

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-216-233>

УДК 551.326.12



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Возрастной состав ледяного покрова Баренцева моря*Е.С. Егорова*, Е.У. Миронов**ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия***egorova@aari.ru***Резюме**

В настоящей работе для периода 1997–2021 гг. была произведена оценка сезонных и межгодовых изменений возрастной структуры ледяного покрова Баренцева моря в зимний период в семи основных градациях. Представлено описание ледовых условий акватории от начала формирования ледяного покрова в октябре до его завершения в мае. Результаты получены для однородных районов Баренцева моря: западного, северо-восточного и юго-восточного. Выявлены различия в количестве льдов различного возраста, а также основные периоды их преобладания для каждого из районов моря. Получена уникальная информация, дополняющая особенности ледового режима Баренцева моря за последние 25 лет.

Ключевые слова: Баренцево море, возрастная структура льдов, зимний период, ледяной покров, межгодовые изменения, сезонные изменения.

Для цитирования: *Егорова Е.С., Миронов Е.У.* Возрастной состав ледяного покрова Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 3. С. 216–233. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-216-233>.

Поступила 06.06.2022**После переработки 11.07.2022****Принята 12.07.2022****Ice age composition in the Barents sea***Elizaveta S. Egorova*, Yevgeny U. Mironov**State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia***egorova@aari.ru***Summary**

The paper presents the key results of investigating Barents Sea ice age composition during the winter season, from the beginning of ice formation in October to its termination in May. To analyze the seasonal and interannual

changes in the amount of ice of different age categories, we used ice charts for the Barents Sea for the period 1997–2021, produced by the Arctic and Antarctic Research Institute. The age composition of the ice cover in the Barents Sea is represented by seven standard ice categories (thickness ranges). The areas of ice of different age categories were calculated for a ten-day time interval (in percentage of the total ice area). The results are provided for three parts of the Barents Sea: western, northeastern and southeastern.

The interannual changes in the amount of ice in relative fractions of ice of different age categories in the ice cover of the Barents Sea do not show significant trends for the period 1997–2021. Thus, with the observed reduction in the Barents Sea total ice area, the amount of ice of different age categories ranges within the limits of its own natural variability. Therefore, it is impossible to draw a definite conclusion about a decrease in ice cover thickness in the Barents Sea based only on data on the ice age composition over a 24-year period of observations analyzed in this study. On comparing the estimates obtained in this study of the age structure of the ice cover in the Barents Sea with those of the previous studies on this subject, we can argue that its average thickness at the beginning of the 21st century decreased, compared to the period 1971–1976. Taking into account the statistical insignificance of the trends in interannual variations in the amount of ice of different age gradations, one can maintain that quantitative changes in the age structure of the Barents Sea ice cover began earlier than 1997.

Keywords: Barents Sea, ice age composition, ice cover, interannual changes, seasonal changes, winter period.

For Citation: Egorova E.S., Mironov Y.U. Ice age composition in the Barents Sea. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (3): 216–233. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-216-233>.

Received 06.06.2022

Revised 11.07.2022

Accepted 12.07.2022

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия изменения климатической системы лучше всего заметны в высоких широтах Северного полушария, и морской лед является наиболее чувствительным компонентом этой системы. Вопросу состояния арктического ледяного покрова уделяется особое внимание ввиду сокращения его площади и объема, наблюдающегося в последние десятилетия [1]. Согласно [2], начиная с 1979 г. (эра спутниковых наблюдений) в летний сезон наблюдается максимальное уменьшение площади льдов в Арктике, составляя в сентябре порядка 45 %, с 1979 по 2017 г. Авторами [3] отмечается резкое увеличение, почти вдвое, скорости ее сокращения с 2000-х гг. относительно двух предшествующих десятилетий. Кроме того, в зимние месяцы арктический ледяной покров стал тоньше в среднем на 1,5 м за 40-летний период наблюдений (1979–2018 гг.) [4]. Это привело к сокращению доли старых льдов, которые в настоящее время покрывают менее $\frac{1}{3}$ всего Северного Ледовитого океана (СЛО), по сравнению с приблизительно 60 % в начале 1980-х гг. [2, 4]. В работе [5] показано, что в российских арктических морях от Карского до Чукотского после 2004 г. в холодный период отмечается замена старых льдов толщиной более 250 см на однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см.

Баренцево море является регионом наиболее быстрых климатических изменений в Арктике. Согласно последним оценкам [2, 6, 7], на Баренцево море приходится около 25 % от общего уменьшения площади арктических морских льдов в марте с 1979 по 2018 г. — это наибольшее относительно других морей СЛО сокращение количества ледяного покрова зимой. Расположенное в Северо-Европейском бассейне СЛО, Баренцево море находится под влиянием поступления теплых атлантических и холодных арктических водных масс, что создает особые ледовые условия на его акватории. Ледяной покров и чистая вода здесь присутствуют в разных соотношениях круглогодично, поскольку в зимний сезон море не покрывается льдом полностью [8].

В ледяном покрове Баренцева моря преобладают льды местного образования; однако в зимний сезон на акваторию моря поступают льды из Арктического бассейна СЛО, а также из Карского и Белого морей [9]. Отмечающееся в последние годы сокращение площади льдов Баренцева моря связывают преимущественно с аномально большим переносом океанского тепла, вызванным усилением притока теплых атлантических вод в этот район [10, 11], а также уменьшением поступления льдов из Арктического бассейна [12]. Крупномасштабные изменения атмосферной циркуляции также оказывают влияние на изменение площади льдов моря в различных временных масштабах [11, 13].

Возрастной состав ледяного покрова Баренцева моря, наряду с другими элементами ледового режима, во многом определяет его ледовые условия и является показательной характеристикой в вопросе изменений климата рассматриваемого региона. Помимо этого, Баренцево море имеет высокий ресурсный потенциал, обусловленный главным образом разработкой и освоением здесь крупных нефтегазовых месторождений и морских биоресурсов, а также является зоной стратегически важных транспортных магистралей. Пространственно-временные изменения возрастной структуры льдов Баренцева моря (их средней толщины) могут оказывать значительное негативное воздействие на ведение хозяйственной деятельности на акватории, ограничивая свободу мореплавания и создавая трудности при производстве работ на шельфе. В этой связи задача получения оценок возрастного состава ледяного покрова моря остается актуальной.

Несмотря на хорошую изученность ледового режима Баренцева моря, знания о возрастном составе льдов его акватории на сегодняшний день ограничены. Первые оценки возрастной структуры ледяного покрова Баренцева моря были представлены в монографии [14]. Авторами по средним месячным картам приземного атмосферного давления, с учетом средних сроков начала ледообразования, а также распределения границ остаточных льдов и припая на конец мая были рассчитаны средние величины площадей льдов основных возрастных градаций, молодых, однолетних и старых льдов.

В работе [9] по аналогичной методике были получены среднемесячные значения площадей льдов разного возраста для периода 1971–1976 гг. для отдельных однородных районов Баренцева моря. Автором были выполнены оценки возрастного состава ледяного покрова в период сезонного максимума площади льдов в апреле и ее сезонного минимума в сентябре с дополнительным разделением однолетних льдов по градациям их средних толщин (однолетние тонкие, средние и толстые льды). Полученные в данной работе оценки расширяют представления о сезонных изменениях возрастной структуры ледяного покрова Баренцева моря, однако на столь коротком временном промежутке (5 лет) проследить ее межгодовые изменения не представляется возможным.

В настоящей работе представлены результаты анализа сезонных и межгодовых изменений возрастного состава ледяного покрова Баренцева моря в зимний сезон для семи стандартных градаций возраста льдов. Оценки возрастной структуры выполнены с использованием электронного архива региональных ледовых карт Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) за период 1997–2021 гг. и ограничены зимним периодом, от начала формирования льдов в октябре до его завершения в мае. Подробный анализ изменений возрастного состава льдов Баренцева моря

проводится впервые. Данная работа продолжает цикл исследований ледяного покрова акваторий других арктических морей по возрастным градациям [15–19], а ее результаты дополняют сведения о ледовом режиме Баренцева моря в зимний период [9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения данных по возрастной структуре ледяного покрова в Баренцевом море были использованы региональные ледовые карты, доступные в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду (МЦД МЛ, [20]) за период 1997–2021 гг. Карты еженедельно составляются ледовыми экспертами центра «Север» ААНИИ с указанием возрастного состава льдов и их общей сплоченности в зимние месяцы (октябрь–май) и только общей сплоченности ледяного покрова в летний сезон (июнь–сентябрь). Подробная методика составления ледовых карт ААНИИ изложена в работе [21].

Известно, что на сегодня основным источником информации о состоянии ледяного покрова для составления ледовых карт являются спутниковые изображения

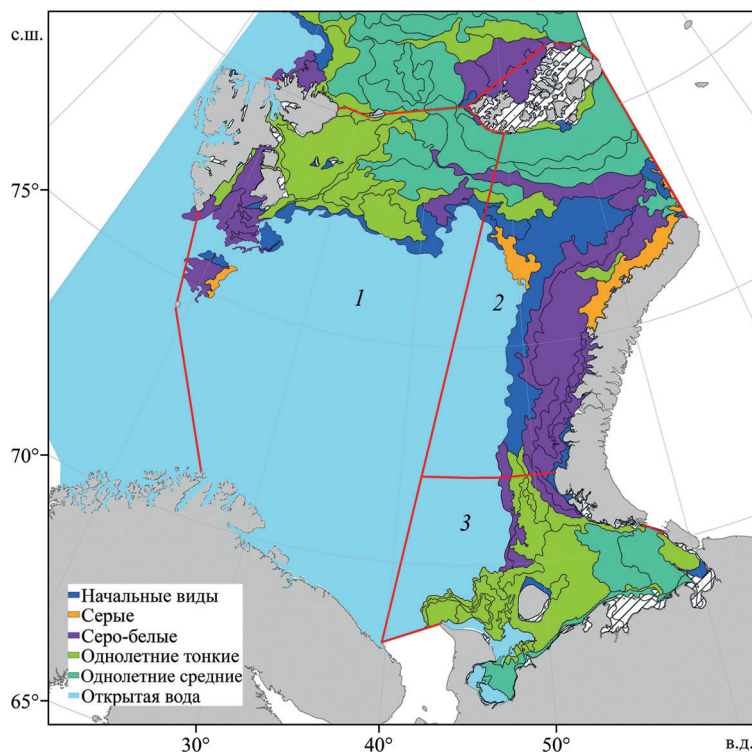


Рис. 1. Границы однородных ледовых районов Баренцева моря (отмечены красной линией) и распределение ледяного покрова по возрастному составу на первую декаду апреля 2021 г. (цветная раскраска).

1 — западный, 2 — северо-восточный, 3 — юго-восточный районы

Fig. 1. The boundaries of homogeneous sub-areas of the Barents Sea (marked with a red line) and the distribution of the Barents Sea ice cover by age composition for the first ten days of April 2021 (coloring).

1 — western, 2 — northeastern, 3 — southeastern sub-areas

в различных диапазонах. Появление в летний сезон слоя талой воды на поверхности ледяного покрова существенно изменяет его отображение на спутниковых снимках всех диапазонов, и различия между возрастными градациями льдов становятся практически не видны. Поэтому в исследовании определение возрастной структуры ледяного покрова Баренцева моря производится только для зимнего сезона, от начала формирования льдов в октябре до его завершения в мае.

Возрастной состав льдов Баренцева моря определяется совокупностью следующих стандартных градаций [22], показывающих неоднородную картину распределения средней толщины ледяного покрова на акватории моря:

- начальные виды льдов и ниласовые льды (< 10 см);
- серые (10–15 см) и серо-белые (15–30 см) молодые льды;
- тонкие (30–70 см), средние (70–120 см) и толстые (> 120 см) однолетние льды;
- старые льды (> 250 см).

Работа с архивом ледовых карт осуществлялась средствами геоинформационной системы ArcGIS. Для зимних месяцев периода 1997–2021 гг. с месячной дискретностью было определено количество дрейфующих льдов различных возрастных градаций, выраженное в % от общей площади ледяного покрова. Оценка возрастного состава льдов производилась в соответствии с традиционным разделением Баренцева моря на три однородных ледовых района: западный, северо-восточный и юго-восточный (рис. 1) [9, 14].

ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В СЕЗОННОМ ЦИКЛЕ

Изменение площади ледяного покрова в морях СЛО имеет четко выраженный сезонный цикл, определяющийся двумя периодами. Осенне-зимний период, продолжающийся с октября по апрель, обычно характеризуется процессами формирования и нарастания льдов, а весенне-летний, с мая по сентябрь, — процессами их таяния и разрушения, а также сокращения площади. Кроме того, наблюдаемый в течение зимнего и весеннего сезонов принос льдов из Арктического бассейна также может оказывать влияние на изменение площади ледяного покрова морей СЛО [8]. Баренцево море является единственным российским арктическим морем, которое никогда не замерзает полностью в зимний сезон. Каждый из выделяемых районов моря имеет свои особенности ледового режима.

При средних условиях ледообразование на акватории Баренцева моря начинается в конце сентября — начале октября в его западной и северо-восточной частях в прикромочной зоне. В это время в проливах архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) появляется припай, причем в районе ЗФИ ледообразование происходит на чистой воде. В конце октября — начале ноября, на месяц позже, ледообразование начинается в юго-восточной части Баренцева моря. Замерзание акватории этого района всегда происходит на закрытых мелководных участках в восточной и юго-восточной его частях при отсутствии остаточных льдов.

В ноябре в западном и северо-восточном районах моря кромка дрейфующих льдов начинает смещаться к югу, а в юго-восточном — к северо-западу от материкового берега и к юго-западу от берегов архипелага Новая Земля. Смещение кромки всегда происходит неравномерно, а нарастание толщины льдов наиболее быстро происходит в период начального ледообразования. Так, в юго-восточном районе Баренцева моря наибольшие скорости нарастания ледяного покрова обычно наблюдаются в ноябре-январе, достигая

10 см в декаду. Для сравнения: в апреле изменение толщины льдов происходит менее интенсивно, со средней скоростью нарастания 1–2 см в декаду [23].

Осенью молодые льды являются преобладающей возрастной градацией во всех районах Баренцева моря. Однако их переход в стадию однолетних тонких льдов происходит в разные месяцы года: для западной и северо-восточной частей моря он приходится на ноябрь–декабрь, в юго-восточной — на январь. Однолетние толстые льды местного образования наблюдаются на акватории Баренцева моря только в западном и северо-восточном районах в среднем в феврале–марте; в юго-восточной части такие льды характерны только для суровых зим [9].

В течение всего годового цикла на акватории Баренцева моря преобладают льды местного образования. Однако ледовые условия его отдельных районов определяются ледообменом с соседними бассейнами. В зимний сезон через пролив между архипелагами Шпицберген и ЗФИ (пролив Шиллинга) в северо-восточную и западную части моря поступают старые льды из Арктического бассейна СЛО. В северо-восточный район моря через пролив между архипелагами ЗФИ и Новая Земля (пролив Макарова) выносятся однолетние толстые льды из северной части Карского моря [9]. В 1998 г. отмечался аномальный случай выноса в юго-восточный район Баренцева моря остаточных льдов из юго-западной части Карского моря через пролив Карские Ворота. Поэтому в осенний сезон ледообразование началось на фоне остаточных льдов на месяц раньше средних сроков. Этому явлению способствовал ряд гидрометеорологических условий, рассмотренных в работе [24].

Кромка дрейфующих льдов в Баренцевом море всегда распространяется в генеральном направлении с севера на юг и с востока на запад. При средних условиях замерзание акватории заканчивается в марте–апреле в прикромочной области. Сезонный максимум ледяного покрова достигается в апреле как на акватории всего Баренцева моря в целом, так и в его отдельных районах; сезонный минимум площади льдов отмечается в сентябре (в юго-восточной части моря полное очищение акватории ото льдов в среднем происходит в июле). Средняя толщина дрейфующих льдов в конце зимы в прикромочной зоне обычно не превышает 30 см. В юго-восточной части Баренцева моря в зимний сезон дрейфующие льды достигают толщины 70–80 см. Наибольшие толщины дрейфующих льдов, 120–140 см, к концу зимы наблюдаются в западной и северо-восточной частях Баренцева моря [25]. Припай устанавливается ежегодно вдоль большинства материковых и островных берегов акватории.

Процессы таяния и разрушения ледяного покрова Баренцева моря активизируются в мае–июне под действием солнечной радиации и адвективного притока тепла. Однако в последние десятилетия наблюдений за ледяным покровом моря отмечается постепенное смещение сроков очищения акватории ото льдов в сторону более ранних [26] и, соответственно, более позднее начало ледообразования. При средних условиях в юго-восточном районе моря срок разрушения припая в среднем приходится на конец мая, а его исчезновение наблюдается на большинстве полярных станций в течение июня [23]. Юго-восточный район Баренцева моря полностью очищается ото льдов уже в июле; в это же время освобождается ото льдов западная граница архипелага Новая Земля практически на всем ее протяжении. Наиболее быстрое отступление кромки дрейфующих льдов к северу наблюдается в августе. Но на участках теплых течений смещение кромки происходит раньше и быстрее: в западной части Баренцева моря наиболее быстрое ее отступление на север наблюдается в районе

действия северной ветви Нордкапского течения, а в северо-восточной и юго-восточной частях моря — под влиянием Центрального и Новоземельского течений [23].

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА ЛЬДОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

На рис. 2 показаны средние соотношения относительного количества дрейфующих льдов различного возраста в ледяном покрове отдельных районов Баренцева моря в период нарастания его толщины (октябрь–май). Несмотря на то, что в работе не рассматриваются изменения количества припайных льдов, их площадь включена в общую площадь ледяного покрова и учитывается при расчете соотношений льдов различных возрастных градаций. Так, в среднем за 1997–2021 гг. отмечаются следующие особенности возрастной структуры ледяного покрова трех частей Баренцева моря в сезонном цикле.

Западная часть Баренцева моря. Согласно рис. 2а, в условиях уже начавшегося ледообразования, в октябре, ледяной покров западной части на 81 % состоит из начальных и молодых льдов, среди которых преобладают серо-белые льды (29 % от общей площади). Остальные 19 % ледяного покрова акватории составляют старые льды, к которым относятся главным образом остаточные. Относительное количество старых льдов по мере появления ледяного покрова других возрастных градаций уменьшается, переходя в стадию двухлетних льдов и сохраняясь в пределах от 1 % до 4 % с ноября по май.

При активизации процесса ледообразования, в ноябре, серо-белые льды составляют уже 42 % от общей площади ледяного покрова западной части моря при общем количестве начальных и молодых льдов порядка 80 % (см. рис. 2а). В течение всего зимнего периода количество серо-белых льдов сохраняется, хотя и постепенно убывает, от 42 % до 21 % от площади льдов в ноябре и мае соответственно. Часть их переходит в следующую градацию однолетних тонких льдов, а часть вновь образуется в полыньях и разводьях среди ледяного покрова. Среди начальных и молодых льдов градация серо-белых является преобладающей в течение всего холодного сезона года. Доли начальных видов и молодых серых льдов в ледяном покрове западной части Баренцева моря закономерно сокращаются с октября по май, от 26 % до 2 % соответственно для обеих возрастных градаций.

Формирование однолетних тонких льдов в западном районе моря начинается уже в ноябре. В течение зимнего сезона их относительное количество увеличивается с ноября по март, от 17 % до 24 %, достигая максимального значения площади 27 % в апреле–мае (см. рис. 2а). В декабре часть тонких льдов переходит в градацию однолетних средних; тогда их доля составляет 2 % от общей площади ледяного покрова. Далее относительное количество однолетних средних льдов в возрастном составе ледяного покрова района увеличивается, от 8 % в январе до 39 % в мае. Однолетние толстые льды начинают отмечаться в марте, хотя их доля в этом месяце не превышает 1 % от общей площади льдов западной части моря. Максимального значения доля однолетних толстых льдов в ледяном покрове достигает к маю, составляя порядка 7 % от его общей площади.

С октября по март суммарное количество начальных и молодых льдов преобладает в возрастной структуре льдов западной части Баренцева моря, изменяясь от 81 % в октябре до 51 % в марте. Начиная с апреля большую часть ледяного покрова района занимают уже однолетние льды (см. рис. 2а). В апреле их доля от общей площади ледяного покрова составляет порядка 59 %, в мае — около 72 %.

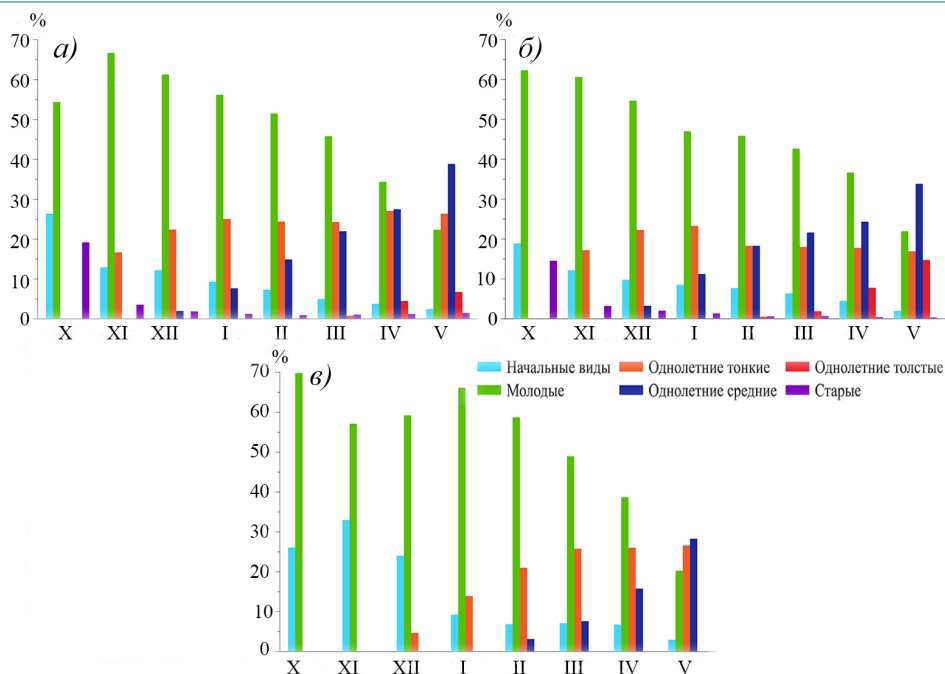


Рис. 2. Соотношение площадей льдов различных возрастных градаций в ледяном покрове: а) западной, б) северо-восточной, в) юго-восточной частей Баренцева моря в период его нарастания (в % от общей площади льдов).

По оси X указана площадь льдов различных возрастных градаций, в % от общей площади ледяного покрова района Баренцева моря

Fig. 2. Areal fractions of the ice of different age categories during the ice growth season for: а) western, б) northeastern, в) southeastern parts of the Barents Sea (% of the total ice area).

The X axis shows the area of ice of different age categories, in % of the total area of ice cover in the Barents Sea area

Преобладание однолетних тонких в общей градации однолетних льдов отмечается с ноября по март; в апреле и мае в ледяном покрове района преобладают однолетние льды средней толщины.

Северо-восточная часть Баренцева моря. Ледяной покров северо-восточной части Баренцева моря в октябре, по данным рис. 2б, формируется преимущественно из начальных и молодых льдов, которые занимают порядка 81 % от общей площади ледяного покрова. Примерно 15 % ледяного покрова составляют старые льды, в основном остаточные. Далее они сохраняются в ледяном покрове акватории до конца периода формирования льдов, хотя их доля относительно общей площади ледяного покрова уменьшается, изменяясь в среднем от 1 % до 3 %.

В ноябре около 73 % акватории составляют начальные и молодые льды, причем серо-белые льды занимает большую часть ледяного покрова района, приблизительно 33 % (см. рис. 2б). Серо-белые льды в среднем отмечаются в течение всего зимнего сезона и являются преобладающей градацией в возрастной структуре льдов среди начальных и молодых. В общей площади ледяного покрова их доля постепенно сокращается с ноября по май, от 38 % до 20 %. Относительное количество начальных и серых льдов уменьшается с октября по май от 19 % до 2 % и от 30 % до 2 % соответственно.

Кроме того, в ноябре начинается формирование однолетних тонких льдов; их доля в общей площади ледяного покрова составляет 17 %. Количество однолетних тонких льдов в декабре составляет 22 %, а в январе достигает своего максимума в 23 % от общей площади ледяного покрова района моря. Их площадь с февраля по май сокращается незначительно, с 18 % до 17 % (см. рис. 2б). Однолетние льды средней толщины встречаются в возрастной структуре льдов северо-восточной части моря в декабре; их площадь не превышает 4 % от общей площади ледяного покрова. С января доля однолетних льдов средней толщины растет, достигая наибольшего значения к маю, от 11 % до 34 % соответственно. Однолетние толстые льды начинают формироваться акватории в феврале, занимая менее 1 % от общей площади ледяного покрова (см. рис. 2б). Площадь однолетних толстых льдов изменяется от 2 % до 15 % в марте–мае; максимум их нарастания в течение холодного сезона приходится на май.

Среди всех возрастных градаций начальные и молодые льды преобладают в ледяном покрове северо-восточного района моря с октября по март, составляя от 81 % до 49 % от его общей площади. В апреле–мае возрастной состав льдов определяется в большей степени однолетними льдами разных толщин: их количество относительно общей площади льдов занимает от 50 % до 65 %. В ноябре–феврале среди однолетних льдов в ледяном покрове района преобладают тонкие, в марте–мае — средние.

Таким образом, в ледяном покрове западной и северо-восточной частей Баренцева моря на протяжении всего холодного сезона наблюдаются льды всех возрастных градаций. Возрастная структура льдов северных районов моря имеет следующие схожие черты:

- начальные и молодые льды сохраняются в ледяном покрове на протяжении всего зимнего периода, а преобладающей возрастной градацией среди них всегда остается серо-белый лед;
- образование однолетних тонких льдов начинается в ноябре, средних — в декабре;
- в течение всего холодного сезона, в т. ч. в период максимального развития ледяного покрова, количество однолетних толстых льдов не превышает количества других градаций однолетних льдов;
- в течение всех зимних месяцев доля старых льдов относительно общей площади ледяного покрова изменяется незначительно, в пределах 1–4 %, за исключением октября, когда ледяной покров только начинает формироваться.

Согласно рис. 2а и 2б, в отдельные месяцы количественное соотношение ледяного покрова разного возраста в северных районах Баренцева моря сохраняется приблизительно одинаковым, кроме градации однолетних толстых льдов. В среднем однолетние толстые льды начинают формироваться в северо-восточной части моря на месяц раньше, чем в западной, в феврале и в марте соответственно. Кроме того, к концу периода формирования ледяного покрова в мае количество льдов этой возрастной градации в западной части почти вдвое меньше, чем в северо-восточной (7 % и 15 % соответственно относительно общей площади ледяного покрова).

Юго-восточная часть Баренцева моря. Рис. 2в показывает, что в октябре порядка 96 % ледяного покрова юго-восточной части моря занимают начальные и молодые льды, среди которых преобладают серо-белые (около 47 % от общей площади).

Формирование ледяного покрова всегда начинается на фоне чистой воды. Процесс замерзания акватории растягивается на весь зимний период: градации начальных и молодых льдов характерны для ледяного покрова каждого зимнего месяца. Вплоть до апреля начальные и молодые льды преобладают в ледяном покрове района моря, занимая от 96 % до 45 % его площади с октября по апрель соответственно (см. рис. 2б).

Среди начальных и молодых льдов градация серо-белых является преобладающей в течение всего холодного сезона года, кроме ноября. Когда процесс ледообразования активизируется, количество начальных и молодых серых льдов составляет порядка 33 % и 37 % соответственно против 19 % для градации молодых серо-белых льдов. Доли молодых льдов с октября по май сокращаются от 23 % до 2 % (серые) и от 47 % до 18 % (серо-белые). Количество начальных льдов относительно общей площади ледяного покрова района моря уменьшается от 26 % до 3 % на протяжении всего зимнего сезона (см. рис. 2б).

Формирование однолетних тонких льдов начинается в декабре, хотя их количество относительно общей площади ледяного покрова составляет не более 4 %. Далее доля тонких льдов в общей площади увеличивается, от 14 % до 26 % с января по апрель соответственно, достигая своего максимального значения в 27 % к маю. Переход части однолетних тонких льдов в следующую градацию, средних, происходит в феврале, когда они занимают около 3 % от общей площади ледяного покрова района (см. рис. 2б). С марта по май относительное количество льдов средней толщины возрастает, от 8 % до 28 % соответственно; максимум их площади на протяжении холодного периода года наблюдается в мае.

Только к концу сезона нарастания толщины ледяного покрова, в мае преобладающей в возрастном составе ледяного покрова акватории становится градация однолетних льдов (около 55 % от общей площади льдов). С февраля по апрель среди однолетних льдов преобладают тонкие, в мае — уже средние льды. Как видно на рис. 2в, при средних условиях однолетние толстые льды в юго-восточной части моря не образуются; они могут встречаться только в самые суровые годы, которых за 24-летний период наблюдений не фиксировалось. Старые льды также не встречаются в ледяном покрове района, за исключением случая 1998 г., когда в осенние месяцы ледообразование началось на фоне остаточных льдов, вынесенных из юго-восточной части Карского моря (этот экстремум не учитывался при расчете средних значений). В целом для юго-восточной части Баренцева моря характерны относительно более благоприятные ледовые условия, чем для западной и северо-восточной частей.

Такой детальный анализ возрастного состава ледяного покрова Баренцева моря, от месяца к месяцу, ранее не проводился, поэтому количественное сравнение площадей льдов различных возрастных градаций по данным разных авторов провести не представляется возможным. Исключение составляет месяц максимального нарастания ледяного покрова на акватории моря (апрель), оценки возрастной структуры для которого показаны в работе [9]. Однако их сравнение будет приведено ниже, при рассмотрении многолетних изменений. Здесь же следует отметить, что по нашим оценкам и оценкам в работе [9] средние сроки формирования однолетних льдов различных толщин (тонких, средних и толстых льдов) при переходе из одной возрастной градации в другую совпадают в большинстве случаев. Так, согласуются месяцы появления однолетних тонких и толстых льдов в северных районах Баренцева моря, в ноябре и в феврале соответственно. Однако, согласно оценкам данного исследо-

вания, в юго-восточной части моря начало формирования тонких льдов приходится на декабрь, по данным [9] — на январь, в среднем на месяц позже.

МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЬДОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Для апреля, месяца максимального нарастания ледяного покрова в Баренцевом море, для отдельных его частей на рис. 3 приведены межгодовые изменения возрастного состава льдов. При обобщении начальных видов, а также серых и серо-белых льдов в одну общую градацию молодых за период 1997–2021 гг. было получено следующее распределение возрастной структуры ледяного покрова от года к году.

Площади льдов всех возрастных градаций на акватории Баренцева моря подвержены большим межгодовым колебаниям. Согласно рис. 3, количество молодых льдов в западной и северо-восточной частях моря изменяется в среднем от 20 % до 70 %, в юго-восточной — от 20 % до 85 %. Доля однолетних тонких льдов в ледяном покрове моря составляет от 10 % до 55 %, от 10 % до 35 % и от 5 до 50 % в западном, северо-восточном и юго-восточном районах соответственно. Однолетние льды средней толщины занимают от 5 % до 50 % ледяного покрова западной части, от 5 % до 40 % — северо-восточной и, наконец, от 0 % до 50 % — юго-восточной. Площадь однолетних толстых льдов, наименее распространенных среди других градаций однолетних льдов, в среднем изменяется в северных частях моря от 0 % до 35 %. В рамках естественной изменчивости отмечается, что с относительным увеличением в возрастной структуре ледяного покрова моря количества молодых и однолетних тонких льдов сокращается доля однолетних средних и толстых льдов; верно и обратное (см. рис. 3).

В последние годы для северных районов Баренцева моря старые льды становятся редким явлением (на рис. 3 не представлены). Так, на момент максимального нарастания ледяного покрова за исследуемый период они встречались на акватории западной части в 1998, 2003–2004, 2009, 2015, 2017 и 2019 гг. — чаще, чем в северо-восточной, где льды этой возрастной градации отмечались только в 1998, 2002–2003 и 2015 гг. Максимальные значения количества старых льдов наблюдаются как в западной, так и в северо-восточной частях моря в 2003 г., составляя в апреле 8 % и 6 % от общей площади ледяного покрова соответственно. В перечисленные выше годы старые льды в среднем занимают от 1 % до 5 % ледяного покрова отдельных частей моря. Также можно отметить, что после наблюдавшегося в 2012 г. минимума площади арктического ледяного покрова [3] доля однолетних толстых льдов как в западной, так и в северо-восточной части Баренцева моря значительно уменьшилась (см. рис. 3).

В рассматриваемый период 1997–2021 гг. в месяц максимального развития ледяного покрова (апрель) преобладающей возрастной градацией в ледяном покрове Баренцева моря являются однолетние средние льды толщиной 70–120 см. На рис. 4 показана их повторяемость для трех районов моря за многолетний период. Так, в западной части Баренцева моря однолетние льды средней толщины чаще всего, в 21 % случаев, занимают площадь порядка 25–30 % от общей площади ледяного покрова. Для северо-восточного района в 38 % случаев характерна относительная площадь однолетних средних льдов 20–25 %. В юго-восточной части моря однолетние средние льды с равной повторяемостью (в 21 % случаев) составляют 5–10 % или 15–20 % от общей площади ледяного покрова.

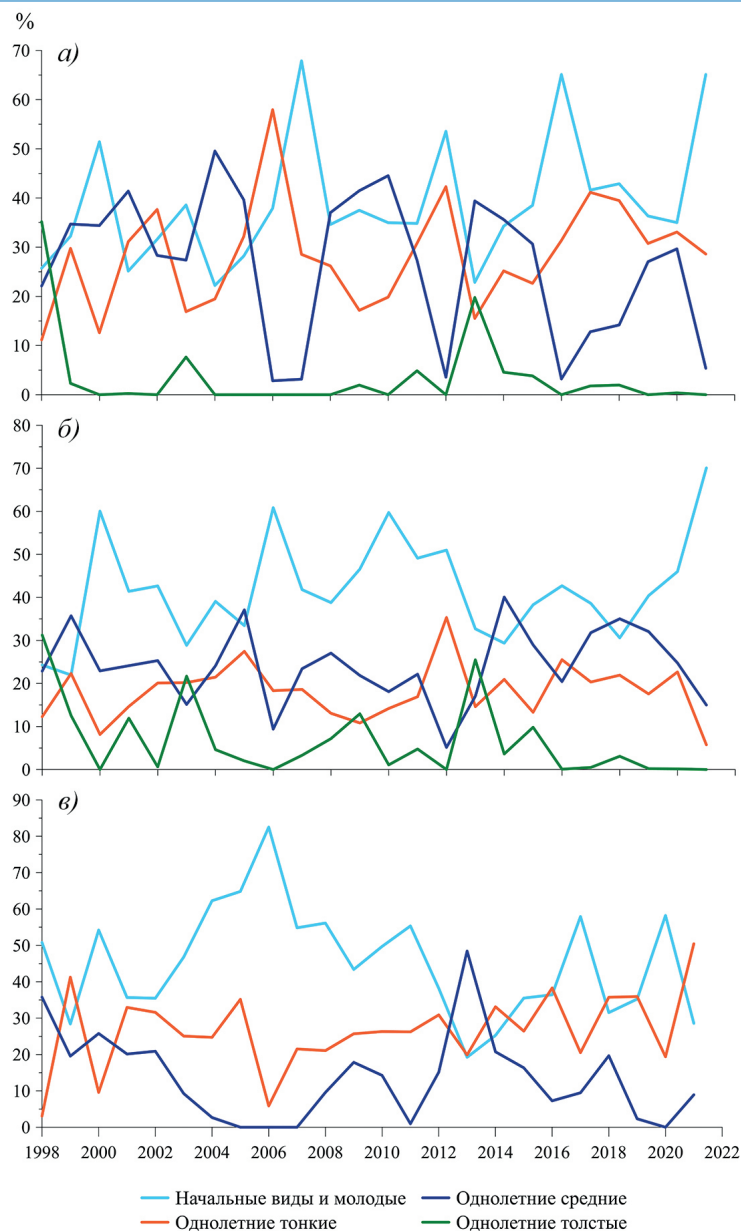


Рис. 3. Межгодовые изменения площадей льдов различных возрастных градаций в ледяном покрове: а) западной, б) северо-восточной, в) юго-восточной частей Баренцева моря в апреле (в % от общей площади льдов).

По оси X указана площадь льдов различных возрастных градаций, в % от общей площади ледяного покрова района Баренцева моря

Fig. 3. Interannual changes in areal fractions of the ice of different age categories for: а) western, б) northeastern, в) southeastern parts of the Barents Sea in April (% of the total ice area).

The X axis shows the area of ice of different age categories, in % of the total area of ice cover in the Barents Sea area

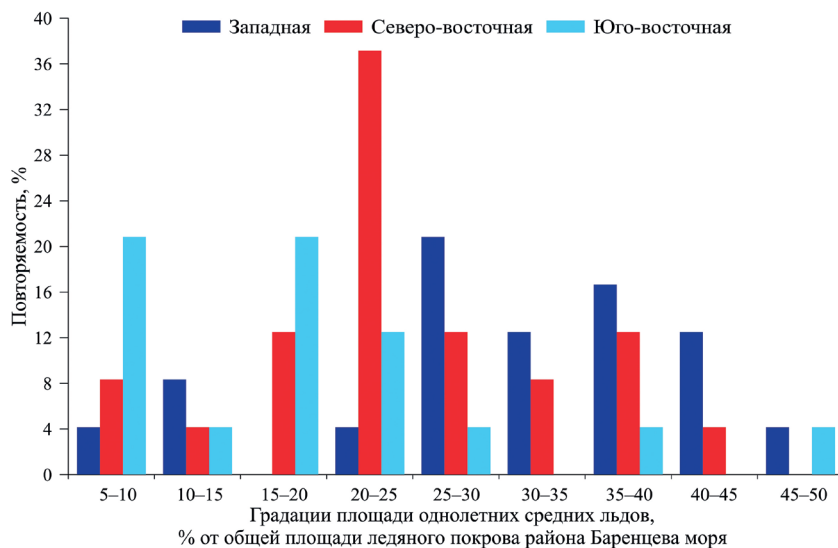


Рис. 4. Повторяемость площадей однолетних льдов средней толщины от общей площади ледяного покрова для отдельных частей Баренцева моря в апреле за период 1997–2021 гг. (в %)

Fig. 4. Average frequencies of the areal fractions of medium first-year ice for three studied areas of the Barents Sea in April during 1997–2021 (%)

На статистическую значимость были оценены линейные и нелинейные (выражены полиномом 2-й степени) тренды величин относительного количества льдов различных возрастных градаций в ледяном покрове исследуемых районов Баренцева моря. Оценка значимости трендов производилась с использованием t-критерия Стьюдента при уровне значимости 99 %. За 24-летний период выделенные тренды оказались статистически незначимыми, т. е. на фоне наблюдающегося сокращения общей площади ледяного покрова Баренцева моря количество льдов различных возрастных градаций в отдельных его частях колеблется в пределах естественной изменчивости. Необходим дальнейший мониторинг возрастной структуры ледяного покрова акватории моря.

Сравним полученные в данном исследовании результаты с другими, более ранними оценками возрастной структуры льдов Баренцева моря. В таблице представлены оценки количества льдов различного возраста в отдельных частях моря, полученные за периоды 1971–1976 гг. (работа [9]) и 1997–2021 гг. (данное исследование). Следует иметь в виду, что в этой работе площадь припайных льдов учитывается при расчете соотношений льдов различных возрастных градаций.

В апреле в ледяном покрове акватории Баренцева моря преобладают однолетние льды местного образования, что подтверждают и результаты нашего исследования. Однако оценки их относительного количества разнятся в значительной степени. Согласно оценкам [9] и нашим оценкам, в юго-восточном районе Баренцева моря доля однолетних льдов от общей его площади составляет 80 % и 42 %, соответственно, в северо-восточном — 86 % и 50 %, в западном — 64 % и 60 %. В 1970-е гг. [9] на момент максимального развития ледяного покрова количество молодых льдов значительно меньше, чем по оценкам в данной работе: в юго-восточной части они занимают 20 % и 45 % соответственно от общей площади льдов всех возрастных градаций, в северо-восточной — 13 % и 41 %, в западной — 12 % и 38 %.

Таблица

Сравнение оценок возрастного состава льдов в отдельных районах Баренцева моря в период максимального нарастания ледяного покрова в апреле (в % от общей площади льдов)

Table

Comparison of estimates of the ice age composition for three studied areas of the Barents Sea during the period of maximum ice cover growth in April (% of the total ice area)

Возрастная градация льдов / Район моря	Оценка (1971–1976 гг.) [9]			Наша оценка (1997–2021 гг.)		
	Западный	Северо- восточный	Юго- восточный	Западный	Северо- восточный	Юго- восточный
Начальные виды и молодые	12	13	20	38	41	45
Однолетние тонкие	0	0	64	27	18	26
Однолетние средние	10	17	16	28	24	16
Однолетние толстые	54	69	0	5	8	0
Старые	24	1	0	1	1	0

Таким образом, средняя толщина ледяного покрова Баренцева моря в начале XXI в. по сравнению с серединой 70-х гг. XX в., по данным о его возрастной структуре, уменьшилась: отмечается значительное сокращение количества однолетних толстых льдов и увеличение доли однолетних тонких и средних льдов в ледяном покрове акватории моря. Кроме того, увеличилась и площадь молодых льдов на акватории моря. При учете статистической незначимости трендов межгодовых колебаний количества льдов различных возрастных градаций, следует считать, что количественные изменения в возрастной структуре ледяного покрова Баренцева моря начались раньше 1997 г.

Интересна разница в соотношении старых льдов в ледяном покрове западной части Баренцева моря (24 % по данным [9] и всего 1 % по нашим оценкам; см. таблицу). Скорее всего, в работе [9] представлены завышенные значения площади льдов данной возрастной градации, вызванные увеличенным в период 1971–1976 гг. выносом льдов из Арктического бассейна СЛО. Однако данный вопрос требует более детального рассмотрения и выходит за рамки настоящего исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследования сезонных и межгодовых изменений возрастной структуры льдов Баренцева моря в зимний сезон за период 1997–2021 гг. для трех его однородных районов: западного, северо-восточного и юго-восточного. Выполненное исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Процесс ледообразования на акватории Баренцева моря наблюдается в течение всего холодного сезона, поэтому градации начальных и молодых льдов характерны для ледяного покрова всех зимних месяцев.

2. В октябре–марте в возрастной структуре ледяного покрова северных районов моря преобладают начальные и молодые льды, в апреле–мае — однолетние. В юго-восточной части моря преобладание однолетних льдов наблюдается только в мае, а с октября по апрель большую часть ледяного покрова занимают начальные виды и молодые льды.

3. Старые льды наблюдаются на акватории северных районов на протяжении всего холодного периода, однако их количество не превышает 4 % относительно общей площади ледяного покрова, за исключением октября, когда льды только начинают формироваться. Для юго-восточной части моря, где отмечаются наиболее легкие ледовые условия среди других частей моря, не характерно наличие однолетних толстых и старых льдов при средних условиях.

4. Выделенные за период 1997–2021 гг. тренды являются статистически незначимыми. Таким образом, на фоне наблюдающегося сокращения общей площади ледяного покрова Баренцева моря количество льдов различных возрастных градаций изменяется в пределах естественной изменчивости. Поэтому только на основании данных о возрастном составе ледяного покрова за 24-летний период наблюдений нельзя сделать однозначный вывод об уменьшении толщины льдов Баренцева моря.

5. При сравнении оценок возрастной структуры ледяного покрова Баренцева моря, полученных в настоящем исследовании, с более ранними оценками можно сказать, что его средняя толщина в начале XXI в. по сравнению с периодом 1971–1976 гг. уменьшилась. При учете статистической незначимости трендов межгодовых колебаний количества льдов разного возраста следует считать, что количественные изменения в возрастной структуре ледяного покрова Баренцева моря начались раньше 1997 г.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

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

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

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation within the framework of the scientific 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. In press.
2. 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.
3. 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.
4. Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018) // *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. № 10. 105005. doi: 10.1088/1748-9326/aad3ec.
5. Егоров А.Г. Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в. // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66. № 2. С. 124–143. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143.
6. Матвеева Т.А., Семенов В.А., Астафьева Е.С. Ледовитость арктических морей и ее связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии // *Лед и Снег*. 2020. Т. 60. № 1. С. 134–148. doi: 10.31857/S2076673420010029.
7. 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.

8. Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И.М. Ашика. СПб.: ААНИИ, 2021. 360 с.
9. *Миронов Е.У.* Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ААНИИ, 2004. 319 с.
10. *Аксенов П.В., Иванов В.В.* «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 1. С. 42–54. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54.
11. *Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Otterå O.H., Risebrobakken B., Sandø A.B., Semenov V.A., Sorokina S.A.* The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // Reviews of Geophysics. 2013. V. 51. P. 415–449. doi: 10.1002/rog.20017.
12. *Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T.* Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // Nature Climate Change. 2018. V. 8. P. 634–639. doi: 10.1038/s41558-018-0205-y.
13. *Pavlova O., Pavlov V., Gerland S.* The impact of winds and sea surface temperatures on the Barents Sea ice extent, a statistical approach // Journal of Marine Systems. 2014. V. 130. P. 248–255. doi:10.1016/j.jmarsys.2013.02.011.
14. *Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанникова А.В., Спичкин В.А.* Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 348 с.
15. *Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М.* Сезонные изменения возрастного состава льдов в северо-восточной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. Т. 110. № 4. С. 41–50.
16. *Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М.* Формирование возрастного состава льда в юго-западной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Т. 113. № 3. С. 16–26.
17. *Хотченков С.В.* Формирование возрастного состава ледяного покрова в море Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Т. 114. № 4. С. 5–15.
18. *Шаратунова М.В., Иванов В.В.* Изменчивость возрастного состава льдов Восточно-Сибирского моря в зимний период // Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб.: ХИМИЗДАТ, 2018. С. 692–696.
19. *Павлова Е.А., Юлин А.В., Шевелева Т.В.* Сезонные изменения возрастного состава льдов юго-западной части Чукотского моря в осенне-зимний период // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: Год науки и технологий в РФ — десятилетие наук об океане ООН». Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2021. С. 157–158.
20. Архив Мирового центра данных по морскому льду ААНИИ. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/bag/> (дата обращения: 31.03.2022).
21. *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.
22. 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.
23. Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей / Под ред. А.И. Данилова, Е.У. Миронова, В.А. Спичкина. СПб.: ААНИИ, 2004. 431 с.
24. *Тюряков А.Б., Ильющенкова И.А., Егорова Е.С.* Гидрометеорологические условия появления двухлетнего льда в юго-восточной части Баренцева моря // Тезисы докладов международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики». СПб.: ГНЦ РФ ААНИИ, 2020. С. 306–309.

25. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2014. 608 с.
26. 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.

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: In press.
2. 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.
3. 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.
4. Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018). *Environmental Research Letters*. 2018, 13 (10): 105005. doi: 10.1088/1748-9326/aae3ec.
5. Egorov A.G. The Russian Arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 124–143. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143.
6. Matveeva T.A., Semenov V.A., Astafyeva E.S. Arctic sea ice coverage and its relation to the surface air temperature in the Northern Hemisphere. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 134–148. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420010029.
7. 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.
8. Moria rossiiskoi Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh. Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions. St. Petersburg: Proc. of AARI, 2021: 360 p. [In Russian].
9. Mironov Ye.U. *Ledovye usloviya v Grenlandskom i Barentsevom moriyakh i ikh dolgosrochnyye prognozy*. Ice conditions in the Greenland and Barents Seas and its long-term forecast. St. Petersburg: AARI, 2004: 319 p. [In Russian].
10. Aksenov P.V., Ivanov V.V. «Atlantification» as a possible cause for reducing of the sea-ice cover in the Nansen Basin in winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 42–54. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54.
11. Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Otterå O.H., Risebrobakken B., Sandø A.B., Semenov V.A., Sorokina S.A. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics*. 2013, 51: 415–449. doi: 10.1002/rog.20017.
12. Lind S., Ingvaldsen R. B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature Climate Change*. 2018, 8: 634–639. doi: 10.1038/s41558-018-0205-y.
13. Pavlova O., Pavlov V., Gerland S. The impact of winds and sea surface temperatures on the Barents Sea ice extent, a statistical approach. *Journal of Marine Systems*. 2014, 130: 248–255. doi: 10.1016/j.jmarsys.2013.02.011.
14. 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].
15. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Seasonal changes in the stages of sea ice development in northeast part of the Kara Sea during the autumn and winter period. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2016, 4 (110): 41–50. [In Russian].

16. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Formation of the stages of sea ice development composition in the south-western part of the Kara Sea during autumn-winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2017, 3 (113): 16–26. [In Russian].
17. Hotchenkov S.V. Stages of sea ice development in the Laptev Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2017, 4 (114): 5–15. [In Russian].
18. Sharatunova M.V., Ivanov V.V. The variability of ice age composition in the winter period of the East Siberian sea. Proceedings of the II All-Russian Conference «Hydrometeorology and Ecology: Achievements and Development Prospects». St. Petersburg: KhIMIZDAT, 2018: 692–696. [In Russian].
19. Pavlova E.A., Yulin A.V., Sheveleva T.V. Seasonal changes in the ice age composition in the south-western part of the Chukchi Sea in the autumn-winter period. Abstracts of the All-Russian Scientific Conference «Russian Seas: Year of Science and Technology in the Russian Federation — UN Decade of Ocean Sciences». Sevastopol: FGBUN FITs MGI, 2021: 157–158. [In Russian].
20. AARI WDC Sea-Ice archive. Available at: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/bar/> (accessed 31.03.2022).
21. 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].
22. 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.
23. *Izmenchivost' prirodnikh uslovii v shel'fovoi zone Barentseva i Karskogo morei*. Variability of natural conditions in the shelf zone of the Barents and Kara seas. St. Petersburg: AARI, 2004: 431 p. [In Russian].
24. Tyuryakov A.B., Il'yushchenkova I.A., Egorova E.S. Hydrometeorological conditions of 2nd year ice appearance in the south-eastern Barents Sea. Abstracts of International Scientific Conference «Comprehensive Research of the Natural Environment of the Arctic and Antarctic». St. Petersburg: SSC RF AARI, 2020: 306–309. [In Russian].
25. Dumanskaia I.O. *Ledovye usloviia morei evropeiskoi chasti Rossii*. Ice conditions in the seas of the European part of Russia. Moscow; Obninsk: IG-SOTsIN, 2014: 608 p. [In Russian].
26. 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'naja i prikladnaja gidrofizika*. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022, 15 (1): 82–97. [In Russian]. doi: 10.48612/fpg/1krp-xbuk-6gpz.