

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-290-309>
УДК 551.326.12



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Основные факторы, определяющие межгодовые изменения возрастной структуры ледяного покрова отдельных районов Баренцева моря

*Е.С. Егорова**, *Н.А. Лис*, *Е.У. Миронов*

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

**egorova@aari.ru*

Резюме

В настоящей работе выявлены основные факторы, определяющие межгодовые изменения площади льдов различных возрастных градаций для отдельных районов Баренцева моря. Путем построения физико-статистических уравнений с наибольшими коэффициентами корреляции и детерминации для периода с 1997 по 2023 г. были определены оптимальные комбинации предикторов для описания изменений возрастного состава ледяного покрова моря. Характер атмосферной циркуляции является основным фактором, оказывающим влияние на возрастную структуру льдов Баренцева моря. Меньшее влияние оказывают адвекция теплых вод атлантического происхождения, а также предыстория ледовитости, приповерхностная температура воздуха и леодообмен. Большинство полученных статистических моделей площади льдов различного возраста потенциально применимы на практике для долгосрочного прогнозирования, поскольку их эффективность составляет более 10 %.

Ключевые слова: Баренцево море, возрастной состав, зимний период, ледяной покров, межгодовые изменения, основные факторы.

Для цитирования: *Егорова Е.С., Лис Н.А., Миронов Е.У.* Основные факторы, определяющие межгодовые изменения возрастной структуры ледяного покрова отдельных районов Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 3. С. 290–309. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-290-309>.

Поступила 15.06.2023

После переработки 31.07.2023

Принята 11.08.2023

Drivers of interannual variations of ice age composition in sub-areas of the Barents Sea

*Elizaveta S. Egorova**, *Natalya A. Lis*, *Yevgeniy U. Mironov*

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

**egorova@aari.ru*

Summary

The present study deals with assessing the impact of the factors that define the interannual variations of ice area of different age categories in the Barents Sea. For the analysis, a set of hydrometeorological and ice parameters was created, potentially influencing the age composition of the sea ice cover. Among these are the climate indices of the Arctic Oscillation, the Arctic Dipole, the Pacific-North American Oscillation, the North Atlantic Oscillation and the Atlantic Multidecadal Oscillation, as well as the surface air temperature, the ice cover in the previous months and the ice outflow on the sea ice in the Barents Sea. Based on the parameters above, statistical equations with high quality indicators have been obtained.

The statistical equations are presented for the period of maximum ice cover in April. The results are provided for three homogeneous sub-areas of the Barents Sea: western, northeastern and southeastern. It is found that the atmospheric circulation pattern is the driver of the interannual variations in the Barents Sea ice age composition. The ice amount of different age categories is also determined by the advection of warm Atlantic Waters, but to a lesser extent; this effect is especially pronounced in the western sub-area of the Barents Sea. Essentially, the contribution of the local parameters, such as the ice cover in the previous months, the distribution of surface air temperature and the sea ice outflow, is more pronounced in the interannual variations of the ice coverage, while the contribution of climate indices is more pronounced in the changes in the ice area of individual age categories in the Barents Sea.

Most of the models obtained are potentially applicable to forecasting the ice area of various age categories since their efficiency is more than 10 %, which satisfies the requirements for the quality of the long-term forecast method.

Keywords: Barents Sea, ice cover, ice age composition, interannual variations, key factors, winter season.

For citation: Egorova E.S., Lis N.A., Mironov Ye.U. Drivers of interannual variations of ice age composition in sub-areas of the Barents Sea. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (3): 290–309. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-290-309>.

Received 15.06.2023

Revised 31.07.2023

Accepted 11.08.2023

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море играет особую роль в глобальной климатической системе. Это обуславливается его соседством с теплым Норвежским морем и холодными регионами Северного Ледовитого океана (СЛО). Сочетание крупномасштабных факторов циркуляции морских течений и воздушных переносов на акватории моря формирует климат умеренных широт (в частности, европейского сектора).

Современные изменения климата охватывают всю планету. Однако в высоких широтах Северного полушария они проявляются заметнее всего: здесь средняя температура приземного слоя атмосферы растет примерно в 2,5 раза быстрее, чем в других широтных зонах [1]. Это явление в литературе получило название *Арктического* (или Полярного) *усиления* [2, 3]. Причины возникновения данного феномена и механизмы его воздействия на систему «океан–лед–атмосфера» подробно описаны в работе [4]. В настоящее время основными движущими силами Арктического усиления считаются два разных типа механизмов: механизмы положительных и отрицательных обратных связей, действующих на разных широтах [2]. Например, применительно к поверхности океана, частично покрытого льдом, основной движущей силой данного феномена считается так называемый «альбедный механизм», связанный с многократным различием между отражательной способностью (альбедо) льда и воды [4]. Отметим, что изменение ледового режима СЛО в 2000-е гг., характеризующееся заметным сокращением площади ледяного покрова в летний сезон и замещением старых льдов однолетними [5], повлекло за собой усиление эффекта обратных связей в системе, что вызвало

ускорение процесса таяния морского льда и увеличение площади открытой воды и продолжительности безледного периода.

Регион Баренцева моря одним из первых реагирует на изменения в климатической системе. Причем высокие темпы сокращения площади ледяного покрова на акватории моря наблюдаются не только летом, но и в период его *максимального развития* [6]. Согласно оценкам [7, 8], полученным за период с 1979 по 2018 г., Баренцево море вносит наибольший вклад (порядка 27 %) в уменьшение общей площади морского льда в марте относительно других ледовитых морей Северного полушария. Кроме того, на его акватории после 2003 г. отмечается устойчивое смещение сроков сезонного очищения ото льда на более ранние [9].

Толщина ледяного покрова арктических морей представляет собой чувствительный и наглядный индикатор изменений климата. Для косвенной оценки толщины в случае, если она не может быть измерена контактными или неконтактными методами, используют ледовые карты с указанием возрастных градаций морского льда. Хотя основные закономерности и особенности ледового режима Баренцева моря обобщены в монографии [10], вопрос изменчивости возрастной структуры (средней толщины) ледяного покрова его акватории остается относительно малоизученным. Первые оценки [10, 11] распределения количества морского льда различного возраста на акватории моря в период 50–70-х гг. XX в. были выполнены расчетным способом с использованием барических карт. Однако они ограничены лишь отдельными месяцами (в [10] это апрель и сентябрь, в [11] — май). В исследовании [12] уже по данным обзорных ледовых карт Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) были получены среднемесячные значения площадей льдов основных возрастных градаций Баренцева моря. Авторы подчеркивают, что, несмотря на наблюдающееся сокращение ледовитости Баренцева моря, за рассматриваемый в работе период с 1997 по 2021 г. возрастной состав морского льда меняется в пределах естественной изменчивости. Однако сравнение с более ранними оценками говорит об уменьшении средней толщины ледяного покрова Баренцева моря с начала XXI в.

Развитие знаний о долгопериодных изменениях возрастного состава льдов Баренцева моря как основы совершенствования долгосрочных методов их прогноза в свете современных климатических изменений становится актуальной задачей. Определение гидрометеорологических и ледовых факторов, которые оказывают влияние на межгодовые изменения количества морского льда разного возраста, а также оценка вклада каждого фактора в изменчивость возрастной структуры ледяного покрова являются целью настоящего исследования. Подбор статистически значимых предикторов будет осуществляться на основе уже установленных ранее физически взаимосвязанных и устойчивых процессов, происходящих в системе «океан–лед–атмосфера». В результате применения мультирегрессионного анализа был получен набор физико-статистических уравнений, описывающих межгодовые изменения площади ледяного покрова различных возрастных градаций на акватории Баренцева моря. Они в перспективе могут быть использованы для прогноза состояния ледяного покрова с заблаговременностью месяц и более, что классифицируется в Наставлении [13] как долгосрочный прогноз.

Таким образом, цель данной работы состоит в оценке основных гидрометеорологических факторов, определяющих межгодовую изменчивость возрастного состава ледяного покрова отдельных районов Баренцева моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе в качестве предиктантов были использованы значения площади льдов различных возрастных градаций Баренцева моря (в 10^3 км²), а также его ледовитости (в %) за зимний сезон, продолжающийся с октября по май. Они были получены в период с 1997 по 2023 г. по региональным ледовым картам ААНИИ, доступ к которым осуществляется через электронный каталог Мирового центра данных по морскому льду (МЦД МЛ ААНИИ) [14]. Ограниченность сезона исследования только зимними месяцами связана с особенностями дешифрирования спутниковых снимков, по которым составляются ледовые карты. Полное описание методики составления ледовых карт ААНИИ представлено в работе [15].

Всего в Баренцевом море традиционно выделяют три однородных ледово-гидрологических района: западный, северо-восточный и юго-восточный (их границы приведены на рис. 1) [10]. В работе по каждому из районов моря анализируются межгодовые изменения площади ледяного покрова различных возрастных градаций путем подбора статистически значимых и физически обоснованных параметров, их определяющих. Ледовитость же используется в качестве вспомогательного элемента для анализа ледового режима акватории. Ее наиболее часто применяют для описания

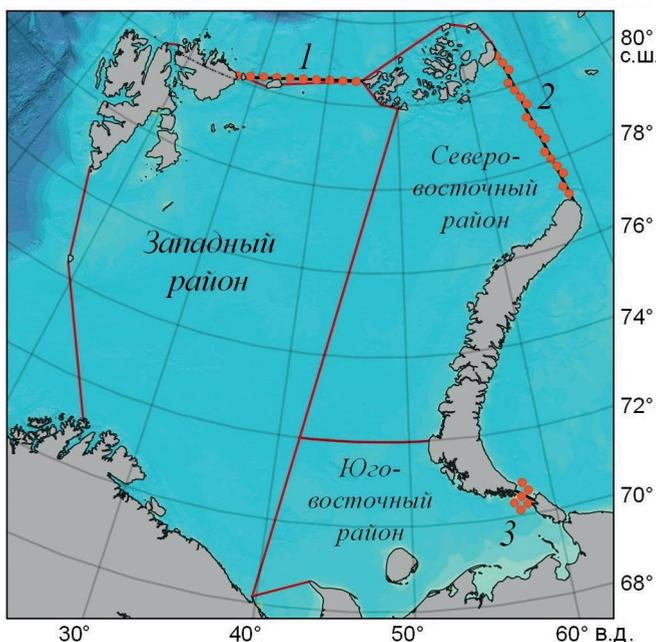


Рис. 1. Положение створов (черные линии) в Баренцевом море, через которые определялся леодообмен. Цифрами у соответствующих створов обозначены: 1 — пролив Шиллинга, 2 — пролив Макарова, 3 — пролив Карские Ворота. Оранжевыми точками показаны векторы дрейфа, использованные для расчета среднего вектора скорости дрейфа ледяного покрова. Границы однородных ледовых районов моря отмечены красной линией

Fig. 1. The position of the sites in the Barents Sea (marked with black lines), along which the ice export was determined. The sites are enumerated by: 1 — Shilling Strait, 2 — Makarov Strait, 3 — The Kara Gate. The drift vectors used for calculation of the average vector of ice drift are shown in orange dots. The boundaries of homogeneous sub-areas of the Barents Sea are distinguished with a red line

ледовых условий Баренцева моря, и при определении набора потенциальных предикторов мы опирались на исследования, где именно ледовитость и ее межгодовые колебания являлись объектами изучения; подробный обзор таких исследований представлен в [16]. Напомним, что ледовитость представляет собой *процент площади, занятой льдом любой сплоченности, по отношению к общей площади района моря* [17].

В результате был сформирован набор гидрометеорологических и ледовых параметров, потенциально определяющий изменения возрастного состава льдов Баренцева моря. К ним относятся климатические индексы Арктического колебания (англ. *Arctic Oscillation*, AO), Арктического диполя (англ. *Arctic Dipole*, AD), Тихоокеанско-Североамериканского колебания (англ. *Pacific-North American Oscillation*, PNA), Северо-Атлантического колебания (англ. *North Atlantic Oscillation*, NAO) и Атлантического мультideкадного колебания (англ. *Atlantic Multidecadal Oscillation*, AMO), а также приповерхностная температура воздуха (ПТВ, в °C), предыстория ледовитости (в %) и ледообмен Баренцева моря с окружающими акваториями (в 10^3 км² за месяц).

Индексы AO, AD и PNA представляют собой первые три моды разложения по естественным ортогональным функциям поля давления. Индекс AO рассчитывается как первая мода поля давления на уровне 1000 гПа от 20° с. ш. до Северного полюса. Также называется кольцевой модой Северного полушария, показывает распространение зоны повышенного/пониженного давления над Арктикой, что способствует усилению/ослаблению зонального переноса воздушных масс [18, 19]. Вторая мода (разложение полей давления на высоте 700 гПа от 70° с. ш. до Северного полюса) — это индекс AD, который определяет меридиональный перенос [20, 21]. Данные по AD были любезно предоставлены М. Janout, сотрудником Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Германия (*Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung*, AWI). Третья мода (разложение полей давления на высоте 500 гПа от 20° с. ш. до Северного полюса), или индекс PNA, характеризует направление движения воздушных масс над Западной Европой, Северной Америкой и центральной частью Тихого океана [22]. Индекс NAO, являющийся региональной модой Арктического колебания, представляет собой аномалии давления между двумя центрами действия атмосферы, Исландским минимумом и Азорским максимумом, и отражает зональный перенос воздушных масс [23, 24]. Для учета влияния поступающих на акваторию Баренцева моря теплых водных масс Северо-Атлантического течения, проходящих в виде нескольких веток Нордкапского течения, части системы Гольфстрима, использован индекс AMO. Он отражает аномалии поверхностной температуры воды в северной части Атлантического океана [9]. Среднемесячные величины перечисленных индексов атмосферной циркуляции, а также индекса AMO за период с 1997 по 2023 г. были взяты с сайта Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) [25].

Данные по ПТВ представляют собой среднемесячные значения в узлах сетки дискретностью $2^\circ \times 2^\circ$, осредненные в пределах границ каждого района Баренцева моря, а также в целом над его акваторией, за аналогичный период. Доступ к ним осуществляется через сайт Колумбийского университета (Columbia University) [26]. Предыстория ледовитости описывает *предшествующее состояние ледяного покрова* (в нашем случае в уравнениях заблаговременность ледовитости составляла как минимум месяц) и показывает инерционность ледовых процессов [14].

Путем построения физико-статистических уравнений (моделей множественной регрессии) была определена зависимость площади ледяного покрова различных воз-

растных градаций, а также ледовитости Баренцева моря от ряда гидрометеорологических и ледовых факторов [27]. Для получения уравнений использовался пакет статистического анализа «Статистика» версии 12. Качество воспроизведения ими фактических характеристик ледового режима моря было оценено при помощи коэффициентов корреляции R и детерминации R^2 . Эффективность уравнений, определяющая потенциал данного метода долгосрочного прогноза, показана путем расчета обеспеченности P (в %) и эффективности Эф (в %) в соответствии с Наставлением [13].

Метод расчета ледообмена Баренцева моря с соседними бассейнами

Ледообмен Баренцева моря с окружающими акваториями (Арктическим бассейном и Карским морем), согласно последним оценкам [10, 28–29], незначителен по сравнению с площадью/объемом ледяного покрова всего моря, однако он играет существенную роль для его отдельных районов, определяя их ледовые условия.

За период с 1997 по 2023 г. были рассчитаны среднемесячные величины ледообмена на трех основных створах поступления/выноса льдов в Баренцевом море: проливы Шиллинга (между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа), Макарова (между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля) и Карские Ворота. Их расположение отмечено на рис. 1. В работе принято, что величина ледообмена на створе (в 10^3 км² за месяц) зависит от средней скорости дрейфа ледяного покрова (в 10^3 км за месяц) и ширины ледового потока (в 10^3 км) с учетом преобладающей в ледовом потоке сплоченности морского льда [29].

Величина и направление суммарного среднемесячного вектора скорости дрейфа ледяного покрова на створах Баренцева моря были вычислены с использованием баз данных Polar Pathfinder (версия 4, данные доступны с 1979 по 2019 г., [30]) и Quicklook Arctic (версия 1, данные доступны с 2020 по 2023 г., [31]) Национального центра данных по снегу и льду (National Snow and Ice Data Center, NSIDC). Они включают информацию о горизонтальной компоненте вектора скорости дрейфа, проецируемой на сеточную область с разрешением 25 км × 25 км [32].

Для вычисления среднего вектора скорости дрейфа льдов были выбраны те точки в узлах сетки, которые расположены ближе всего к расчетным створам (см. рис. 1).

По региональным ледовым картам ААНИИ были получены среднемесячные значения ширины ледового потока на створах Баренцева моря [14]. Для работы с картами был задействован инструментарий геоинформационной системы QGIS версии 3.14. Поскольку в течение ледового сезона ледовый поток всегда имеет неоднородный характер по сплоченности, его ширина была пересчитана с учетом реально наблюдавшихся величин сплоченности морского льда от 1 до 10 баллов (где 1 баллу соответствует 10 % площади, занятой льдом, а 10 баллам — соответственно 100 % площади).

ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ СВЯЗИ ПЛОЩАДИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА РАЗЛИЧНЫХ ВОЗРАСТНЫХ ГРАДАЦИЙ С ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ И ЛЕДОВЫМИ ФАКТОРАМИ

Построение физико-статистических уравнений осуществлялось методом мультирегрессионного анализа путем перебора потенциально значимых предикторов до получения уравнений с наибольшими коэффициентами корреляции R и детерминации R^2 . Временной ряд был разделен на зависимую (ледовые сезоны с 1997/98 г. по 2021/22 г.) и независимую (ледовый сезон 2022/23 г.) выборки. В результате для зависимой выборки для апреля были получены уравнения множественной регрессии. При составлении уравнений градации начальных видов льдов, ниласовых льдов, а также серых и серо-белых льдов были объединены в общую градацию молодых льдов.

Показателем информативности, который мы использовали для анализа полученных результатов, является вклад каждого из вошедших в уравнение предикторов в общую дисперсию предиктанта, принимаемую за 100 %. Он показывает степень влияния значимых гидрометеорологических и ледовых параметров на изменения площади льдов различных возрастных градаций и выражается в %. Аналогичный статистический подход к описанию факторов, формирующих изменения ледовитости арктических морей, уже применялся в исследованиях [16, 33].

Следует обратить внимание, что в статье не представлена возрастная градация старых льдов. Это связано с тем, что с начала XXI в. в западном и северо-восточном районах моря они отмечаются значительно реже, занимая не более 8 % от общей площади ледяного покрова отдельных районов Баренцева моря [12]. В период максимального нарастания ледяного покрова в апреле старые льды наблюдались в последний раз в 2019 г. В юго-восточной части Баренцева моря при средних условиях старые льды не представлены вовсе.

В зависимости от периода формирования ледяного покрова, на акватории моря наблюдается разное количество льдов отдельных возрастных градаций. Подробный анализ особенностей возрастной структуры ледяного покрова Баренцева моря выполнен в работе [12]. В табл. 1 приведены среднемноголетние значения площади льдов разного возраста для трех районов моря. Для демонстрации формирующих межгодовые изменения исследуемых параметров факторов в работе приводятся уравнения для периода максимального развития ледяного покрова в апреле.

Таблица 1

Среднемноголетние (1997–2022 гг.) значения площади льдов различных возрастных градаций (в 10^3 км²) для трех районов Баренцева моря

Table 1

The long-term annual average (for the period from 1997 to 2022) values of ice area of various age categories (expressed as a 10^3 km²) for three sub-areas of the Barents Sea

Месяц	Начальные виды льдов (до 10 см)	Молодые льды		Однолетние льды			Старые льды (более 250 см)
		Серые (10–15 см)	Серо-белые (15–30 см)	Тонкие (30–70 см)	Средние (70–120 см)	Толстые (более 120 см)	
Западный район Баренцева моря							
Октябрь	8,2	7,9	8,9	0,0	0,0	0,0	5,9
Ноябрь	13,1	25,6	42,3	17,0	0,0	0,0	3,6
Декабрь	20,8	39,7	65,0	38,3	3,4	0,0	3,2
Январь	20,3	34,2	87,7	54,3	16,7	0,0	2,7
Февраль	17,5	31,3	91,7	58,3	35,6	0,0	2,3
Март	13,3	21,5	99,7	64,3	58,1	2,1	2,9
Апрель	10,0	9,8	81,4	71,9	72,9	11,9	3,3
Май	5,2	3,4	44,4	56,5	83,1	14,5	3,2
Северо-восточный район Баренцева моря							
Октябрь	8,4	13,2	14,6	0,0	0,0	0,0	6,5
Ноябрь	14,4	26,6	45,6	20,5	0,0	0,0	3,8
Декабрь	15,8	27,1	61,1	35,9	5,3	0,0	3,3
Январь	15,8	25,7	62,3	43,5	21,0	0,0	2,5
Февраль	15,6	26,1	66,7	37,0	37,0	1,1	1,3
Март	14,0	21,2	72,8	39,7	47,7	4,2	1,5
Апрель	10,8	13,6	74,4	42,7	58,4	18,7	1,1
Май	3,7	3,7	37,6	31,8	63,6	27,7	0,7

Окончание таблицы 1

End of the table 1

Месяц	Начальные виды льдов (до 10 см)	Молодые льды		Однолетние льды			Старые льды (более 250 см)
		Серые (10–15 см)	Серо-белые (15–30 см)	Тонкие (30–70 см)	Средние (70–120 см)	Толстые (более 120 см)	
Юго-восточный район Баренцева моря							
Октябрь	0,8	0,7	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Ноябрь	9,4	10,9	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Декабрь	12,0	13,8	15,9	2,3	0,0	0,0	0,0
Январь	8,9	18,6	44,7	13,3	0,0	0,0	0,0
Февраль	9,2	16,6	62,0	28,2	4,2	0,0	0,0
Март	10,0	10,5	58,3	36,2	10,7	0,0	0,0
Апрель	7,9	6,7	38,4	30,4	18,4	0,0	0,0
Май	1,8	1,1	11,2	16,1	17,1	0,0	0,0

В апреле, что соответствует периоду максимального развития ледяного покрова в Баренцевом море, его распределение по возрастному составу характеризуется следующим образом. В западном и северо-восточном районах отмечаются льды всех рассматриваемых возрастных градаций, от начальных видов и ниласовых льдов до однолетних толстых. При средних условиях однолетние толстые морские льды в юго-восточном районе не образуются. В апреле отмечаются большие межгодовые изменения всех рассматриваемых возрастных градаций. Так, за период с 1997 по 2023 г. величины среднеквадратического отклонения (СКО) для рядов площади молодых льдов составляют $31 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ в западном, $36 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ — в северо-восточном и $30 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ — в юго-восточном районе. Количество однолетних тонких льдов изменяется с СКО $25 \cdot 10^3 \text{ км}^2$, $17 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ и $20 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ для западной, северо-восточной и юго-восточной части Баренцева моря соответственно. Колебания площади однолетних средних льдов характеризуются величинами СКО: $30 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ (западный район), $27 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ (северо-восточный район) и $20 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ (юго-восточный район), а однолетних толстых — $30 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ для каждого из северных районов моря. Площадь молодых и однолетних тонких льдов в западном районе Баренцева моря имеет тенденцию к увеличению, в то время как площадь ледяного покрова остальных возрастных градаций сокращается; в других частях моря количество льдов разного возраста за весь рассматриваемый период уменьшается. Кроме того, после ледового сезона 2003/04 г. однолетние толстые льды в западной части Баренцева моря стали отмечаться гораздо реже, чем в северо-восточной. Физико-статистические уравнения, описывающие изменения площади льдов различных возрастных градаций и ледовитости в апреле, представлены в табл. 2.

Влияние *адвекции атлантических вод*, которое моделируется индексом АМО, на 96 % обуславливает межгодовые изменения площади молодых льдов в западном районе Баренцева моря (уравнение 1 табл. 2). Атмосферная циркуляция, выраженная индексом АД, и площадь молодых льдов в предшествующий месяц описывают остальные 3 % и 1 % дисперсии предиктанта соответственно. Для двух других районов моря определяющим механизмом в изменениях количества молодых льдов являются протекающие *атмосферные процессы* (уравнения 6 и 11 табл. 2): в северо-восточной части индексы АД и NAO определяют их площадь на 41 % и 27 % соответственно (всего 68 %), а в юго-восточной — на 83 % и 14 % соответственно

**Уравнения множественной регрессии для расчета площади льдов
разных возрастных градаций (в 10^3 км²) и ледовитости (в %)
в отдельных районах Баренцева моря в апреле**

Table 2

**Multiple regression equations for calculating the area of ice
of different age categories (expressed as a 10^3 km²) and ice cover (in percentage terms)
in the Barents Sea sub-areas in April**

Западный район Баренцева моря	
(1)	$\text{Пл(Мол)}_{3(IV)} = 0,53 \cdot \text{Пл(Мол)}_{3(III)} - 93,80 \cdot \text{АМО}_{IX(-1)} - 16,94 \cdot \text{AD}_I + 43,92$
(2)	$\text{Пл(Тонк)}_{3(IV)} = 0,45 \cdot \text{Пл(Тонк)}_{3(III)} + 10,69 \cdot \text{NAO}_{IV(-1)} + 42,42$
(3)	$\text{Пл(Ср)}_{3(IV)} = 0,54 \cdot \text{Обм}_{\text{ШиллXII}(-1)} - 219,91 \cdot \text{АМО}_{VI(-1)} - 12,95 \cdot \text{NAO}_{VI(-1)} - 40,81 \cdot \text{AO}_{IV(-1)} - 32,59 \cdot \text{AD}_{VIII(-1)} + 115,37$
(4)	$\text{Пл(Тол)}_{3(IV)} = -2,80 \cdot \text{ПТВ}_{3(III)} - 8,28 \cdot \text{NAO}_{VI(-1)} + 32,94 \cdot \text{AD}_{VIII(-1)} - 16,03$
(5)	$\text{Л}_{3(IV)} = 0,08 \cdot \text{Обм}_{\text{ШиллXII}(-1)} - 3,21 \cdot \text{ПТВ}_{\text{БарIV}(-1)} + 3,52 \cdot \text{AO}_{III(-1)} + 3,47 \cdot \text{AD}_{III(-1)} + 2,62 \cdot \text{PNA}_{IX(-1)} + 17,95$
Северо-восточный район Баренцева моря	
(6)	$\text{Пл(Мол)}_{\text{CB(IV)}} = 0,77 \cdot \text{Пл(Мол)}_{\text{CB(III)}} - 1,23 \cdot \text{Обм}_{\text{ШиллVIII}(-1)} - 8,75 \cdot \text{ПТВ}_{VI(-1)} - 8,52 \cdot \text{NAO}_{IV(-1)} - 10,33 \cdot \text{AD}_{III} + 10,70$
(7)	$\text{Пл(Тонк)}_{\text{CB(IV)}} = -2,76 \cdot \text{ПТВ}_{\text{БарII}(-1)} + 10,56 \cdot \text{NAO}_{IV(-1)} + 16,24 \cdot \text{AO}_{VIII(-1)} + 11,37 \cdot \text{AD}_{IV(-1)} + 18,76$
(8)	$\text{Пл(Ср)}_{\text{CB(IV)}} = -0,61 \cdot \text{Обм}_{\text{ШиллXI}(-1)} - 4,45 \cdot \text{ПТВ}_{\text{CB(IV)}(-1)} - 22,02 \cdot \text{AO}_{IV(-1)} + 35,38$
(9)	$\text{Пл(Тол)}_{\text{CB(IV)}} = 0,73 \cdot \text{Обм}_{\text{МакXI}(-1)} - 17,33 \cdot \text{NAO}_{XI(-1)} + 9,42 \cdot \text{AO}_{II(-1)} + 7,62 \cdot \text{AD}_{XII(-1)} + 15,69$
(10)	$\text{Л}_{\text{CB(IV)}} = 0,78 \cdot \text{Л}_{\text{CB(III)}} + 0,13 \cdot \text{Обм}_{\text{МакXI}(-1)} - 13,39 \cdot \text{АМО}_{III(-2)} - 2,73 \cdot \text{AO}_{II} + 3,08 \cdot \text{AD}_{III(-1)} + 4,24 \cdot \text{PNA}_{XI(-1)} + 17,13$
Юго-восточный район Баренцева моря	
(11)	$\text{Пл(Мол)}_{\text{ЮВ(IV)}} = 0,94 \cdot \text{Пл(Мол)}_{\text{ЮВ(III)}} - 4,30 \cdot \text{ПТВ}_{\text{БарIV}(-1)} - 10,06 \cdot \text{NAO}_{X(-1)} + 24,69 \cdot \text{AD}_{X(-1)} - 52,75$
(12)	$\text{Пл(Тонк)}_{\text{ЮВ(IV)}} = 0,57 \cdot \text{Пл(Тонк)}_{\text{ЮВ(III)}} + 5,03 \cdot \text{Л}_{\text{ЮВ(IX)}(-1)} + 3,32 \cdot \text{AD}_{II} + 8,98$
(13)	$\text{Пл(Ср)}_{\text{ЮВ(IV)}} = 1,55 \cdot \text{ПТВ}_{\text{ЮВ(II)}} - 59,97 \cdot \text{АМО}_{I(-1)} - 6,94 \cdot \text{AO}_{III} - 10,00 \cdot \text{AD}_{IV(-1)} + 14,71$
(14)	$\text{Л}_{\text{ЮВ(IV)}} = 0,44 \cdot \text{Л}_{\text{ЮВ(III)}} - 1,65 \cdot \text{ПТВ}_{\text{ЮВ(II)}} - 43,34 \cdot \text{АМО}_{III(-2)} - 9,82 \cdot \text{NAO}_{III} - 4,07 \cdot \text{AO}_{II} - 6,95 \cdot \text{AD}_{III} + 10,81$

Примечание. В уравнениях: Пл(Мол) — площадь молодых льдов, Пл(Тонк) — площадь однолетних тонких льдов, Пл(Ср) — площадь однолетних средних льдов, Пл(Тол) — площадь однолетних толстых льдов, Л — ледовитость отдельных районов Баренцева моря (нижние индексы «З», «СВ» и «ЮВ» обозначают западный, северо-восточный и юго-восточный районы соответственно); Обм_{КБ} — ледообмен Баренцева моря с Карским морем через пролив Карские Ворота, Обм_{Шилл} — с Арктическим бассейном СЛО через пролив Шиллинга, Обм_{Мак} — через пролив Макарова. Нижние индексы, обозначенные римскими цифрами, указывают на месяцы, за которые были взяты предикторы, а арабскими — на их заблаговременность относительно предиктантов в годах.

Note. In the equations: Пл(Мол) is the area of young ice, Пл(Тонк) is the area of annual thin ice, Пл(Ср) is the area of annual medium ice, Пл(Тол) is the area of annual thick ice, Л is the ice cover of certain areas of the Barents Sea (lower indices “З”, “СВ” and “ЮВ” denote the western, north-eastern and south-eastern regions, respectively); Обм_{КБ} — ice exchange of the Barents Sea through the Kara Sea through the Kara Gate Strait, Обм_{Шилл} — with the Arctic basin of the SLO through the Shilling Strait, Обм_{Мак} — through the Makarov Strait. The subscripts, indicated by Roman numerals, indicate the months for which the predictors were taken, and Arabic ones indicate their advance time relative to the predictors in years.

(всего 97 %). Кроме того, в северо-восточном районе остальные 32 % дисперсии предиктанта описываются ПТВ над его акваторией (30 %), площадью молодых льдов в предшествующий месяц (1 %) и ледообменом через пролив Шиллинга (1 %). Изменчивость площади молодых льдов в юго-восточном районе Баренцева моря также определяется 2 % дисперсией ПТВ и на 1 % дисперсией предыстории площади ледяного покрова этой же возрастной градации.

Межгодовые изменения количества однолетних тонких льдов северных районов Баренцева моря в апреле зависят от характера *атмосферной циркуляции*. В западной его части 99 % дисперсии предиктанта определяется индексом NAO, 1 % — предысторией площади однолетних тонких льдов (уравнение 2 табл. 2). Совместное влияние индексов AO, AD и NAO на 51 %, 25 % и 22 % соответственно (всего 98 %), а также ПТВ над акваторией Баренцева моря на 2 % обуславливают колебания их площади в северо-восточном районе (уравнение 7 табл. 2). Интересно, что в юго-восточной части определяющим изменения площади однолетних тонких льдов является фактор *предшествующего состояния ледяного покрова* Баренцева моря, что не характерно для ведущего параметра в изменении его возрастной структуры (уравнение 12 табл. 2). Скорее всего, это связано с относительно большей инерционностью изменения площади морского льда в период его максимального развития. Выраженный значением ледовитости в начале ледообразования, вклад данного параметра составляет 69 %. Атмосферная циркуляция, моделируемая индексом AD, описывает 30 % изменений количества однолетних тонких льдов, а предыстория их площади — оставшийся 1 %.

Поступление теплых атлантических вод в западный и юго-восточный районы Баренцева моря определяет площадь однолетних средних льдов на их акваториях на 93 % и 96 % соответственно (уравнения 3 и 13 табл. 2). Влияние атмосферных процессов на 5 % (AO, AD и NAO на 3 %, 2 % и 1 % соответственно), а также ледообмена через пролив Шиллинга на 1 % также описывает их межгодовые изменения в западной части. Кроме того, в юго-восточном районе моря 2 % и 1 % дисперсии предиктанта характеризуют индексы AD и AO соответственно, а 1 % — ПТВ над его акваторией. Изменения площади однолетних средних льдов в северо-восточном районе Баренцева моря на 95 % зависят от характера *атмосферных процессов*, которые в данном случае выражены колебаниями климатического индекса AO (уравнение 8 табл. 2). Предикторы температуры воздуха над акваторией северного района, а также ледообмена моря через пролив Шиллинга вносят 4 % и 1 % вклада соответственно.

Межгодовые изменения площади однолетних толстых льдов в северных районах Баренцева моря (уравнения 4 и 9 табл. 2 для западного и северо-восточного районов соответственно) зависят от *атмосферной циркуляции*. В западной части моря их колебания на 93 % и 6 % соответственно (всего 99 %) описывают индексы AD и NAO, а в северо-восточной — индексы NAO, AO и AD на 67 %, 19 % и 13 % соответственно (всего 99 %). По 1 % дисперсии предиктантов приходится на ПТВ над акваторией района (западная часть), а также на ледообмен Баренцева моря через пролив Макарова (северо-восточная часть).

Отметим, что, несмотря на столь малый вклад некоторых факторов в межгодовые изменения площади ледяного покрова отдельных возрастных градаций (например, предшествующее состояние ледяного покрова), при принудительном удалении этих предикторов физико-статистические уравнения «разваливаются» либо качество уравнений существенно понижается за счет уменьшения коэффициентов корреляции и детерминации. Эта закономерность справедлива для всех полученных уравнений, которые описывают возрастную структуру ледяного покрова Баренцева моря. Однако потенциальные предикторы были предварительно проверены на мультиколлинеарность, что отражает их статистическую независимость друг от друга. Кроме того, использование в уравнениях

(3), (7), (9) и (14) таких коллинеарных факторов, как климатические индексы АО и NAO (последний является региональной модой АО), объясняется следующим образом. При расчете коэффициентов корреляции между данными индексами за отдельные месяцы было получено, что их значения не превышают пороговых 0,70, а в большинстве случаев и вовсе не являются значимыми, составляя менее 0,21.

Межгодовые изменения площади ледяного покрова отдельных возрастных градаций в апреле при таком определяющем их факторе, как характер атмосферной циркуляции, можно объяснить следующим образом. В западном районе Баренцева моря площадь однолетних тонких льдов увеличивается под воздействием положительной фазы NAO в апреле. Ее длительное сохранение приводит к ослаблению меридиональной циркуляции и уменьшает перенос тепла из Северной Атлантики в арктический регион, что изменяет распределение температуры поверхности океана, способствуя образованию льдов в апреле и увеличивая ледовитость Баренцева моря [24]. В этой же части моря изменения количества однолетних толстых льдов характеризуются господством в августе положительной фазы AD (вклад данного индекса составляет более 90 %). Так, в положительной фазе AD характеризуется пониженным давлением над Евразией (в районе морей Карского и Лаптевых) и повышенным давлением — над арктическим регионом Северной Америки (Канадским Арктическим архипелагом). Такая барическая обстановка способствует усилению движения южных воздушных масс в Баренцево море, что приводит к усилению таяния ледяного покрова и, соответственно, может уменьшать как общую ледовитость, так и площади однолетнего толстого ледяного покрова [34]. В северо-восточной части Баренцева моря совместное действие отрицательной фазы AD в марте и положительной фазы NAO в апреле определяет изменения площади молодых льдов на ее акватории. Продолжительное влияние отрицательной фазы AD, воздействующей преимущественно на молодой ледяной покров, соответствует положительным аномалиям нисходящей длинноволновой радиации к северу от западной части Европы, что препятствует процессу нарастания льдов на всей акватории Баренцева моря в апреле [35]. Совместное действие отрицательной фазы АО в августе и положительных фаз AD и NAO в апреле приводит к изменению площади однолетних тонких льдов, а влияние положительной фазы АО — к изменению количества однолетних средних льдов в северо-восточном районе. В случае длительного сохранения отрицательной фазы АО усиливается широтный перенос холодных воздушных масс в направлении от Северного полюса, что приводит к более интенсивному ледообразованию и к увеличению ледовитости. Влияние положительной фазы АО, наоборот, препятствует проникновению холодных воздушных масс в направлении от Северного полюса на акваторию моря, что замедляет процесс ледообразования и сокращает общую площадь ледяного покрова в апреле. На количество однолетних толстых льдов в северо-восточной части Баренцева моря в большей степени оказывают влияние положительные фазы NAO в ноябре и АО в феврале, а также отрицательная фаза AD в декабре. В юго-восточном районе изменения площади молодых льдов моря характеризуются как отрицательной фазой NAO в октябре, так и положительной фазой AD в мае.

Величины ледообмена Баренцева моря через створы проливов Шиллинга и Макарова в ноябре предыдущего года являются одними из значимых предикторов, определяющих колебания площади однолетних средних и толстых льдов в его северо-восточном районе в апреле (уравнения 8 и 9 табл. 2 соответственно). В со-

ответствии со среднегодовыми оценками [29] через пролив Макарова на акваторию моря приносятся морские льды соседних акваторий, а через пролив Шиллинга — наоборот, льды выносятся за пределы моря. В ноябре знаки расхода ледяного покрова соответствуют среднегодовому направлению на обоих створах, поэтому ледообмен через пролив Шиллинга препятствует увеличению количества однолетних средних льдов в апреле за счет интенсивного выноса ледяного покрова. Увеличение площади однолетних толстых льдов в северо-восточном районе Баренцева моря в апреле происходит вследствие их приноса через пролив Макарова из Арктического бассейна несколькими месяцами ранее.

Обратимся к определяющим факторам и вкладам отдельных предикторов в изменения ледовитости Баренцева моря в апреле. В западной части моря *приповерхностная температура воздуха* на 83 % обуславливает межгодовые колебания ледовитости (уравнение 5 табл. 2). Помимо этого, атмосферная циркуляция, моделируемая климатическими индексами АО (9 %), АД (5 %) и РНА (2 %), в целом характеризует 16 % дисперсии предиктанта, а ледообмен Баренцева моря через пролив Шиллинга — оставшийся 1 % дисперсии. Ледовитость северо-восточного района Баренцева моря на 66 % зависит от *ее предыстории* (уравнение 10 табл. 2). Влияние атмосферных процессов на 28 % определяется индексами РНА (11 %), АД (10 %) и АО (7 %), адвекции теплых атлантических вод на 2 % — индексом АМО. Ледообмен акватории Баренцева моря через пролив Макарова на 4 % влияет на ледовитость северного района. В юго-восточном районе Баренцева моря характер *атмосферной циркуляции* определяет изменения ледовитости на 47 % (уравнение 14 табл. 2). Кроме того, на долю ПТВ над его акваторией приходится 29 % дисперсии, предыстории ледовитости и индекса АМО — по 12 % каждый.

Таким образом, межгодовые изменения возрастной структуры ледяного покрова в отдельных районах Баренцева моря в большинстве случаев обуславливаются изменениями, происходящими в атмосфере, что выражается климатическими индексами. В меньшей степени они зависят от поступающих на акваторию моря теплых вод атлантического происхождения и от распределения приповерхностной температуры воздуха. Только в одном случае предшествующее состояние ледовитости оказалось наиболее значимым фактором.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Согласно Наставлению [13], основными критериями качества метода долгосрочного прогноза при установленной допустимой ошибке стандартного отклонения $0,8\sigma$ являются значения *обеспеченности* метода Р (в %) и его сравнение с климатическим прогнозом, т.е. *эффективности* Эф (в %). За климатическую норму в настоящей работе принято среднее значение предиктанта за период с 1997 по 2022 г. (без учета независимой выборки). Значения этих параметров качества для полученных моделей с наибольшими коэффициентами корреляции и детерминации сведены в табл. 3.

Использование метода долгосрочного прогноза является целесообразным, если его эффективность составляет не менее 10 %, т. е. обеспеченность допустимой ошибки $0,8\sigma$ не менее чем на 10 % превышает обеспеченность допустимой ошибки отклонения от климатической нормы [13]. Таким образом, большинство предлагаемых моделей, описывающих межгодовые изменения площади льдов различных возрастных градаций, потенциально применимы на практике. Эффективность методов

Таблица 3

Обеспеченность (R, в %) и эффективность (Эф, в %) полученных методов прогноза площади льдов различного возраста и ледовитости в отдельных районах Баренцева моря, а также их коэффициенты корреляции (R) и детерминации (R²) в апреле

Table 3

Reliability (R, %) and efficiency (Эф, %) of the forecasting method obtained for the area of ice of different age categories and ice cover in the Barents Sea sub-areas, as well as their correlation (R) and determination (R²) coefficients in April

Номер уравнения в табл. 2	Молодые льды			Однолетние тонкие льды			Однолетние средние льды			Однолетние толстые льды			Ледовитость		
	3	СВ	ЮВ	3	СВ	ЮВ	3	СВ	ЮВ	3	СВ	ЮВ	3	СВ	ЮВ
	(1)	(6)	(11)	(2)	(7)	(12)	(3)	(8)	(13)	(4)	(9)	(5)	(10)	(14)	
R	0,66	0,94	0,91	0,67	0,89	0,88	0,83	0,70	0,85	0,83	0,84	0,90	0,84	0,82	0,82
R ²	0,44	0,89	0,83	0,45	0,79	0,78	0,68	0,48	0,73	0,69	0,70	0,82	0,71	0,67	0,67
P, %	70	98	93	71	90	90	80	72	89	81	81	47	33	30	30
Эф, %	22	38	45	35	46	46	52	16	37	0	0	26	23	23	23

Примечание. Сокращение «З» соответствует западному району, «СВ» — северо-восточному району и «ЮВ» — юго-восточному району Баренцева моря.
Note. The abbreviation “З” corresponds to the western region, “СВ” — to the north-eastern region and “ЮВ” — to the south-eastern region of the Barents Sea.

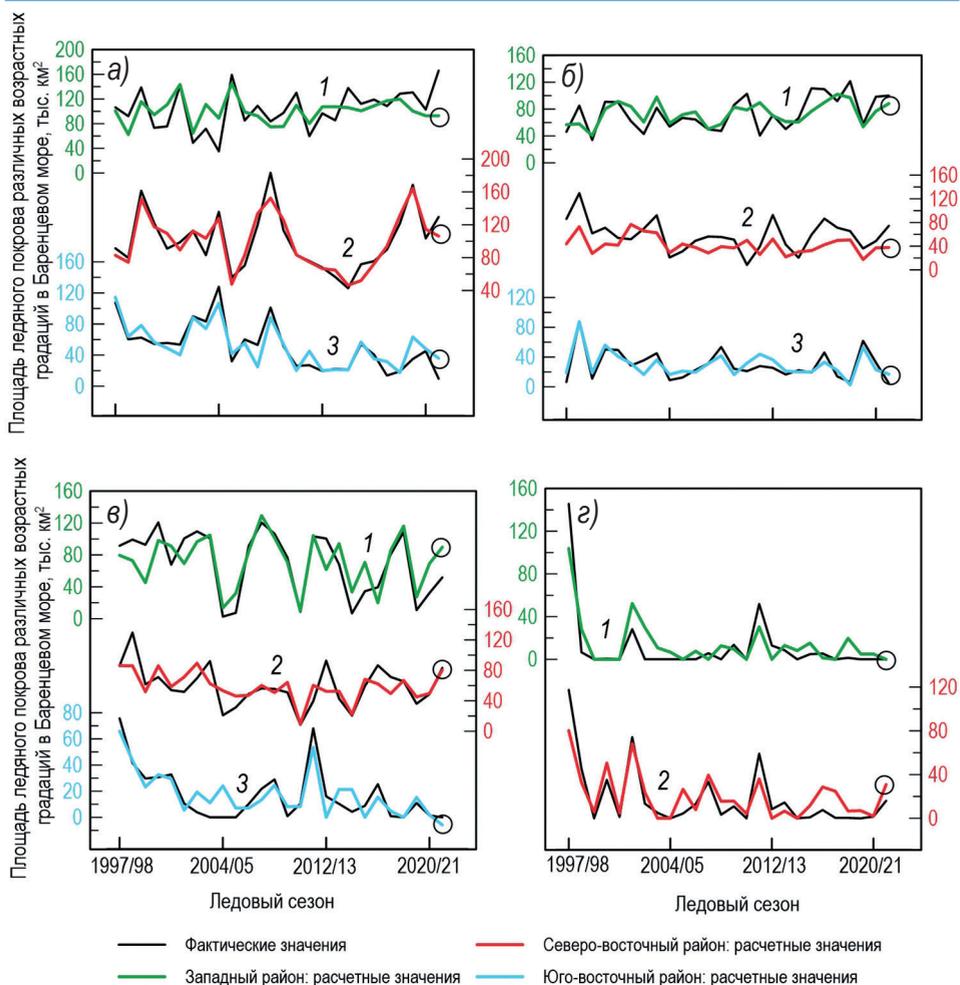


Рис. 2. Сопоставление фактических (показаны черной линией) и рассчитанных (цветные линии) значений площади а) молодых, б) однолетних тонких, в) однолетних средних и г) однолетних толстых льдов в (1) западном, (2) северо-восточном, (3) юго-восточном районах Баренцева моря в апреле за период с 1997 по 2023 г. Кружками отмечены те значения площади, которые были спрогнозированы на ледовый сезон 2022/23 г.

Fig. 2. Comparison between actual (black line) and calculated (colored lines) values of the area of а) young, б) first-year thin, в) first-year medium and г) first-year thick ice in (1) the western, (2) the north-eastern, (3) the south-eastern sub-areas of the Barents Sea in April for the 1997–2023 period. The predicted values of the area of ice of different ice categories for the 2022/2023 ice season are marked by the circlets

прогноза может быть равна нулю, несмотря на их высокую обеспеченность, если фактические значения площади ледяного покрова рассматриваемых возрастных градаций мало отличны от нуля. Дело в том, что физико-статистические уравнения не способны спрогнозировать полное отсутствие ледяного покрова того или иного возраста и расчетные значения всегда будут или больше, или меньше нуля. Кроме

того, если принять отрицательную прогностическую величину площади ледяного покрова определенной возрастной градации равной нулю, эффективность метода прогноза не улучшится или улучшится незначительно и все равно не будет достигать необходимых 10 %.

На рис. 2 приведены фактические и рассчитанные по уравнениям значения площади ледяного покрова разного возраста на акватории рассматриваемых районов Баренцева моря за период с 1997 по 2023 г. Ледовый сезон 2022/23 г. использовался в качестве независимой выборки, при этом прогностические отрицательные значения количества морского льда, если таковые встречались, были приняты равными нулю. Для демонстрации результатов в апреле на рисунке представлены все исследуемые возрастные градации.

Так, все полученные уравнения, имеющие коэффициенты корреляции от 0,66 до 0,94, удовлетворительно моделируют межгодовые изменения возрастной структуры ледяного покрова Баренцева моря. Относительно непростыми для описания изменчивости оказались молодые и однолетние тонкие льды, что может быть обусловлено их меньшей инерционностью в рамках одного ледового сезона. Более устойчивым является воспроизведение изменчивости ледяного покрова северо-восточного района Баренцева моря, уравнения для описания временных колебаний которого имеют наибольшие коэффициенты корреляции и детерминации: по-видимому, для западного района характерно сильное влияние адвекции атлантических вод, а для юго-восточного — более локальные факторы. Кроме того, для ледового сезона 2022/23 г. представленные на рис. 2 модели в большинстве случаев улавливают тенденцию к увеличению/уменьшению площади ледяного покрова различных возрастных градаций вплоть до совпадения порядка прогнозируемой величины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Характер атмосферной циркуляции является основным фактором, оказывающим влияние на межгодовые изменения возрастной структуры ледяного покрова Баренцева моря. Он выражается климатическими индексами Арктического колебания, Арктического диполя и Северо-Атлантического колебания.

2. Поступающие на акваторию Баренцева моря теплые воды атлантического происхождения моделируются индексом Атлантического мультидекадного колебания. Межгодовые изменения возрастного состава льда в меньшей степени зависят от поступающих на акваторию моря теплых вод атлантического происхождения. Отмечается, что ледяной покров западной части Баренцева моря более подвержен их влиянию, чем другие районы.

3. В апреле вклад относительно более локальных параметров, таких как предыстория ледовитости и распределение приповерхностной температуры воздуха, более выражен в межгодовых колебаниях ледовитости, а индексов атмосферной циркуляции — в изменениях площади ледяного покрова отдельных возрастных градаций Баренцева моря. Однако в юго-восточном районе Баренцева моря количество однолетних тонких льдов зависит от предшествующего состояния ледяного покрова, что не характерно для ведущего параметра в изменении его возрастной структуры. Вероятно, это связано с относительно большей инерционностью изменения площади морского льда в период его максимального развития.

4. Для всех представленных физико-статистических уравнений получены коэффициенты корреляции от 0,66 до 0,94. Большинство моделей потенциально при-

менимы на практике для прогнозирования площади льдов различных возрастных градаций, поскольку их эффективность составляет более 10 %.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-27-00443).

Competing interests. The authors have no conflicts of interest to declare.

Funding. The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 22-27-00443).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2019. 755 p.
2. Латонин М.М., Баимачников И.Л., Бобылев Л.П. Явление арктического усиления и его движущие механизмы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13. № 3. С. 3–19. doi: 10.7868/S2073667320030016.
3. Previdi M., Smith K.L., Polvani L.M. Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms // *Environmental Research Letters*. 2021. V. 16. 093003. doi: 10.1088/1748-9326/ac1c29.
4. Иванов В.В. Новые механизмы Полярного усиления, инициированные сокращением арктического морского льда // *Вестник РФФИ*. 2022. № 2 (114). С. 40–47. doi: 10.22204/2410-4639-2022-114-02-119-135.
5. Александров В.Ю., Йоханнесен О.М. Изменение толщины льда в Арктике с конца XIX века // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. № 4 (94). С. 63–73.
6. Onarheim I.H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea // *Geophysical Research Letters*. 2017. № 44. P. 8387–8395. doi: 10.1002/2017GL074304.
7. Stroeve J., Notz D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. № 10. 103001. doi: 10.1088/1748-9326/aade56.
8. Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss // *Journal of Climate*. 2018. V. 31. P. 4917–4932. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0427.1.
9. Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В., Смирнов А.В. Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла Атлантическими водами // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15. № 1. С. 82–97. doi: 10.48612/fpg/1krp-xbuk-6gpz.
10. Миронов Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ААНИИ, 2004. 319 с.
11. Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанникова А.В., Спичкин В.А. Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 348 с.
12. Егорова Е.С., Миронов Е.У. Возрастной состав ледяного покрова Баренцева моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022. Т. 68. № 3. С. 216–233. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-216-233.
13. Руководящий документ 52.27.759 — 2011, Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: Триада ЛТД, 2011. 194 с.
14. Arctic and Antarctic Research Institute World Data Center Sea-Ice. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/bar/> (дата обращения: 06.02.2023).
15. Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // *Российская Арктика*. 2019. № 7. С. 5–20. doi: 10.24411/2658-4255-2019-10071.

16. Лис Н.А., Чернявская Е.А., Миронов Е.У., Тимохов Л.А., Егорова Е.С. Информативность факторов, формирующих долгопериодные колебания ледовитости отдельных районов Баренцева моря // Российская Арктика. 2023. Т. 5 (2). С. 17–32. doi: 10.24412/2658-4255-2023-2-17-32.
17. Ледовые термины, расположенные в тематическом порядке. URL: <http://old.aari.ru/gdsidb/glossary/r1.htm> (дата обращения: 10.04.2023).
18. Thompson D.W.J., Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. No. 9. P. 1297–1300. doi: 10.1029/98GL00950.
19. Zhou S., Miller A.J., Wang J., Angell J.K. Trends of NAO and AO and their associations with stratospheric processes // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. No. 21. P. 4107–4110. doi: 10.1029/2001GL013660.
20. Wu B., Wang J., Walsh J.E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion // Journal of Climate. 2006. V. 19. No. 2. P. 210–225. doi: 10.1175/JCLI3619.1.
21. Janout M.A., Holemann J., Timokhov L., Gutjahr O., Heinemann G. Circulation in the northwest Laptev Sea in the eastern Arctic Ocean: Crossroads between Siberian River water, Atlantic water and polynya-formed dense water // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. No. 8. P. 6630–6647. doi: 10.1002/2017JC013159.
22. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Monthly Weather Review. 1987. V. 115. No. 6. P. 1083–1126. doi: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
23. Goldenberg S.B., Landsea C.W., Mestas-Nuñez A.M., Gray W.M. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications // Science. 2001. V. 293. No. 5529. P. 474–479. doi: 10.1126/science.1060040.
24. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада ЛТД, 2013. 144 с.
25. National Oceanic and Atmospheric Administration: Climate Monitoring. URL: <https://www.noaa.gov/climate-monitoring/#all> (дата обращения: 10.05.2023).
26. Библиотека климатических данных Колумбийского университета. URL: <http://iridl.ldeo.columbia.edu> (дата обращения: 10.05.2023).
27. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск: ПИНРО, 2003. 129 с.
28. Kwok R. Outflow of Arctic Ocean sea ice into the Greenland and Barents Seas // Journal of Climate. 2009. V. 22. No. 9. P. 2438–2457. doi: 10.1175/2008JCLI2819.1.
29. Егорова Е.С., Миронов Е.У., Ильющенко И.А. Сезонные и межгодовые изменения ле- дообмена Гренландского и Баренцева морей с соседними акваториями // Океанологические исследования: Материалы X конференции молодых ученых. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2023. С. 20–21.
30. National Snow and Ice Data Center Polar Pathfinder Daily EASE-Grid Sea Ice Motion Vectors, Version 4. URL: <https://nsidc.org/data/NSIDC-0116/versions/4> (дата обращения: 10.05.2023).
31. National Snow and Ice Data Center Quicklook Arctic Weekly EASE-Grid Sea Ice Motion Vectors, Version 1. URL: <https://nsidc.org/data/NSIDC-0748/versions/1> (дата обращения: 10.05.2023).
32. Tschudi M.A., Meier W.N., Stewart J.S. An enhancement to sea ice motion and age products at the National Snow and Ice Data Center (NSIDC) // The Cryosphere. 2020. V. 14. P. 1519–1536. doi: 10.5194/tc-14-1519-2020.
33. Вязигина Н.А., Тимохов Л.А., Егорова Е.С., Юлин А.В. Информативность гидрометеорологических и астрогеофизических факторов в задаче описания межгодовых колебаний ледовитости Гренландского моря // Лед и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 431–444. doi: 10.31857/S2076673421030099.

34. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из космоса. 2013. Т. 4. С. 50–65. doi: 10.7868/S0205961413040076.
35. Watanabe E., Wang J., Sumi A., Hasumi H. Arctic dipole anomaly and its contribution to sea ice export from the Arctic Ocean in the 20th century // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. No. 23. L23703. doi: 10.1029/2006GL028112.

REFERENCES

1. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2019: 755 p.
2. Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P. The Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2020, 13 (3): 3–19. [In Russian]. doi: 10.7868/S2073667320030016.
3. Previdi M., Smith K.L., Polvani L.M. Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms. *Environmental Research Letters*. 2021, 16: 093003. doi: 10.1088/1748-9326/ac1c29.
4. Ivanov V.V. New mechanisms of polar amplification triggered by the Arctic sea ice loss. *Vestnik RFFI*. RFBR Journal. 2022, 2 (114): 40–47. [In Russian]. doi: 10.22204/2410-4639-2022-114-02-119-135.
5. Alexandrov V.Yu., Johannessen O.M. Changes of ice thickness in the Arctic since the end of 19th century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2012, 4 (94): 63–73. [In Russian].
6. Onarheim I.H., Árthun M. Toward an ice-free Barents Sea. *Geophysical Research Letters*. 2017, 44: 8387–8395. doi: 10.1002/2017GL074304.
7. Stroeve J., Notz D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons. *Environmental Research Letters*. 2018, 13 (10): 103001. doi: 10.1088/1748-9326/aade56.
8. Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss. *Journal of Climate*. 2018, 31: 4917–4932. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0427.1.
9. Sumkina A.A., Kivva K.K., Ivanov V.V., Smirnov A.V. Seasonal ice removal in the Barents Sea and its dependence on heat advection by Atlantic waters. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022, 15 (1): 82–97. [In Russian]. doi: 10.48612/fpg/1krp-xbuk-6gpz.
10. Mironov Ye.U. *Ledovye uslovia v Grenlandskom i Barentsevom moriakh i ikh dolgosrochnyi prognoz*. Ice conditions in the Greenland and Barents Seas and its long-term forecast. St. Petersburg: AARI, 2004: 319 p. [In Russian].
11. Gudkovich Z.M., Kirillov A.A., Kovalev E.G., Smetannikova A.V., Spichkin V.A. *Osnovy metodiki dolgosrochnykh ledovykh prognozov dlia arkticheskikh morei*. Fundamentals of the methodology of long-term ice forecasts for the Arctic seas. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972: 348 p. [In Russian].
12. Egorova E.S., Mironov Ye.U. Ice age composition in the Barents Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (3): 216–233. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-216-233.
13. *Rukovodjashhij dokument 52.27.759–2011. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Ch. III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov*. Management directive 52.27.759– 2011, Forecast service manual, pt 3, chpt III. Maritime hydrological forecast service. Moscow: Triada LTD, 2011: 194 p. [In Russian].
14. AARI WDC Sea-Ice archive. Available at: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/bar/> (accessed 06.02.2023).
15. Afanasieva Ye.V., Alekseyeva T.A., Sokolova Yu.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov Yu.D., Devyatayev O.S. Methodology of ice chart compilation. *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2019, 7: 5–20. [In Russian]. doi: 10.24411/2658-4255-2019-10071.

16. Lis N.A., Cherniavskaia E.A., Mironov E.U., Timokhov L.A., Egorova E.S. Informativeness (information-bearing) of factors forming interannual variability of the Barents Sea and its individual areas ice ice coveren. *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2023, 5 (2): 17–32. [In Russian]. doi: 10.24412/2658-4255-2023-2-17-32.
17. Ice terms arranged in thematic order. Available at: <http://old.aari.ru/gdsidb/glossary/r1.htm> (accessed 10.04.2023).
18. Thompson D.W.J., Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*. 1998, 25 (9): 1297–1300. doi: 10.1029/98GL00950.
19. Zhou S., Miller A.J., Wang J., Angell J.K. Trends of NAO and AO and their associations with stratospheric processes. *Geophysical Research Letters*. 2001, 28 (21): 4107–4110. doi: 10.1029/2001GL013660.
20. Wu B., Wang J., Walsh J.E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion. *Journal of Climate*. 2006, 19 (2): 210–225. doi: 10.1175/JCLI3619.1.
21. Janout M.A., Holemann J., Timokhov L., Gutjahr O., Heinemann G. Circulation in the northwest Laptev Sea in the eastern Arctic Ocean: Crossroads between Siberian River water, Atlantic water and polynya-formed dense water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017, 122 (8): 6630–6647. doi: 10.1002/2017JC013159.
22. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*. 1987, 115 (6): 1083–1126. doi: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
23. Goldenberg S.B., Landsea C.W., Mestas-Nuñez A.M., Gray W.M. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*. 2001, 293 (5529): 474–479. doi: 10.1126/science.1060040.
24. Nesterov E.S. *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean*. North Atlantic oscillation: atmosphere and ocean. Moscow: Triada LTD, 2013: 144 p. [In Russian].
25. National Oceanic and Atmospheric Administration website. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/climate-monitoring/#all> (accessed 10.05.2023).
26. Columbia University Climate Data Library. Available at: <http://iridl.ldeo.columbia.edu> (accessed 10.05.2023).
27. Malinin V.N., Gordeeva S.M. *Fiziko-statisticheskij metod prognoza okeanologicheskikh kharakteristik (na primere Severo-Evropejskogo bassejna)*. Physical and statistical method for forecasting oceanological characteristics (on the example of the North European Basin). Murmansk: PINRO, 2003: 129 p. [In Russian].
28. Kwok R. Outflow of Arctic Ocean sea ice into the Greenland and Barents Seas. *Journal of Climate*. 2009, 22 (9): 2438–2457. doi: 10.1175/2008JCLI2819.1.
29. Egorova E.S., Mironov Ye.U., Il'yushchenkova I.A. Seasonal and interannual variations in in Arctic ice outflow on sea ice in the Barents Sea. *Oceanological Research: Proceedings of the X Conference of Young Scientists*. Vladivostok: TOI DVO RAN, 2023: 20–21. [In Russian].
30. National Snow and Ice Data Center Polar Pathfinder Daily EASE-Grid Sea Ice Motion Vectors, Version 4. Available at: <https://nsidc.org/data/NSIDC-0116/versions/4> (accessed 10.05.2023).
31. National Snow and Ice Data Center Quicklook Arctic Weekly EASE-Grid Sea Ice Motion Vectors, Version 1. Available at: <https://nsidc.org/data/NSIDC-0748/versions/1> (accessed 10.05.2023).
32. Tschudi M.A., Meier W.N., Stewart J.S. An enhancement to sea ice motion and age products at the National Snow and Ice Data Center (NSIDC). *The Cryosphere*. 2020, 14: 1519–1536. doi: 10.5194/tc-14-1519-2020.

33. *Viazigina N.A., Timokhov L.A., Egorova E.S., Yulin A.V.* Informativeness (information-bearing) of hydrometeorological and astrophysical factors in the problem of describing interannual fluctuations of the Greenland Sea ice coverage. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 61 (3): 431–444. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421030099.

34. *Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V.* Is the Arctic ice sheet becoming seasonal? *Issledovanie Zemli iz kosmosa. Exploration of the Earth from space*. 2013, 4: 50–65. [In Russian]. doi: 10.7868/S0205961413040076.

35. *Watanabe E., Wang J., Sumi A., Hasumi H.* Arctic dipole anomaly and its contribution to sea ice export from the Arctic Ocean in the 20th century. *Geophysical Research Letters*. 2006, 33 (23): L23703. doi: 10.1029/2006GL028112.