

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-147-163>

УДК 551.326.2(268.52)



Изменение продолжительности безледного периода в арктических морях с 1991 по 2023 г.

В.С. Порубаев✉, Л.П. Мочнова

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

✉ pvs@aari.ru

Аннотация. В работе обоснована актуальность проблемы учета продолжительности безледного периода в арктических морях с целью изучения климата и практического использования в хозяйственной деятельности. Использован временной ряд дат очищения акватории ото льда и начала замерзания, рассмотрена их межгодовая изменчивость в различных частях арктических морей. Сделано дополнительное разделение акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского по однородным ледовым условиям на северные и южные их части. Обоснована необходимость такого разделения. Исследована межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода в различных частях арктических морей за последние 33 года. Получены числовые характеристики продолжительности безледного периода для всего рассмотренного ряда и для трех одиннадцатилетних периодов. Показано, что в морях Лаптевых, Карском и на северо-западе Восточно-Сибирского моря увеличение продолжительности безледного периода происходило по всем рассмотренным временным одиннадцатилетним периодам. В юго-западной и восточной частях Восточно-Сибирского моря, а также в Чукотском море за последние 11 лет произошло незначительное уменьшение продолжительности безледного периода.

Ключевые слова: арктические моря, безледный период, исчезновение льда, начало замерзания

Для цитирования: Порубаев В.С., Мочнова Л.П. Изменение продолжительности безледного периода в арктических морях с 1991 по 2023 г. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):147–163. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-147-163>

Поступила 16.09.2024

После переработки 01.11.2024

Принята 02.04.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Change in the duration of the ice-free period in the Arctic seas from 1991 to 2023

Viktor S. Porubaev✉, Liudmila P. Mochnova

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

✉pvs@aari.ru

Abstract. The Arctic seas are subdivided by the characteristic features of the ice regime into natural areas identified in the course of many years of observations and research by various scientists. At present, the ice cover of the Arctic seas is traditionally determined relative to such areas, identified in 1972 at the Arctic and Antarctic Research Institute. The ice-free period has some advantages over ice cover; for example, its start and end dates are an important ice characteristic. However, it is not always possible to determine the ice-free period for a large area of the sea since ice rarely disappears over its entire water area. In addition, climate change has led to the boundaries of some previously identified areas not fully corresponding to parts of the sea with uniform ice conditions. Warming in the Arctic has led to the southern waters of the Laptev Sea and the southwest of the East Siberian Sea becoming free of ice almost every year in recent decades, while in their northern part the ice-free period does not occur in some years. Therefore, for a more accurate dating of the ice-free period for the Laptev and East Siberian seas, this article proposes making some additions to the traditional zoning. The increase in the duration of the ice-free period in different parts of the seas began at different times, on average around 2000. To describe this process in the article, the time period from 1991 to 2023 was divided into three equal eleven-year periods. For each of them, the values of the duration of the ice-free period were calculated. The data analysis showed that the duration of the ice-free period in all parts of the Arctic seas in the second period (2002–2012) increased significantly compared to the first period (1991–2001). The increase ranged from 13 to 88 days, depending on the area of the sea. Over the past 11 years (2013–2023), the duration of the ice-free period in the Kara, Laptev, and northwestern part of the East Siberian Sea has increased by 8–18 days compared to the second time interval (2002–2012). In the southwestern and eastern parts of the East Siberian Sea, as well as in the Chukchi Sea, the ice-free period has not increased over the past 11 years, although compared to the first time period (1991–2001), it remains quite large.

Keywords: Arctic seas, beginning of freezing, disappearance of ice, ice-free period

For citation: Porubaev V.S., Mochnova L.P. Change in the duration of the ice-free period in the Arctic seas from 1991 to 2023. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):147–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-147-163>

Received 16.09.2024

Revised 01.11.2024

Accepted 02.04.2025

Введение

В настоящее время в арктических морях интенсивно развивается хозяйственная деятельность. Увеличиваются грузоперевозки по Северному морскому пути (СМП), расширяется деятельность по добыче углеводородов на шельфе арктических морей [1]. Это обуславливает активизацию исследования ледовых и гидрометеорологических условий на трассе СМП и в прилегающих районах Арктики. Продолжительность безледного периода — одна из важных характеристик ледовых условий, и знание о нем для различных районов морей позволяет планировать плавание судов низких ледовых классов в акватории СМП, в оптимальные сроки проводить инженерно-геологические изыскания и разведочное бурение. Так, для Карского моря

рассмотрена межгодовая изменчивость безледного периода в районе перспективных углеводородных структур в юго-западной части моря и показано, что средняя продолжительность безледного периода в этом районе за последние 10 лет существенно увеличилась [2]. По спутниковым данным микроволнового диапазона рассмотрена продолжительность безледного периода в прибрежной зоне Карского моря и в море Лаптевых, и так же отмечено увеличение продолжительности безледного периода в последние десятилетия [3, 4]. Показаны особенности таяния ледяного покрова и в районе Канадского Арктического архипелага [5–8]. Ледовые фазы, в частности даты очищения ото льда и начала замерзания, которые и определяют продолжительность безледного периода, являются важной составляющей процессов в арктических морях. Эти вопросы рассматриваются в ряде работ для моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей [9–12].

Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода тесно связана с изменениями климата. Исследованию климата на основе ледовых наблюдений всегда уделялось большое внимание. Ряд авторов делает обоснованный вывод, что в арктическом регионе Земли основные изменения состояния ледяного покрова происходят под воздействием естественных факторов, которые превышают антропогенное воздействие на климат [13]. Обстоятельно проведены исследования изменчивости ледовых условий различных пространственных и временных масштабов в последней четверти XX в. в шельфовой зоне морей Баренцева и Карского [14]. Изучены и показаны климатические изменения ледовых условий, произошедшие в конце XX — начала XXI в. в азиатской части России, включая арктические и дальневосточные моря [15].

Состояние изученности ледовых условий в арктических морях России с середины прошлого века до двадцатых годов текущего века подробно описано в работе Е.У. Миронова [16]. Другие близкие исследования включают в себя описание характеристик климатических изменений ледовитости в российских арктических морях [17], вопросы нарастания и таяния ледяного покрова [18, 19], особенности эволюции ледяного покрова в современном климатическом периоде [20, 21].

Климатические изменения, а также запросы на обеспечение хозяйственной деятельности определяют актуальность исследования ледовых и гидрометеорологических условий в Арктике, важную роль в которых играет продолжительность безледного периода в морях России, анализ межгодовой изменчивости которого за последние десятилетия и является целью данной работы.

Исходные данные

Для определения дат очищения морей и сроков начала ледообразования использованы обзорные ледовые карты ААНИИ, построенные по спутниковым снимкам с дискретностью по времени 1 неделя. Ряд наблюдений, использованный в работе, охватывает период с 1991 по 2023 г. С 1991 по 1996 г. данные были сняты с ледовых карт, хранящихся в фондах ААНИИ. Ледовые карты за период с 1997 по 2023 г. в формате SEAGRIDS-3 размещены на сайте (http://old.aari.ru/odata/_d0015.php). Для зимнего периода распределение ледяного покрова представлено в виде возрастного состава (общая и частная сплоченность льдов разного возраста), для летнего периода на картах представлена информация о распределении сплоченности льда.

Особенности районирования акватории арктических морей в современных климатических условиях

Безледный период для всего моря определить не всегда возможно, так как лед редко исчезает на всей его акватории. Поэтому для определения ледовых характеристик, в том числе безледного периода, используется районирование акватории морей. Разделение акватории морей на части в зависимости от задач исследования имеет давнюю традицию. Вопросы деления акватории арктических морей по ледовым условиям рассматривались такими исследователями Арктики, как А.В. Колчак, В.Ю. Визе, Н.Н. Зубов и другими. Районирование позволяет учитывать географические и ледовые особенности арктических морей. В работе Д.Б. Карелина [22] подчеркнута важность учета географических особенностей морей и обращается внимание на необходимость сравнительной оценки ледовых условий одного района с другим. Также отмечено, что «северная часть моря Лаптевых является по существу заливом Ледовитого океана», южная же часть подвержена воздействию теплых вод сибирских рек и характеризуется преобладающим выносом льда в северном направлении. В этой же работе говорится, что на западе Восточно-Сибирского моря в летний период лед стаивает и обычно отступает севернее Новосибирских островов. Однако разделение акватории моря Лаптевых, а также западной части Восточно-Сибирского моря по принципу север–юг не нашло отражения в последующем районировании. В настоящее время в ААНИИ используется традиционное районирование, где в Карском море выделены юго-западная и северо-восточная части, в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском выделены западные и восточные части. В Чукотском море российская акватория моря разделена на северную и южную части.

Важными характеристиками ледяного покрова являются ледяные массивы, которые играют большую роль в районировании акватории морей. Понятие о ледяных массивах (лед сплоченностью 7–10 баллов) сформулировал еще в 1945 г. П.А. Гордиенко [23], в этой же работе показана схема расположения ледяных массивов. Определение ледяных массивов, их названия и схема расположения практически не претерпели изменений в современной научной литературе.

Потепление в Арктике, происходящее в последние десятилетия, привело к тому, что определить безледный период для некоторых частей моря согласно традиционному районированию можно весьма приблизительно. Проблема в том, что за последние десятилетия очищение южной части морей происходило гораздо раньше, чем северной акватории. Нередки случаи, когда в отдельные годы в некоторых морях в южной части происходило полное очищение, а в северной их части лед оставался до начала нового замерзания. К таким частям относятся запад и восток моря Лаптевых, а также запад Восточно-Сибирского моря. Продолжительность безледного периода и ледовитость, определенные по традиционному районированию, не всегда отражают реальную ледовую ситуацию.

Для более точного определения характеристик безледного периода возникла необходимость для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, не изменяя границ прежних районов [24], сделать дополнительное разделение (рис. 1). При дополнительном районировании три традиционных района — западная и восточная части моря Лаптевых и западная часть Восточно-Сибирского моря — были разделены на южные и северные части. Границы районов Карского и Чукотского морей, а также восток Восточно-Сибирского моря остались прежними. В Чукотском море его северная часть в традиционном районировании не всегда используется, и ледовитость в ней в настоящее время не определяется.

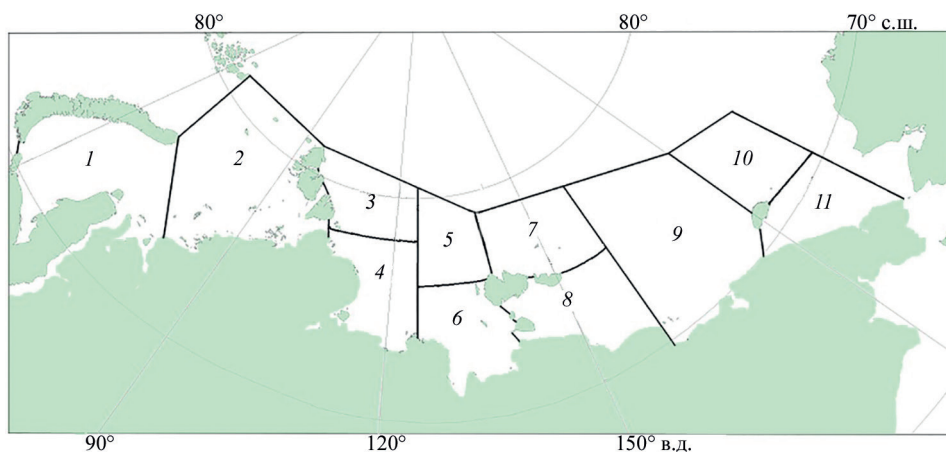


Рис. 1. Границы арктических морей и их районов.

1 — юго-запад Карского моря, 2 — северо-восток Карского моря, 3 — северо-запад моря Лаптевых, 4 — юго-запад моря Лаптевых, 5 — северо-восток моря Лаптевых, 6 — юго-восток моря Лаптевых, 7 — северо-запад Восточно-Сибирского моря, 8 — юго-запад Восточно-Сибирского моря, 9 — восточная часть Восточно-Сибирского моря, 10 — северо-запад Чукотского моря, 11 — юго-запад Чукотского моря

Fig. 1. The boundaries of the Arctic seas and their regions.

1 — southwest of the Kara Sea, 2 — northeast of the Kara Sea, 3 — northwest of the Laptev Sea, 4 — southwest of the Laptev Sea, 5 — northeast of the Laptev Sea, 6 — southeast of the Laptev Sea, 7 — northwest of the East Siberian Sea, 8 — southwest of the East Siberian Sea, 9 — eastern part of the East Siberian Sea, 10 — northwest of the Chukchi Sea, 11 — southwest of the Chukchi Sea

Дополнительное разделение акватории моря на части дает возможность более точно определить начало безледного периода в районах моря, однако в теплое время года небольшое количества льда может оставаться в море до начала нового замерзания. Поэтому дата очищения ото льда определяется при некотором допуске. В этой работе сроком очищения акватории ото льда считалась дата, когда площадь льда любой сплоченности в рассматриваемом районе составляла менее 3 баллов.

В настоящее время для оценки продолжительности безледного периода часто используется 15 % пороговый метод [3–5]. Учитывая, что в период максимального стаивания лед остается в основном на периферии моря и имеет небольшую сплоченность, критерий менее 3 баллов дает результаты, близкие к результатам, полученным при использовании 15 % порогового метода. Использование 15 % метода может приводить к тому, что при небольшом количестве льда на периферии начало безледного периода в море в некоторых случаях определяется слишком поздно или не определяется совсем.

Межгодовая изменчивость сроков очищения и начала замерзания в районах арктических морей за период с 1991 по 2023 г.

Арктические моря и их районы расположены в различных географических и климатических зонах Арктики, что определяет в них ледовые условия. Климатические особенности, характерные для определенного ряда лет, проявляются в ледовых условиях морских регионов. В частности, региональный климат определяет продолжительность безледного периода в различных районах морей.

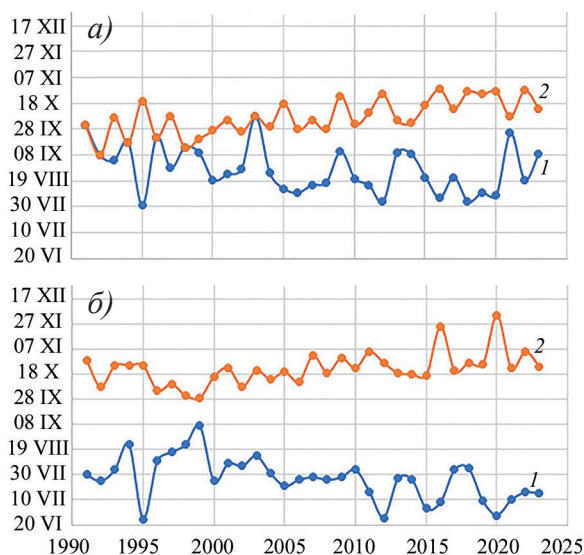


Рис. 2. Даты очищения ото льда и начала ледообразования в северо-восточной (а) и юго-западной (б) частях Карского моря.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 2. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the northeastern (a) and southwestern parts (b) of the Kara Sea.

1 — dates of ice clearing, 2 — dates of the beginning of ice formation

На рис. 2 показано межгодовое изменение дат очищения ото льда и сроков начала ледообразования в северо-восточной и юго-западной частях Карского моря, на которые море разделено согласно традиционному районированию. Зоны льда в период таяния в этих районах хотя и имеют некоторую локальную привязку, но их положение зависит во многом от переменного направления воздушных потоков. Поэтому нет необходимости в разделении акватории Карского моря на дополнительные части. Одним из проявлений климатических изменений в северо-восточной части моря является то, что безледный период с 2004 г. стал отмечаться ежегодно. В юго-западной части моря на рассматриваемом временном интервале безледный период имел место всегда, а климатические изменения проявляются в более ранних датах очищения ото льда и более поздних сроках начала замерзания.

На рис. 3 показаны графики дат очищения ото льда и начала замерзания в дополнительно выделенных частях запада моря Лаптевых. В северо-западной части моря нередко очищение ото льда не происходило. Причиной этого является Таймырский ледяной массив, который распространяется на эту часть моря Лаптевых. В юго-западной части моря начиная с 2008 г. очищение происходило ежегодно, его продолжительность характеризовалась большой амплитудой. Амплитуда сроков начала замерзания в обеих частях моря значительно меньше, чем амплитуда сроков очищения ото льда.

В северо-восточной части моря Лаптевых очищение ото льда в отдельные годы не происходило, в то время как в его юго-восточной части оно имело место всегда, кроме 1996 г., хотя здесь расположен Янский ледяной массив (рис. 4). Основное

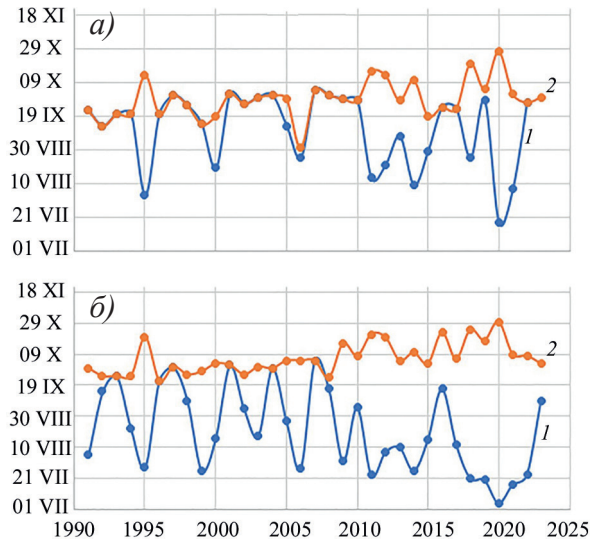


Рис. 3. Даты очищения и начала ледообразования в северо-западной (а) и юго-западной (б) частях моря Лаптевых.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 3. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the northwestern (a) and southwestern parts (b) of the Laptev Sea.

1 — dates of ice clearing, 2 — the dates of the beginning of ice formation

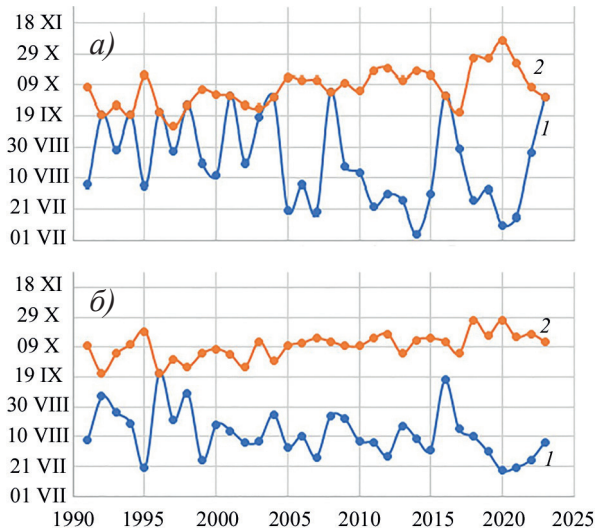


Рис. 4. Даты очищения и начала ледообразования в северо-восточной (а) и юго-восточной (б) частях моря Лаптевых.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 4. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the north-eastern (a) and south-eastern parts (b) of the Laptev Sea.

1 — dates of ice clearing, 2 — the dates of the beginning of ice formation

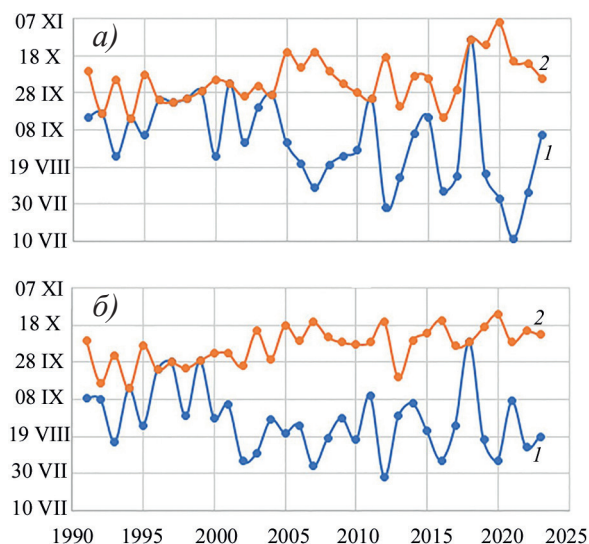


Рис. 5. Даты очищения и начала ледообразования в северо-западной (а) и юго-западной (б) частях Восточно-Сибирского моря.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 5. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the northwestern (a) and southwestern parts (b) of the East Siberian Sea.

1 — dates of ice clearing, 2 — the dates of the beginning of ice formation

влияние на таяние льда в юго-восточной части моря Лаптевых оказывают воды сибирских рек и воздушные потоки с континента в теплый период года. В северо-восточной части моря отмечалась сравнительно большая амплитуда сроков очищения ото льда, по сравнению с которой амплитуда сроков начала замерзания в этой части моря и амплитуда сроков очищения и начала замерзания в юго-восточной части моря были значительно меньше.

Межгодовая изменчивость сроков очищения ото льда и начала замерзания в северо-западной и юго-западной частях Восточно-Сибирского моря показана на рис. 5. В северо-западной части этого моря безледный период в отдельные годы, особенно в первые 15 лет, нередко отсутствовал. В юго-западной части Восточно-Сибирского моря безледный период начиная с 2000 г. наблюдался, кроме 2018 г., постоянно, хотя здесь располагается Новосибирский ледяной массив. Причиной этого являются воздушные потоки с континента в теплое время года, как и в юго-восточной части моря Лаптевых.

На рис. 6 показана межгодовая изменчивость сроков очищения и начала замерзания в восточной части Восточно-Сибирского моря. Как видно из рисунка, безледный период в этой части моря не наблюдался с начала рассматриваемого временного интервала до 2004 г. В последующие годы безледный период был незначительным, а в ряде лет вообще отсутствовал, что является следствием расположенного здесь Айонского массива. Потепление климата проявилось в том, что с 2005 г. акватория в этой части моря в отдельные годы стала очищаться ото льда.

На рис. 7 показано межгодовое изменение сроков очищения и начала замерзания в северо-западном и юго-западном районах Чукотского моря. Эти два района относятся к российской части моря.

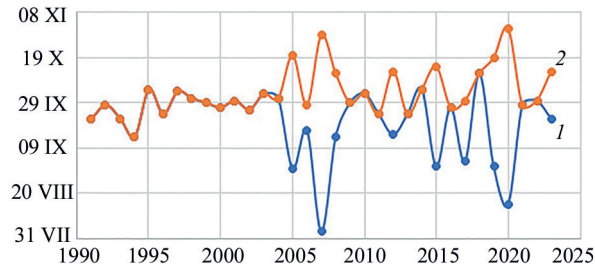


Рис. 6. Даты очищения и начала ледообразования в восточной части Восточно-Сибирского моря.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 6. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the eastern part of the East Siberian Sea

1 — dates of ice clearing, 2 — the dates of the beginning of ice formation

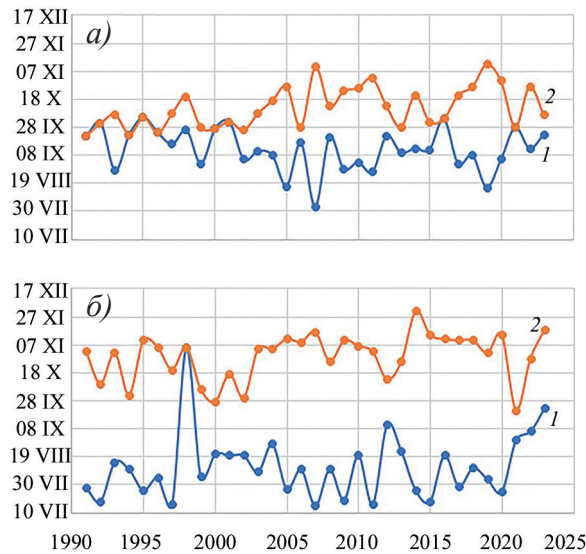


Рис. 7. Даты очищения ото льда и начала ледообразования в северо-западной (а) и юго-западной (б) частях Чукотского моря.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 7. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the northwestern (a) and southwestern (b) parts of the Chukchi Sea.

1 — dates of ice clearing, 2 — the dates of the beginning of ice formation

Главное отличие безледного периода в этих районах Чукотского моря в его продолжительности. В северо-западной части моря в первые одиннадцать лет рассматриваемого временного интервала безледный период был мал либо его не было совсем. В последующем, начиная с 2002 г., безледный период здесь отмечался в большинстве лет, но имел небольшую продолжительность. В юго-западной части моря безледный период имел место всегда, кроме 1998 г., продолжительность его была значительно больше, чем в северо-западной части, что определяется ее южным положением и влиянием теплых воздушных потоков со стороны Тихого океана.

Сроки очищения ото льда и начала замерзания, продолжительность безледного периода в районах арктических морей с 1991 по 2023 г.

В табл. 1 приведены средние и экстремальные даты очищения районов арктических морей ото льда. Средние даты очищения во всех частях морей приходятся в основном на август и изменяются от 26 июля до 6 сентября. Стандартное отклонение изменяется от 12 до 21 дня в зависимости от района моря.

Раньше других ото льда освобождается юго-западная часть Карского моря. Очищение ото льда здесь в среднем происходит в конце июля, наиболее раннее отмечено в конце июня, а самое позднее — в первой декаде сентября. Сравнительно раннее очищение ото льда этой акватории объясняется проникновением теплых атлантических вод из Баренцева моря и южным положением этой части моря.

Наиболее поздние средние сроки очищения ото льда наблюдаются на востоке Восточно-Сибирского моря и в северной части Чукотского моря, которые в среднем приходятся на начало сентября. Экстремально раннее очищение в этих частях морей отмечено в начале августа, а экстремально позднее произошло в третьей декаде сентября. Эти два соседних района граничат с Арктическим бассейном и удалены от Атлантического и Тихого океанов, что определяет здесь поздние сроки очищения ото льда.

В остальных районах арктических морей средние даты очищения приходятся на август, а экстремально ранние отмечались в июле. Экстремально позднее очищение ото льда происходило во всех морях только в сентябре.

Особенностью сроков начала замерзания в арктических морях является то, что в большинстве частей арктических морей средние даты начала замерзания отмечаются в октябре (табл. 2). Только в северо-западной части моря Лаптевых средняя дата замерзания приходится на конец сентября, что обусловлено географическим положением этого района и расположенным здесь Таймырским ледяным массивом.

Экстремально раннее начало ледообразования во всех частях морей начиналось в августе, кроме северо-запада моря Лаптевых, где оно отмечалось в сентябре. Здесь увеличение площади ледяного покрова в 2006 г. началось в конце августа вследствие выноса льдов из Арктического бассейна.

Экстремально позднее начало замерзания льда в частях морей имеет большой разброс по времени в зависимости от их географического положения и гидрометеорологических условий конкретного года.

Стандартное отклонение сроков начала замерзания изменяется от 9 до 17 дней и в среднем составляет 12 дней, что меньше по сравнению со стандартным отклонением дат очищения акватории ото льда, которое составляет в среднем 16 дней.

На продолжительность безледного периода оказывают влияние различные факторы, такие как температурный режим атмосферы, дрейф льда, теплозапас моря, наличие остаточных льдов. Численные характеристики продолжительности безледного периода в районах арктических морей приведены в табл. 3. Наибольшая средняя продолжительность безледного периода имеет место на юго-западе Карского и на юге Чукотского морей. В этих же районах была отмечена наибольшая максимальная продолжительность безледного периода, которая в Карском море составила более пяти месяцев, а в Чукотском более четырех, что объясняется близостью теплых вод Атлантического и Тихого океанов.

Таблица 1

**Средние и экстремальные сроки очищения акватории ото льда
в различных частях морей за период с 1991 по 2023 г.**

Table 1

**Average and extreme times for ice clearing
in different parts of the seas for the period from 1991 to 2023**

Часть моря	Экстремально ранние даты очищения ото льда	Средние даты очищения ото льда	Экстремально поздние даты очищения ото льда	Стандартное отклонение сроков очищения, дни
Северо-восток Карского	31.07	22.08	25.09	14
Юго-запад Карского	25.06	26.07	07.09	17
Северо-запад Лаптевых	18.07	21.08	28.09	19
Юго-запад Лаптевых	05.07	12.08	17.09	21
Северо-восток Лаптевых	05.07	06.08	18.09	18
Юго-восток Лаптевых	18.07	10.08	17.09	15
Северо-запад Восточно-Сибирского	11.07	21.08	20.09	17
Юго-запад Восточно-Сибирского	28.07	22.08	10.09	12
Восток Восточно-Сибирского	03.08	02.09	22.09	15
Север Чукотского	02.08	06.09	26.09	13
Юг Чукотского	15.07	08.08	23.09	18

Таблица 2

**Средние и экстремальные сроки замерзания акватории
в различных частях морей за период с 1991 по 2023 г.**

Table 2

**Average and extreme periods of freezing of water areas
in different parts of the seas for the period from 1991 to 2023**

Часть моря	Экстремально ранние даты начала замерзания	Средние даты начала замерзания	Экстремально поздние даты начала замерзания	Стандартное отклонение сроков начала замерзания, дни
Северо-восток Карского	08.09	07.10	29.10	14
Юго-запад Карского	29.09	22.10	04.12	13
Северо-запад Лаптевых	31.08	28.09	27.10	11
Юго-запад Лаптевых	22.09	06.10	30.10	10
Северо-восток Лаптевых	12.09	06.10	06.11	12
Юго-восток Лаптевых	22.09	09.10	27.10	9
Северо-запад Восточно-Сибирского	14.09	04.10	05.11	12
Юго-запад Восточно-Сибирского	14.09	06.10	24.10	10
Восток Восточно-Сибирского	14.09	03.10	01.11	11
Север Чукотского	22.09	11.10	12.11	15
Юг Чукотского	21.09	29.10	01.12	17

Наименьшая средняя продолжительность безледного периода наблюдается в северо-западной части моря Лаптевых и в восточной части Восточно-Сибирского моря, которая составляет 17 и 13 дней соответственно. Причиной непродолжительного безледного периода являются расположенные здесь большие ледяные массивы — Таймырский и Айонский, в состав которых входят остаточные двухлетние и многолетние льды. В северной части Чукотского моря безледный период несколько больше и в среднем составляет 30 дней, хотя здесь расположен Чукотский Северный ледяной массив. В отдельные годы в состав этого массива входят старые льды, что влияет на сроки очищения ото льда.

Сравнительно небольшой средний безледный период отмечается в северо-западной части Восточно-Сибирского моря, он составляет 32 дня, несмотря на то что ледяного массива здесь нет. Сказывается влияние Арктического бассейна и близость Айонского массива, который в отдельные годы распространяется и на северо-запад Восточно-Сибирского моря.

На фоне потепления климата Арктики кроме ледяных массивов на продолжительность безледного периода влияют и другие факторы. Например, в юго-восточной части моря Лаптевых в холодное время года формируется Янский ледяной массив, но продолжительность безледного периода здесь составляет 68 дней, что заметно выше, чем в соседних частях арктических морей (см. табл. 3). На очищение ото льда здесь влияют преобладающие воздушные потоки с континента в теплое время года и большой речной сток [22].

На северо-востоке моря Лаптевых ледяного массива нет, но средняя продолжительность безледного периода здесь практически такая же, как на северо-востоке Карского, на юго-западе Лаптевых и юго-западе Восточно-Сибирского морей (см. табл. 3). Близкие значения продолжительности безледных периодов, которые здесь составляют от 40 до 47 дней, обусловлены влиянием различных факторов, таких как ледяные массивы, направление воздушных потоков, температурный режим атмосферы и другие.

Для достоверной оценки климатических изменений необходимо учитывать минимальный ряд лет, по которому проводится оценка. Для оценки состояния климата было предложено использовать осредненные ледовые и гидрометеорологические характеристики за периоды не менее 10 лет [25]. Аномальные характеристики состояния ледяного покрова или атмосферы в конкретный год могут свидетельствовать только о межгодовой изменчивости явления. В нашем случае тридцатитрехлетний ряд ежегодных значений продолжительности безледного периода было удобно разделить на три одиннадцатилетних временных интервала, чтобы получить по ним климатические оценки.

Анализ данных показал, что средняя продолжительность безледного периода с 1991 г. за каждые последующие одиннадцатилетние периоды изменялась. По сравнению с первым периодом (1991–2001 гг.) во втором периоде (2002–2012 гг.) она существенно увеличилась. В среднем по всем районам увеличение составило около 20 дней.

В третьем периоде (2013–2023 гг.) по сравнению со вторым продолжительность безледного периода в морях Карском и Лаптевых, а также в северо-западной части Восточно-Сибирского моря увеличилась в среднем на 15 дней. На юго-западе Восточно-Сибирского моря, в его восточной части и в Чукотском море произошло незначительное уменьшение безледного периода, хотя по сравнению с первым периодом (1991–2001 гг.) он остался большим.

Таблица 3
Table 3

Продолжительность безледного периода в российских арктических морях
Duration of the ice-free period in the Russian Arctic seas

Часть моря	Продолжительность безледного периода по 33-летнему ряду				Средняя продолжительность безледного периода по одиннадцатилетним периодам			Изменение продолжительности безледного периода между периодами по 11 лет	
	Мини-мальная	Средняя	Макси-мальная	Стандартное отклонение	1991–2001 (1)	2002–2012 (2)	2013–2023 (3)	Между (1) и (2)	Между (2) и (3)
Северо-восток Карского	0	41	85	28	22	45	55	23	10
Юго-запад Карского	22	88	159	27	69	88	106	19	18
Северо-запад Лаптевых	0	17	101	28	9	13	29	3	17
Юго-запад Лаптевых	0	46	117	34	28	42	69	13	28
Северо-восток Лаптевых	0	47	118	38	25	50	65	25	15
Юго-восток Лаптевых	0	68	101	23	45	62	70	17	8
Северо-запад	0	32	96	30	9	38	49	29	11
Восточно-Сибирского									
Юго-запад	0	40	84	24	20	54	47	34	–7
Восточно-Сибирского									
Восток Восточно-Сибирского	0	13	87	24	0	19	20	19	1
Север Чукотского	0	30	100	27	10	44	34	34	–10
Юг Чукотского	0	79	128	31	70	83	84	13	–1

Обсуждение результатов

Вопросы, связанные с характеристиками безледного периода в арктических морях, рассматривались во многих работах. Больше всего работ опубликовано по юго-западной части Карского моря. Однако сравнение результатов не всегда возможно, потому что в разных работах используются разные критерии и различные исходные данные. В работах [18, 19] сведения об очищении ото льда и сроках устойчивого ледообразования представлены в виде изолиний дат ледовых фаз, а не в виде численных характеристик. В работах [3, 4] использованы спутниковые снимки микроволнового диапазона с разрешением 25 км, что приводит к большим погрешностям при определении продолжительности безледного периода.

В более ранней работе Е.У. Миронова с соавторами [2] продолжительность безледного периода определялась в конкретных точках центральной части юго-запада Карского моря по снимкам видимого и инфракрасного диапазонов с разрешением 1 км. Средняя продолжительность безледного периода по этим данным за двадцать лет (1989–2008 гг.) составила 90 дней. В данной работе также были использованы спутниковые снимки видимого и инфракрасного диапазонов, но безледный период определялся для всей акватории юго-западной части моря, и средняя продолжительность его здесь за близкий ряд лет (1991–2008 гг.) составила 73 дня. За следующее десятилетие (2009–2018 гг.) средняя продолжительность безледного периода по предыдущим данным [2] составила 132 дня, по вновь полученным нами данным за этот же период — 99 дней.

Продолжительность безледного периода в первом и втором случаях у нас оказалась меньше, чем в предыдущей работе [2], на 17 и 33 дня соответственно. Это объясняется тем, что мы провели расчет по данным для всей акватории, включая прибрежные и северные районы юго-западной части моря, где очищение ото льда происходит позже, а замерзание начинается раньше по сравнению с центральной частью моря, что и определило более короткий безледный период.

Известны значения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря, полученные для пяти наборов спутниковых данных микроволнового диапазона [3]. Для юго-западной части Карского моря полученная продолжительность безледного периода изменится от 74 до 101 дня в зависимости от набора данных.

Все результаты по юго-западной части Карского моря, приведенные в упомянутых работах, относятся к различной площади, рассчитаны по различным временным интервалам, в расчетах использованы спутниковые данные с различными пространственными разрешениями, что затрудняет сравнение полученных результатов. Анализ полученных результатов в разных работах дает лишь оценку продолжительности безледного периода для различных временных интервалов и для различных районов юго-западной части Карского моря.

Заключение

Анализ межгодового изменения продолжительности безледного периода показал, что за последние десятилетия в большинстве районов арктических морей произошло значительное его увеличение. Даты очищения ото льда имеют тенденцию к более раннему, а сроки замерзания к более позднему их наступлению, в результате чего продолжительность безледного периода увеличивается. В различных частях морей увеличение продолжительности безледного периода началось в разное время и пришлось в основном на первое десятилетие этого столетия.

В среднем в северных частях морей продолжительность безледного периода, рассчитанная по 33-летнему ряду, изменяется от 17 до 47 дней, а в южных — от 40 до 88 дней, в зависимости от районов моря. Таймырский и Айонский ледяные массивы оказывают большое влияние на продолжительность безледного периода. В тех частях морей, где расположены ледяные массивы, продолжительность безледного периода небольшая. В северо-западной части моря Лаптевых она составляет 17, а на востоке Восточно-Сибирского моря 13 дней.

Важной особенностью безледного периода в арктических морях является то, что за последние одиннадцать лет, как и за одиннадцать предыдущих, его средняя продолжительность увеличилась в морях Карском, Лаптевых и в северо-западной части Восточно-Сибирского моря (см. табл. 3). В юго-западной и восточной частях Восточно-Сибирского моря, а также в Чукотском море за последние одиннадцать лет средняя его продолжительность не увеличилась, а в основном несколько уменьшилась.

Конфликт интересов. Авторы не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках НИТР 5.1.2 Росгидромета на 2020–2024: «Развитие существующих и разработка новых методов и технологий долгосрочного (месячного и сезонного) прогнозирования элементов ледово-гидрологического режима арктических морей, низовьев и устьевых областей рек в условиях климатических изменений». Тема 252625.

Competing interests. The authors have no conflict of interest.

Funding. The research was carried out within the framework of the Scientific and Technical Project 5.1.2 of Roshydromet for 2020–2024: “Development of existing and new methods and technologies for long-term (monthly and seasonal) forecasting of elements of the ice-hydrological regime of the Arctic seas, lower reaches and estuarine areas of rivers in the context of climate change”, theme 252625.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ерохин В.Л. Динамика грузоперевозок по Северному морскому пути (2013–2023 гг.). *Маркетинг и логистика*. 2023;6(50):14–23.
Erokhin V.L. Dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route (2013–2023). *Marketing i logistika = Marketing and logistics*. 2023;6(50):14–23. (In Russ.).
2. Сочнев О.Я., Корнишин К.А., Ефимов Я.О., Миронов Е.У., Порубаев В.С. Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода в юго-западной части Карского моря. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019;65(3):239–254. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-3-239-254>
Sochnev O.Ya., Kornishin K.A., Yefimov Ya.O., Mironov Ye.U., Porubayev V.S. Interannual variability of the ice-free period duration in the southwestern Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2019;65(3):239–254. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-3-239-254>
3. Шабанов П.А. Изменения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным. *Океанология*. 2022;62(4):518–531. <https://doi.org/10.31857/S0030157422040104>
Shabanov P.A. Ice-free period duration changes in the coastal zone of the Kara Sea using satellite data. *Okeanologiya = Oceanology*. 2022;62(4):518–531. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0030157422040104>
4. Shabanov P.A., Baranskaya A.V. Extension of the ice-free period in the Laptev Sea according to remote sensing data. *Oceanology*. 2023;63(1):11–22. <https://doi.org/10.1134/S0001437023070184>

5. Peng G., Steele M., Bliss A. et al. Temporal means and variability of Arctic sea ice melt and freeze season climate indicators using a satellite climate data record. *Remote Sensing*. 2018;10(9):1328–1353. <https://doi.org/10.3390/rs10091328>
6. Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *The Cryosphere*. 2012;6:881–889. <https://doi.org/10.5194/tc-6-881-2012>
7. Howell S., Duguay C., Markus T. Sea ice conditions and melt season duration variability within the Canadian Arctic Archipelago: 1979–2008. *Geophysical Research Letters*. 2009;36(10):1–6. <https://doi.org/10.1029/1009GL037681>
8. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Malanik J., Barrett A.P. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change*. 2012;110:1005–1027. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>
9. Егоров А.Г. Летняя кромка льдов и осенние сроки устойчивого ледообразования в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в 1981–2018 гг. *Лед и Снег*. 2021;61(1):117–127. <https://doi.org/10.31857/S2076673421010075>
Egorov A.G. Positions of the summer ice edge and autumn dates of stable ice formation in the Laptev, East-Siberian and Chukchi seas in 1981–2018. *Lёд i Снег = Ice and Snow*. 2021;61(1):117–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673421010075>
10. Егоров А.Г., Павлова Е.А. Изменение сроков устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в начале XXI в. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019;4(65):389–404. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>
Egorov A.G., Pavlova E.A. Changes in the time of stable ice formation in the Russia eastern Arctic seas of at the beginning of the 21st century. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2019;4(65):389–404. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>
11. Спичкин В.А. Основные природные факторы, определяющие аномалии сроков начала ледообразования в морях сибирского шельфа. *Труды АННИИ*. 1987;402:81–92.
Spichkin V.A. The main natural factors that determine the anomalies of the timing of the beginning of ice formation in the seas of the Siberian shelf. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proc. of AARI*. 1987;402:81–92. (In Russ.).
12. Егоров А.Г., Спичкин В.А. Метод локально-генетической типизации ледовых условий. *Труды АННИИ*. 1994;432:146–163.
Egorov A.G., Spichkin V.A. The method of local genetic typification of ice conditions. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proc. of AARI*. 1994;432:146–163. (In Russ.).
13. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледяного покрова морей евразийского шельфа. *Научные исследования в Арктике*. Т. 2. СПб.: Наука; 2007. 136 с.
14. Данилов А.И., Миронов Е.У., Спичкин В.А. (ред.). *Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей*. СПб.: ААННИ; 2004. 320 с.
15. Думанская И.О. *Ледовые условия морей азиатской части России*. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
16. Миронов Е.У. Состояние изученности ледовых условий. В кн. Ашик И.М. (ред.). *Моря российской Арктики в современных условиях*. СПб.: ААННИ; 2021. С. 41–44.
17. Юлин А.В., Климатические изменения площади льдов в Северном Ледовитом океане и в российских арктических морях. В кн. Ашик И.М. (ред.). *Моря российской Арктики в современных условиях*. СПб.: ААННИ; 2021. С. 132–164.
18. Егоров А.Г. Ледовые условия в период нарастания ледяного покрова. В кн. Ашик И.М. (ред.). *Моря российской Арктики в современных условиях*. СПб.: ААННИ; 2021. С. 142–163.

19. Юлин А.В. Ледовые условия в период таяния ледяного покрова. В кн. Ашик И.М. (ред.). *Моря российской Арктики в современных условиях*. СПб.: ААНИИ; 2021. С. 164–177.
20. Макаров А.С., Миронов Е.У., Иванов В.В., Юлин А.В. Ледовые условия морей Российской Арктики в связи с происходящими климатическими изменениями и особенности эволюции ледяного покрова в 2021 году. *Океанология*. 2022;62(6):845–856. <https://doi.org/10.31857/S0030157422050124>
 Makarov A.S., Mironov E.U., Ivanov V.V., Yulin A.V. Ice conditions of the Russian Arctic seas in connection with occurring climatic changes and peculiarities of ice cover evolution in 2021. *Oceanologiya = Oceanology*. 2022;62(6):845–856. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0030157422050124>
21. Юлин А.В., Тимофеева А.Б., Павлова Е.А., Шаратунова М.В., Хотченков С.В. Межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости российских арктических море в современном климатическом периоде. *Труды ГОИН*. 2019;220:44–60.
 Yulin A.V., Timofeeva A.B., Pavlova E.A., Sharatunova M.V., Khotchenkov S.V. Interannual and seasonal changes the ice cover in the Russian Arctic seas in the modern climatic period. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta = Proceedings of State Oceanographic Institute*. 2019;220:44–60. (In Russ.).
22. Карелин Д.Б. Учет географических особенностей районов, в кн. *Ледовая авиационная разведка*. М.; Л.: Главсевморпуть; 1946. С. 77–97.
23. Гордиенко П.А. О ледовых массивах арктических морей. *Проблемы Арктики*. 1945;1:94–97.
 Gordienko P.A. On the ice massifs of the Arctic seas. *Problemy Arktiki = Problems of Arctic* 1945;1:94–97. (In Russ.).
24. Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанникова А.В., Спичкин В.А. *Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей*. Л.: Гидрометеониздат; 1972. 348 с.
25. Монин А.С. *Прогноз погоды как задача физики*. М.: Наука; 1969. 184 с.