The speed of reducing the ice cover because of melting is estimated at  $1.76 \cdot 10^3 \text{ km}^2/\text{month}$ , while the rate of increase in the ice extent as a result of ice growth is estimated at  $1.26 \cdot 10^3 \text{ km}^2/\text{month}$ . Accordingly, the ice melts faster than it has time to grow, which leads to a decrease in the ice extent.

**Keywords:** Barents Sea, ice extent, interannual variability, sea ice, statistical structure.

**For Citation:** Lis N.A., Egorova E.S. Climatic variability of the ice extent of the Barents Sea and its individual area. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (3): 234–247. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247>.

Received 16.06.2022

Revised 11.08.2022

Accepted 30.08.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море (БМ) является частью Северо-Европейского бассейна (СЕБ) вместе с Гренландским, Норвежским и Белым морями. В этом регионе морские льды особо чувствительны к климатическим изменениям [1, 2]. Однако, ввиду особенностей гидрометеорологического режима и внутреннего расположения, Белое море изучается отдельно. Норвежское море никогда не покрывается льдом из-за активного притока теплых вод Северо-Атлантического течения, являющихся продолжением ветви Гольфстрима. Баренцево и Гренландское моря часто исследуют совместно [3, 4] в связи с круглогодичным наличием ледяного покрова и некоторыми схожими и взаимосвязанными механизмами формирования гидрометеорологического и ледового режимов. Также Баренцево море часто анализируют с соседствующим Карским [5, 6]. Это связано с тем, что эти моря сообщаются между собой и оба подвержены влиянию ветвей теплых атлантических вод и поступающих из Арктического бассейна холодных вод и льдов [2, 7, 8].

В связи с продолжающимися климатическими изменениями, выраженными заметным сокращением площади льдов в СЛО [9, 10], изучение особенностей межгодовой изменчивости Баренцева моря привлекает все больший интерес [11–13]. Так, по базе данных ФГБУ «ААНИИ», до начала 2000-х гг. площадь льда зимой варьировалась в разные годы от 600 тыс. км<sup>2</sup> до 900 тыс. км<sup>2</sup>. За последние же 20 лет нижняя граница опустилась до 350 тыс. км<sup>2</sup> (минимум наблюдался в 2016 г.). При этом площадь льда в летний сезон сократилась более чем в 3 раза. Кроме того, акватория моря является экономически важным районом, связанным прежде всего с добычей углеводородов и разработкой новых месторождений на шельфе, а также

с рыбным промыслом. При этом в исследованиях долгопериодных колебаний ледовитости данного района за последние 15 лет рассматривалась вся акватория целиком [4, 14], тогда как очевидны большие различия в гидрологическом и ледовом режимах его отдельных районов [2, 3].

Цель данной работы состоит в исследовании статистической структуры внутрigoдовой и долгопериодной изменчивости, а также в выявлении закономерностей изменения площади льда за последние десятилетия, характерных как для всего моря целиком, так и для отдельных его районов, на основании последних наиболее актуальных данных о ледовитости.

### ДААННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе были использованы архивные данные о ледовитости отдельных районов моря с 1928 по 2021 г., предоставленные отделом ледового режима и прогнозов ФГБУ «ААНИИ». Данные представляют собой среднемесячные значения ледовитости (в %) отдельных районов Баренцева моря, выделенных в работе [3]: западного (площадью 737 тыс. км<sup>2</sup>), северо-восточного (площадью 398 тыс. км<sup>2</sup>) и юго-восточного (площадью 253 тыс. км<sup>2</sup>) (рис. 1).

Ледовитость (площадь, занятая льдами, в границах моря [15]), выраженная в процентах, была пересчитана в площадь льда, выраженную тыс. км<sup>2</sup>, для некоторых статистических характеристик для удобства понимания и оценки межгодовой изменчивости. Кроме того, были рассчитаны средние значения ледовитости не для календарных, а для климатических сезонов, как наиболее характерных: лето — июль–сентябрь, зима — декабрь–апрель, которые были выделены ранее в работе [3].

В качестве основных методов исследования использовался статистический анализ, которые включал в себя в первую очередь основные статистики [16]. Также

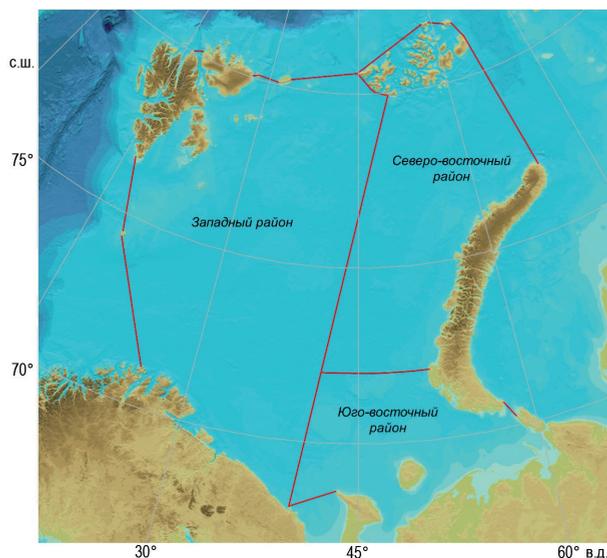


Рис. 1. Карта-схема расположения границ районов Баренцева моря с однородным ледово-гидрологическим режимом

Fig. 1. The map-scheme of the location of the boundaries of the parts of the Barents Sea with a homogeneous ice-hydrological regime

был рассчитан и проанализирован линейный тренд, который позволяет оценить тенденцию климатических изменений: уменьшается или увеличивается площадь льда и скорость, с которой происходит это изменение. При этом рассматривался не только весь период целиком, но и были выделены два периода с характерными особенностями изменчивости: первый период (1928–1985 гг.), не имеющий значимого тренда, и второй (1986–2021 гг.), характеризующийся наличием значимого отрицательного тренда. Значимость тренда определялась с помощью критерия Стьюдента при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы  $N - 1$ , где  $N$  представляет собой длину рассматриваемого ряда [17].

Также была оценена связь между изменчивостью ледовитости в разных районах за рассматриваемый период. Определена инерционность ледовитости с помощью расчета коэффициентов автокорреляции после удаления линейного тренда из исследуемых рядов [16, 17].

### ВНУТРИГОДОВАЯ СТРУКТУРА ЛЕДОВИТОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Внутригодовую изменчивость ледовитости Баренцева моря за период 1928–2021 гг. показывает жирная кривая на рис. 2: для всей акватории Баренцева моря — *a*; в западной (з) части — *б*; в северо-восточной (СВ) — *в*; юго-восточной (ЮВ) — *г*. Наименьшая площадь ледяного покрова в среднем многолетнем плане наблюдается в сентябре, наибольшая площадь — в апреле. Но, как видно из рис. 2, в отдельные

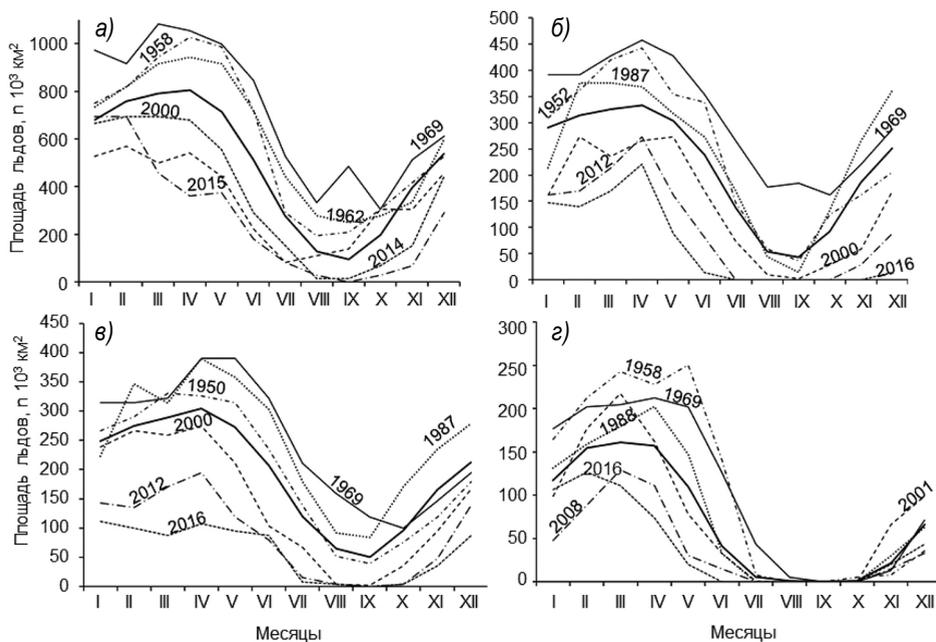


Рис. 2. Изменения площади ледяного покрова на всей акватории Баренцева моря (*a*), в западном (*б*), северо-восточном (*в*) и юго-восточном (*г*) районах в характерные годы (тонкие линии) и среднееголетнее значение за период 1928–2021 гг. (жирная линия)

Fig. 2. Changes in the area of the ice extent in the entire water area of the Barents Sea (*a*), in the Western (*б*), North Eastern (*в*) and South Eastern (*г*) areas in typical years (thin lines) and average long-term value for the period 1928–2021 (bold line)

годы даты минимального и максимального развития ледяного покрова варьировались в пределах 3–5 месяцев. Как видно, юго-восточный район Баренцева моря (см. рис. 2з) имеет наименьшую площадь льда в течение всего года. Конечно же, это связано в первую очередь и с наименьшей площадью самого района. Одновременно с этим юго-восточный район является единственным, который полностью очищается ото льда в разные годы в промежутке с июня по ноябрь. В зимний же сезон ледовитость юго-восточного района в среднем составляет 65 %. Максимальная площадь льдов приходится на западный и северо-восточный районы акватории, которые полностью очищаются ото льда в летние месяцы лишь в последние годы.

Статистический анализ внутригодовых изменений площади льдов в Баренцевом море демонстрирует следующие особенности структуры сезонных колебаний, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

**Статистические характеристики внутригодовых изменений площади льдов Баренцева моря**

Table 1

**Statistical characteristics of intra-annual changes in the area of the ice of the Barents Sea**

|      | Количество лет с максимальной и минимальной ледовитостью в процентном соотношении |    |    |    |             |    |    |    |
|------|---|----|----|----|-------------|----|----|----|
|      | БМ  | З  | СВ | ЮВ | БМ          | З  | СВ | ЮВ |
|      | максимальные  |    |    |    | минимальные |    |    |    |
| I    | 5   | 7  | 6  | 2  | **          | ** | ** | ** |
| II   | 20  | 13 | 9  | 21 | **          | ** | ** | ** |
| III  | 26  | 19 | 22 | 27 | **          | ** | ** | ** |
| IV   | 46  | 51 | 56 | 44 | **          | ** | ** | ** |
| V    | 3   | 7  | 7  | 7  | **          | ** | ** | ** |
| VI   | *   | *  | *  | *  | **          | ** | ** | 2  |
| VII  | *   | *  | *  | *  | 2           | 5  | ** | 16 |
| VIII | *   | *  | *  | *  | 25          | 30 | 18 | 23 |
| IX   | *   | *  | *  | *  | 68          | 54 | 79 | 26 |
| X    | *   | *  | *  | *  | 5           | 8  | 3  | 24 |
| XI   | *   | *  | *  | *  | **          | 3  | ** | 8  |
| XII  | *   | *  | 1  | *  | **          | ** | ** | 1  |

| Месяцы | Среднегодовое количество лет с максимальной и минимальной ледовитостью, % |    |    |    | Коэффициент вариаций |      |      |      |
|--------|---|----|----|----|----------------------|------|------|------|
| I      | 45  | 38 | 62 | 45 | 0,21                 | 0,30 | 0,24 | 0,31 |
| II     | 52  | 43 | 69 | 60 | 0,21                 | 0,26 | 0,25 | 0,25 |
| III    | 56  | 46 | 74 | 65 | 0,20                 | 0,24 | 0,23 | 0,25 |
| IV     | 58  | 47 | 79 | 63 | 0,23                 | 0,26 | 0,22 | 0,32 |
| V      | 49  | 42 | 70 | 45 | 0,28                 | 0,29 | 0,28 | 0,55 |
| VI     | 35  | 34 | 53 | 17 | 0,38                 | 0,36 | 0,39 | 0,93 |
| VII    | 19  | 19 | 30 | 2  | 0,50                 | 0,58 | 0,49 | 1,93 |
| VIII   | 9   | 8  | 16 | 0  | 0,71                 | 0,92 | 0,68 | 4,82 |
| IX     | 6   | 6  | 12 | 0  | 0,93                 | 1,13 | 0,72 | 7,92 |
| X      | 13  | 12 | 23 | 0  | 0,58                 | 0,75 | 0,49 | 4,60 |
| XI     | 24  | 23 | 39 | 8  | 0,35                 | 0,50 | 0,36 | 1,15 |
| XII    | 35  | 32 | 52 | 25 | 0,25                 | 0,34 | 0,27 | 0,54 |

*Примечание.* \* В годовом цикле в этом месяце максимум не наблюдался; \*\* в годовом цикле в этом месяце минимум не наблюдался.

*Note.* \* The maximum was not observed in the annual cycle this month; \*\* the minimum was not observed in the annual cycle this month.

Максимальная величина площади льдов чаще всего (в 44–56 % случаев) наблюдалась в апреле для всех районов и составляла от 47 % (запад, площадь льдов  $349 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>) до 79 % (северо-восток, площадь льдов  $313 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>). Значительно реже (в 19–27 % случаев) отмечалась в марте. В отдельные годы наибольшее распространение льдов приходилось на январь, февраль, март и в 1995 г. на декабрь. Минимальная величина площади льдов наблюдалась преимущественно в сентябре и в среднем равнялась  $92 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup> (на всей акватории, ледовитость 6 %),  $43 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup> (запад, ледовитость 6 %),  $49 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup> (северо-восток, ледовитость 12 %). Юго-восточный район в сентябре полностью очищается ото льда. Наименьшая ледовитость в сентябре свойственна для всего Северо-Европейского бассейна [18]. Но и в июне, июле и сентябре в отдельные годы также отмечалась минимальная ледовитость. В среднем она составляла от 0 до 12 % в разных районах Баренцева моря.

Для оценки степени вариации площади льдов для Баренцева моря было рассчитано отношение стандартного отклонения к средней площади льдов. Результаты, приведенные в табл. 1, констатируют статистическую закономерность: наименьшая степень вариаций наблюдается в осенне-зимний период (0,20–0,25 для всей акватории) и увеличивается в зимний сезон, достигая максимума летом (0,71–0,93 для всей акватории). Аналогичная закономерность отмечается во всех районах Баренцева моря.

Внутригодовые величины ледовитости площади льдов значительно меняются от года к году. Скорость сокращения площади льдов в результате таяния оценивается в 1,76 тыс. км<sup>2</sup>/месяц, а скорость увеличения ледовитости в результате нарастания льда оценивается в 1,26 тыс. км<sup>2</sup>/месяц. Приведенные оценки показывают, что сезонное уменьшение ледовитости в Баренцевом происходит быстрее, чем увеличение, что приводит к уменьшению площади льда.

#### ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЛЕДОВИТОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Одним из основных методов исследования закономерностей временной структуры долгопериодных колебаний площади льда является анализ тренда временного ряда [9, 16]. При этом ледовитость была пересчитана в площади для каждого района Баренцева моря для зимнего и летнего сезонов, а также для всей акватории целиком. Однако в межгодовой изменчивости площади льдов Баренцева моря нами были выделены два периода: 1928–1985 гг. и 1986–2021 гг. Разделение именно на такие периоды связано с тем, что, кроме визуального анализа (см. рис. 3), ранее был опубликован ряд работ по температуре, солености, толщине перемешанного слоя и другим параметрам, в которых были выделены схожие периоды до и после 1980-х гг., но для всего СЛО [19–21].

Для всех районов, как для лета, так и для зимы, отчетливо выделяется период относительно стабильной изменчивости ледовитости (см. рис. 3). В этот период линейный тренд является незначимым (табл. 2). Эмпирическое значение критерия Стьюдента не превышает его критическую величину, а коэффициент детерминации не превышает  $R^2 = 0,02$  с величиной тренда, колеблющейся в пределах 0,01–0,53 тыс. км<sup>2</sup>/год по модулю. В указанный период, несомненно, происходило как уменьшение, так и увеличение площади льдов, но в целом положение среднего значения оставалось неизменным.

При рассмотрении изменчивости площади льдов 1986–2021 гг. хорошо, даже визуально (см. рис. 3), выделяется отрицательный линейный тренд для всех районов за летний и зимний сезоны, кроме лета юго-восточной области. Рассмотрим характеристики тренда более подробно.

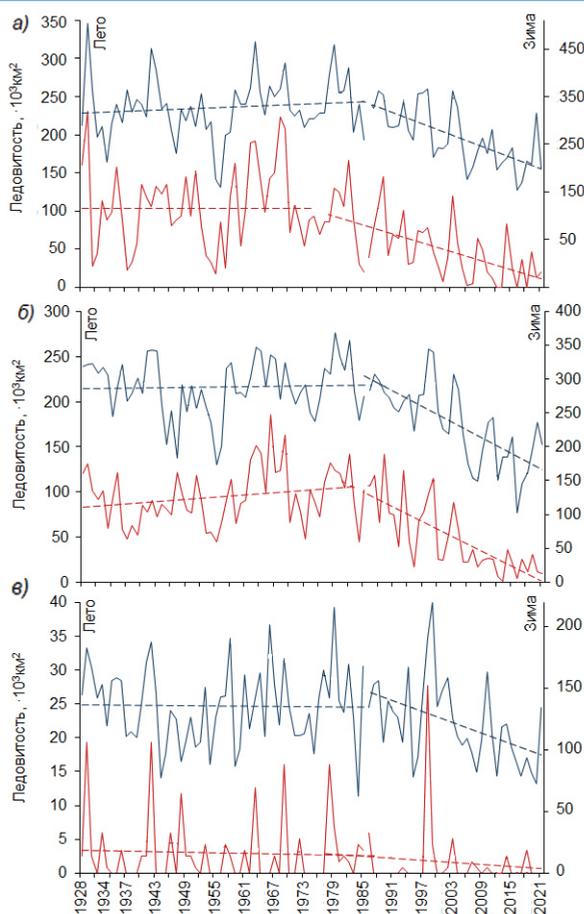


Рис. 3. Межгодовая изменчивость ледовитости западного (а), северо-восточного (б), юго-восточного (в) районов Баренцева моря в зимний (синий) и летний (красный) сезоны за период 1928–2021 гг. с нанесенными линиями линейного тренда (пунктирные линии)

Fig. 3. Interannual variability of the ice extent of Western (a), North Eastern (b), South Eastern (c) areas of the Barents Sea in the winter (blue) and summer (red) seasons for the period 1928–2021 with the lines of the linear trend (dashed lines)

*Зимний сезон (декабрь–апрель).* Наибольшее значение коэффициента детерминации наблюдается в северо-восточном районе —  $R^2 = 0,49$ , при этом величина тренда составляет  $-3,85$  тыс. км<sup>2</sup>/год (см. табл. 2). Отрицательная величина тренда говорит об уменьшении площади льда. Наименьший  $R^2$  соответствует юго-восточному району и равен  $0,21$ . Данная величина приходится на границу значимости, т. е. значима, но весьма мала. Величина тренда юго-восточного района  $-1,48$  тыс. км<sup>2</sup>/год, что в 2,6 раз меньше, чем в северо-восточном. Вероятно, это связано с тем, что для северо-восточного района (как и для западного) характеристики площади льда сезонного хода аналогичны другим арктическим морям. Ледяной покров в зимний сезон в северо-восточном районе занимает всю площадь (ледовитость достигает 99 %), а также в этом (как и в западном) районе Баренцева моря наблюдаются в отдельные годы старые льды. В зимний сезон практически равный вклад в общую ледовитость моря вносят западный — 43 % и се-

Таблица 2

## Характеристики линейного тренда для площади льда отдельных районов Баренцева моря за различные периоды

Table 2

## The characteristics of the linear trend for the ice extent of individual regions of the Barents Sea for various periods

| Количество лет в периоде, $n$ | Период    | Зимний сезон |  |  | Летний сезон |  |  | Год         |  |
|-------------------------------|-----------|--------------|--|--|--------------|--|--|-------------|--|
|                               |           | $R^2$        | Величина тренда, тыс. км <sup>2</sup> /год | Величина тренда, тыс. км <sup>2</sup> /n лет | $R^2$        | Величина тренда, тыс. км <sup>2</sup> /год | Величина тренда, тыс. км <sup>2</sup> /n лет | $R^2$       | Величина тренда, тыс. км <sup>2</sup> /год |
| 92                            | 1928–2021 | 0,16         | -1,03                                      | -94,76                                       | <b>0,24</b>  | -0,99                                      | -91,08                                       | <b>0,24</b> | -1,09                                      |
| 58                            | 1928–1985 | 0,01         | 0,41                                       | 23,78  | 0,00         | -0,01                                      | -0,58  | 0,01        | 0,30                                       |
| 36                            | 1986–2021 | <b>0,45</b>  | -3,96                                      | -142,56                                      | <b>0,31</b>  | -1,95                                      | -70,2  | 0,19        | 1,36                                       |
| 92                            | 1928–2021 | <b>0,25</b>  | -1,03                                      | -94,76                                       | <b>0,25</b>  | -0,76                                      | -69,92                                       | <b>0,30</b> | -0,98                                      |
| 58                            | 1928–1985 | 0,00         | 0,09                                       | 5,22   | 0,05         | 0,41                                       | 23,78  | 0,02        | 0,25                                       |
| 36                            | 1986–2021 | <b>0,49</b>  | -3,85                                      | -138,6                                       | <b>0,55</b>  | -2,74                                      | -98,64                                       | <b>0,63</b> | -3,86                                      |
| 92                            | 1928–2021 | <b>0,06</b>  | -0,30                                      | -27,6  | 0,02         | -0,03                                      | -2,76  | 0,10        | -0,25                                      |
| 58                            | 1928–1985 | 0,00         | -0,03                                      | -1,74  | 0,00         | -0,01                                      | -0,58  | 0,00        | -0,02                                      |
| 36                            | 1986–2021 | <b>0,21</b>  | -1,48                                      | -53,28                                       | 0,01         | -0,05                                      | -1,8   | 0,16        | -0,85                                      |
| 92                            | 1928–2021 | <b>0,22</b>  | -2,36                                      | -217,12                                      | <b>0,28</b>  | -1,77                                      | -162,84                                      | <b>0,28</b> | -2,31                                      |
| 58                            | 1928–1985 | 0,00         | 0,47                                       | 27,26  | 0,01         | 0,39                                       | 22,62  | 0,01        | 0,53                                       |
| 36                            | 1986–2021 | <b>0,53</b>  | -9,29                                      | -334,44                                      | <b>0,48</b>  | -4,74                                      | -170,64                                      | <b>0,61</b> | -8,58                                      |

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены значения коэффициента детерминации  $R^2$ , статистически значимые при уровне значимости 0,05.  
 Note. Shown in bold are the values of the  $R^2$  determination coefficient that are statistically significant at a significance level of 0.05.

ро-восточный — 38 % районы (рис. 4). В то же время юго-восточный район полностью очищается ото льда летом и полностью замерзает зимой, при этом преобладают более тонкие льды, и имеет наименьший вклад, не превышающий 21 %.

Теплые воды, которые приносятся одной из ветвей Северо-Атлантического течения — Нордкапским течением, на юго-восточный район, несомненно, имеют большее влияние, чем на более северные районы Баренцева моря, которые также находятся под влиянием теплых вод Северной Атлантики, приносимых Новоземельским прибрежным течением и его восточной ветвью [22]. Также на юго-восточный район дополнительное влияние оказывает его мелководность и сток такой крупной реки, как Печора [2]. Западный район является своего рода промежуточным по ледовому и гидрологическому режимам. Это район, в котором преобладают однолетние льды [3], что и проявляется в характеристиках трендовой составляющей (см. рис. 3). Коэффициент детерминации равен 0,45 с величиной тренда  $-3,96$  тыс. км<sup>2</sup>/год. Если же рассматривать всю акваторию целиком, то значимый отрицательный тренд говорит об уменьшении площади льда со скоростью 9,23 тыс. км<sup>2</sup>/год. Что немало при общей площади моря 1424 тыс. км<sup>2</sup> и максимально замерзающей ее части в 1044 тыс. км<sup>2</sup>. Особенно это видно в последние годы, когда за 10 лет (2010–2021 гг.) максимальная площадь, покрытая льдом в зимний сезон, занимала менее 637 тыс. км<sup>2</sup>. Величина тренда в северо-восточном и юго-восточном районах за период 1986–2021 гг. составляет  $-138,60$  тыс. км<sup>2</sup>/36 лет и  $-52,28$  тыс. км<sup>2</sup>/36 лет соответственно, что превышает для данных районов величину тренда за 1928–1985 гг. ( $5,22$  тыс. км<sup>2</sup>/58 лет и  $-53,28$  тыс. км<sup>2</sup>/58 лет) практически в 30 раз за меньшее количество лет. Схожая ситуация наблюдается и для западного района — величина тренда за период после 1986 г. превышает таковую за предыдущие 58 лет в 6 раз.

*Летний сезон (июнь–сентябрь).* Наблюдается схожее распределение вклада трендовой составляющей в общую дисперсию ряда, выраженного коэффициентом детерминации. Наибольшие значения  $R^2 = 0,55$  соответствуют северо-восточному району, наименьшие — юго-восточному. При этом линейный тренд в юго-восточном районе статистически не значим ни для одного из рассматриваемых периодов (см. табл. 2). Северо-восточный район вносит наибольший вклад в общую ледовитость летнего сезона всего моря в 56 %. Вклад юго-восточного района в общую ледовитость всего моря минимален.

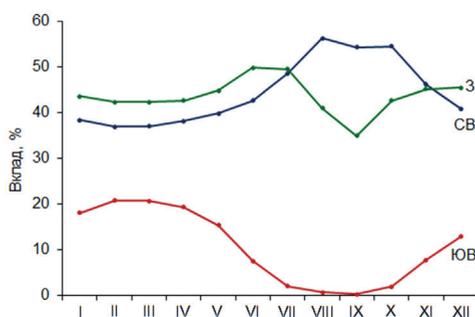


Рис. 4. Вклад отдельных районов в общую ледовитость Баренцева моря по месяцам: западный (зеленая линия), северо-восточный (синяя линия), юго-восточный (красная линия) районы за 1928–2021 гг.

Fig. 4. The contribution of individual regions to the general ice coverage of the Barents Sea by month: Western (green line), North Eastern (blue line), South Eastern (red line) for 1928–2021

Стоит отметить, что процесс уменьшения общей многолетней площади льдов летом происходит интенсивнее, чем его нарастание зимой, что выражается в более высоких значениях коэффициента детерминации и величины тренда за более короткий период. Как для зимнего, так и для летнего сезонов характерно отсутствие тренда в 1928–1985 гг. Из чего следует, что климатические изменения площади льдов в разных районах Баренцева моря формируются по-разному и, соответственно, могут иметь различные причины.

Интересно, что вклад западного района увеличивается в зимне-весенний период и резко уменьшается в летний. Тогда как в северо-восточном районе ситуация просматривается обратная — увеличение вклада в летние месяцы и снижение с осени по весну (см. рис. 4). Вклад юго-восточного района распределяется схожим образом с западным. Стоит отметить, что в каждом районе ледовитость уменьшилась в различной степени. Так, в северо-восточном районе она сократилась наибольшим образом — на 14 % (на 50 тыс. км<sup>2</sup> при площади района 398 тыс. км<sup>2</sup>), в западном — на 8 % (60 тыс. км<sup>2</sup> при площади района 737 тыс. км<sup>2</sup>) как в зимний, так и в летний сезоны, в юго-восточном — на 5 % за зимний сезон (14 тыс. км<sup>2</sup> при площади района 253 тыс. км<sup>2</sup>) и всего на 1 % за летний период (1 тыс. км<sup>2</sup>). Вероятно, это связано с наличием большей площади старых льдов в северо-восточном районе и большим количеством однолетних льдов в западном.

Таблица 3

**Коэффициенты автокорреляционной функции ледовитости за 1928–2021 гг.  
для различных районов Баренцева моря**

Table 3

**The coefficients of the auto-correlation function of the ice extent for various parts  
of the Barents Sea for 1928–2021**

| Сдвиг,<br>лет | Северо-восточный<br>район |      |      | Западный район |      |      | Юго-восточный<br>район |      |      |
|---------------|---------------------------|------|------|----------------|------|------|------------------------|------|------|
|               | зима                      | лето | год  | зима           | лето | год  | зима                   | лето | год  |
| 0             | 1,00                      | 1,00 | 1,00 | 1,00           | 1,00 | 1,00 | 1,00                   | 1,00 | 1,00 |
| 1             | 0,59                      | 0,50 | 0,68 | 0,44           | 0,41 | 0,54 | 0,23                   | –    | 0,28 |
| 2             | 0,34                      | 0,40 | 0,41 | 0,28           | –    | 0,29 | –                      | –    | –    |
| 3             | –                         | 0,42 | 0,34 | –              | –    | 0,23 | –                      | –    | –    |
| 4             | –                         | 0,38 | 0,37 | –              | –    | –    | –                      | –    | –    |
| 5             | –                         | 0,35 | 0,43 | –              | –    | –    | –                      | –    | –    |

*Примечание.* Знаком «–» обозначен незначимый коэффициент корреляции при уровне значимости 0,05.  
*Note.* An insignificant correlation coefficient is indicated by a “–” sign at a significance level of 0.05.

Дополнительно для сравнения внутренней структуры изменчивости площади льдов в отдельных районах был произведен анализ автокорреляционной функции, который позволяет оценить инерционность изменчивости процесса. Для этого из исходных рядов 1928–2021 гг. был удален линейный тренд (тренд рассчитывался для всей длины ряда), а затем рассчитан коэффициент корреляции. Статистически значимые коэффициенты корреляции представлены в табл. 3. Очевидно, инерционность в разных районах различна. Так, наиболее долго — более пяти лет — сохраняет свою «память» изменчивость площади льда в летний сезон северо-восточного района, что также находит отражение в ряду среднегодовых величин. Наименьшая инерционность наблюдается в юго-восточном районе и в пределах межгодовой изменчивости

отсутствует. Западный район сохраняет и в данной характеристике структуры своего рода среднее положение, инерционность составляет от года до трех.

Данный результат говорит о том, что северо-восточный район в связи с меньшим влиянием притока теплых вод из Северной Атлантики является относительно других районов наиболее стабильным, что можно использовать при разработке различных моделей. Наибольший коэффициент корреляции отмечается между западным и северо-восточными районами для зимнего и летнего сезонов (0,7), северо-восточным и юго-восточным (0,6) для зимы. Наименьшая корреляция между западным и юго-восточными районами, что говорит о необходимости разработки моделей для каждого района по отдельности, особенно для юго-восточного.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью анализа основных статистических характеристик выявлены особенности внутригодовой изменчивости ледовитости для отдельных районов Баренцева моря. За последние 20 лет площадь льда Баренцева моря значительно уменьшилась, достигнув минимума в 2016 г. в 350 тыс. км<sup>2</sup>. При этом площадь льда в летний сезон сократилась более чем в 3 раза.

Во всех районах (за летний и зимний сезоны) выделен период относительно стабильной изменчивости ледовитости 1928–1985 гг., который характеризуется отсутствием значимого линейного тренда. В связи с чем наибольший интерес для исследования представляет собой период 1986–2021 гг., имеющий значимый отрицательный тренд для всех районов ( $R^2$  составил 0,49 для северо-восточного, 0,45 для западного, 0,21 для юго-восточного районов в зимний сезон). В данный период (после 1986 г.) в летний сезон в юго-восточном районе не выделяется значимый линейный тренд, тогда как для северо-восточного и западного районов коэффициент детерминации (соответственно, линейный тренд) значим. При сравнении величины тренда за выделяемые периоды очевидна разница в многолетней изменчивости: за 36 лет (1986–2021 гг.) величина тренда площади льда БМ превысила таковую за предшествующие 58 лет (1928–1985 гг.) в 12 и 6,5 раз в зимний и летний сезоны соответственно, что говорит о более интенсивном изменении ледовитости за период после 1986 г. Приведенные числовые оценки подтверждают в определенной степени адекватность разделения для анализа на предлагаемые периоды.

Определена различная степень как инерционности, так и взаимосвязи между всеми тремя районами. Автокорреляционная функция показывает, что наибольшая инерционность свойственна северо-восточному району в летний сезон — более 5 лет. Наименьшая инерционность — юго-восточному, коэффициенты автокорреляции статистически значимы лишь на сдвиге в 1 год, а летом и вовсе не значимы. Западный район: от года до трех. Сокращение площади льдов в разных районах происходит с различной скоростью. На северо-восточный район приходится по уменьшению площади льда на 4 тыс. км<sup>2</sup>/год при площади 397,7 тыс. км<sup>2</sup>, тогда как в юго-восточном районе уменьшение составляет 1,5 тыс. км<sup>2</sup>/год при его площади 252,8 тыс. км<sup>2</sup>. Одновременно с этим каждый район вносит разный вклад в общую ледовитость Баренцева моря. В летний сезон максимальный вклад вносит северо-восточный район — 56 %, в зимний — вклад западного и северо-восточного районов практически одинаковый — 43 % и 38 % соответственно. Тогда как юго-восточный район в течение всего года вносит наименьший вклад.

По результатам исследований, представленных в настоящей работе, предложено использовать при исследовании климатической изменчивости ледовитости Баренце-

ва моря разделение временных рядов ледовитости на два характерных периода: до 1985 г. и после. Также для дальнейшей разработки физико-статистических моделей предлагается рассматривать отдельные районы Баренцева моря для получения наиболее качественных результатов, учитывающих особенности каждого района.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22–27–00443.

**Благодарности.** Авторы признательны А.В. Юлину за предоставленные данные по площади льда.

**Competing interests.** The authors have no competing interests.

**Funding.** The work was supported by the Russian Science Foundation within the framework of the research project No. 22–27–00443.

**Acknowledgments.** The authors are grateful for the A.V. Yulin for data ice coverage.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубакин Г.К. Крупномасштабная изменчивость состояния ледяного покрова морей Северо-Европейского бассейна. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 160 с.
2. Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 270 с.
3. Миронов Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ААНИИ, 2004. 320 с.
4. Тимохов Л.А., Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Юлин А.В. Климатические изменения сезонных и долгопериодных колебаний ледовитости Гренландского и Баренцева морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 2. С. 148–168. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168.
5. Kumar A., Yadav J., Mohan R. Spatio-temporal change and variability of Barents–Kara sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications // Science of The Total Environment. 2021. Т. 753. С. 142046. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142046.
6. Siew P.Y.F., Li C., Ting M., Sobolowski S.P., Wu Y., Chen X. North Atlantic Oscillation in winter is largely insensitive to autumn Barents–Kara sea ice variability // Science Advances. 2021. Т. 7. № 1. С. 10. doi: 10.1126/sciadv.abg4893.
7. Smedsrud L.H., Muilwijk M., Brakstad A., Madonna E., Lauvset S.K., Spensberger C., Born A., Eldevik T., Drange H., Jeansson E., Li C., Olsen A., Skagseth O., Slater D.A., Straneo F., Vage K., Arthun M. Nordic Seas heat loss, Atlantic inflow, and Arctic sea ice cover over the last century // Reviews of Geophysics. 2022. Т. 60. № 1. e2020RG000725. doi:10.1029/2020RG000725.
8. Madonna E., Sandø A.B. Understanding differences in North Atlantic poleward ocean heat transport and its variability in global climate models // Geophysical Research Letters. 2022. Т. 49. № 1. e2021GL096683. doi: 10.1029/2021GL096683.
9. Kumar A., Yadav J., Srivastava R., Mohan R. Arctic sea ice variability and trends in the last four decades: role of ocean–atmospheric forcing // Understanding Present and Past Arctic Environments. Elsevier, 2021. P. 301–324. doi: 10.1002/2017JC012768.
10. Прохорова У.В. Оценка влияния метеорологических параметров на изменчивость площади и толщины морского льда в Карском море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 64–75. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75.
11. Simmonds I., Li M. Trends and variability in polar sea ice, global atmospheric circulations, and baroclinicity // Annals of the New York Academy of Sciences. 2021. Т. 1504. № 1. P. 167–186. doi: 10.1111/nyas.14673.

12. *Solheim J.E., Falk-Petersen S., Humlum O., Mø N.A.* Changes in Barents Sea Ice Edge Positions in the Last 442 Years. Part 2: Sun, Moon and Planets // *International Journal of Astronomy and Astrophysic.* 2021. Т. 11. № 2. P. 279–341. doi: 10.4236/ijaa.2021.112015.
13. *Efstathiou E., Eldevik T., Arthun M., Lind S.* Spatial Patterns, Mechanisms, and Predictability of Barents Sea Ice Change // *Journal of Climate.* 2022. Т. 35. № 10. P. 2961–2973. doi: 10.1175/JCLI-D-21-0044.1.
14. *Жичкин А.П.* Особенности межгодовых и сезонных колебаний аномалий ледовитости Баренцева моря // *Метеорология и гидрология.* 2015. № 5. С. 52–62.
15. JCOMM Expert Team on Sea Ice. *Sea-Ice Nomenclature: snapshot of the WMO Sea Ice Nomenclature No. 259.* Geneva, Switzerland: WMO-JCOMM, 2014. 121 p. doi: 10.25607/OBP-1515.
16. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 407 с.
17. *Гордеева С.М.* Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2010. 74 с.
18. *Тимохов Л.А., Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Попов А.В.* Особенности сезонной и межгодовой изменчивости ледяного покрова Гренландского моря // *Лед и Снег.* 2018. Т. 58. № 1. С. 127–134. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-127-134
19. *Morison J., Aagaard K., Steele M.* Recent environmental changes in the Arctic: A review // *Arctic.* 2000. V. 53. № 4. P. 359–371. doi: 10.14430/ARCTIC867.
20. *Polyakov I.V., Timokhov L.A., Alexeev V.A., Bacon S., Dmitrenko I.A., Fortier L., Frolov I.E., Gascard J.-C., Hansen E., Ivanov V.V., Laxon S., Mauritzen C., Perovich D., Shimada K., Simmons H.L., Sokolov V.T., Steele M., Toole J.* Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap // *Journal of Physical Oceanography.* 2010. Т. 40. № 12. P. 2743–2756. doi: 10.1175/2010JPO4339.1.
21. *Чернявская Е.А., Тимохов Л.А., Карпий В.С., Малиновский С.Ю.* Межгодовая изменчивость характеристик поверхностного слоя и галоклина Арктического бассейна // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2020. Т. 66. № 4. С. 404–426. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-404-426.
22. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. Л.: ГУНиО МО СССР, 1980. 190 с.

## REFERENCES

1. *Zubakin G.K.* *Krupnomasshtabnaia izmenchivost' sostoianiia ledianogo pokrova morei Severo-Evropeiskogo basseina.* Large-scale variability of the state of the ice cover of the seas of the North European basin. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 160 p. [In Russian].
2. *Nikiforov E.G., Shpajher A.O.* *Zakonomernosti formirovaniya krupnomasshtabnykh kolebanij gidrologicheskogo rezhima Severnogo Ledovitogo okeana.* Patterns of formation of large-scale fluctuations of the hydrological regime of the Arctic Ocean. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980: 270 p. [In Russian].
3. *Mironov Y. U.* *Ledovye usloviia v Grenlandskom i Barentsevom moriakh i ikh dolgosrochnyi prognoz.* Ice conditions in the Greenland and Barents Seas and their long-term forecast. St. Petersburg: AARI, 2004: 320 p. [In Russian].
4. *Timohov L.A., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Yulin A.V.* Climatic changes of seasonal and inter-annual variability of the ice cover of the Greenland and Barents seas. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (2): 148–168. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168. [In Russian].
5. *Kumar A., Yadav J., Mohan R.* Spatio-temporal change and variability of Barents–Kara sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications. *Science of The Total Environment.* 2021, 753: 142046. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142046.

6. Siew P.Y.F., Li C., Ting M., Sobolowski S.P., Wu Y., Chen X. North Atlantic Oscillation in winter is largely insensitive to autumn Barents–Kara sea ice variability. *Science Advances*. 2021, 7 (31): eabg4893. doi: 10.1126/sciadv.abg4893.
7. Smedsrud L.H., Muilwijk M., Brakstad A., Madonna E., Lauvset S.K., Spensberger C., Born A., Eldevik T., Drange H., Jeansson E., Li C., Olsen A., Skagseth O., Slater D.A., Straneo F., Vage K., Arthun M. Nordic Seas heat loss, Atlantic inflow, and Arctic sea ice cover over the last century. *Reviews of Geophysics*. 2022, 60 (1): e2020RG000725. doi:10.1029/2020RG000725.
8. Madonna E., Sando A.B. Understanding differences in North Atlantic poleward ocean heat transport and its variability in global climate models. *Geophysical Research Letters*. 2022, 49 (1): e2021GL096683. doi: 10.1029/2021GL096683.
9. Kumar A., Yadav J., Srivastava R., Mohan R. Arctic sea ice variability and trends in the last four decades: role of ocean–atmospheric forcing. *Understanding Present and Past Arctic Environments*. Elsevier, 2021: 301–324. doi: 10.1002/2017JC012768.
10. Prohorova U.V. Assessing the influence of meteorological parameters on sea ice area and thickness variability in the Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (1): 64–75. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75.
11. Simmonds I., Li M. Trends and variability in polar sea ice, global atmospheric circulations, and baroclinicity. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2021, 1504 (1): 167–186. doi: 10.1111/nyas.14673.
12. Solheim J.E., Falk-Petersen S., Humlum O., Mö N.A. Changes in Barents Sea Ice Edge Positions in the Last 442 Years. Part 2: Sun, Moon and Planets. *International Journal of Astronomy and Astrophysic*. 2021, 11 (2): 279–341. doi: 10.4236/ijaa.2021.112015.
13. Efsthathiou E., Eldevik T., Arthun M., Lind S. Spatial Patterns, Mechanisms, and Predictability of Barents Sea Ice Change. *Journal of Climate*. 2022, 35 (10): 2961–2973. doi: 10.1175/JCLI-D-21-0044.1.
14. Zhichkin A. P. Peculiarities of interannual and seasonal variations of the Barents sea ice coverage anomalies. *Meteorologiya i gidrologiya*. Russian meteorology and hydrology. 2015, 5: 52–62. [In Russian].
15. JCOMM Expert Team on Sea Ice. *Sea-Ice Nomenclature: snapshot of the WMO Sea Ice Nomenclature No. 259*. Geneva, Switzerland: WMO-JCOMM, 2014: 121 p. doi: 10.25607/OBP-1515.
16. Malinin V.N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii*. Statistical methods for analyzing hydrometeorological information. St. Petersburg: RSHU, 2010: 407 p. [In Russian].
17. Gordeeva S.M. *Statisticheskie metody obrabotki i analiza gidrometeorologicheskoy informacii*. Statistical methods of processing and analysis of hydrometeorological information. St. Petersburg: RSHU, 2013: 13 p. [In Russian].
18. Timokhov L.A., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Popov A.V. Seasonal and inter-annual variability of the ice cover in the Greenland sea. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (1): 127–134. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-127-134. [In Russian].
19. Morison J., Aagaard K., Steele M. Recent environmental changes in the Arctic: A review. *Arctic*. 2000, 53 (4): 359–371. doi: 10.14430/ARCTIC867.
20. Polyakov I.V., Timokhov L.A., Alexeev V.A., Bacon S., Dmitrenko I.A., Fortier L., Frolov I.E., Gascard J.-C., Hansen E., Ivanov V.V., Laxon S., Mauritzen C., Perovich D., Shimada K., Simmons H.L., Sokolov V.T., Steele M., Toole J. Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap. *Journal of Physical Oceanography*. 2010, 40 (12): 2743–2756. doi: 10.1175/2010JPO4339.1.
21. Chernyavskaya E.A., Timokhov L.A., Karpuy V.S., Malinovsky S.Y. Interannual variability of parameters of the Arctic Ocean surface layer and halocline. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (4): 404–426. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-404-426. [In Russian].
22. *Atlas okeanov. Severnyj Ledovityj okean*. Atlas of the oceans. Arctic ocean. Leningrad: GUNiO MO SSSR, 1980: 190 p. [In Russian].