

## ЛЕДОВИТОСТЬ РОССИЙСКИХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ ТРАССЫ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ В СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТИЧЕСКИЙ ПЕРИОД

А. Б. Тимофеева, А. В. Юлин, В. В. Иванов, М. В. Шаратунова, Е. А. Павлова

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2023 г.

### Для цитирования

Тимофеева А. Б., Юлин А. В., Иванов В. В. и др. Ледовитость российских арктических морей трассы Северного морского пути в современный климатический период // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 1. — С. 135—146. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-135-146.

*Рассматривается ледовитость арктических морей Северного морского пути: Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского с 1946 г. Сопоставление многолетнего хода интегральных среднегодовых аномалий температуры воздуха и среднесезонных аномалий ледовитости позволяет выделить 2005 г., начиная с которого ледовитость морей резко сокращается, что хорошо согласуется с ростом и накоплением положительных аномалий температуры воздуха. Выявлено, что средний уровень ледовитости с 2005 г. снизился в 1,7 раза, однако значения размаха колебаний и среднеквадратического отклонения практически не изменились, т. е. ледовитость колеблется в том же диапазоне, но на более низком среднем уровне. Основные судоходные трассы очищаются примерно на три декады раньше. Повторяемость полного очищения морей возросла до 60–90%.*

**Ключевые слова:** ледовитость, Северный морской путь, СМП, российские арктические моря, сезонный ход ледовитости, сокращение ледяного покрова, увеличение продолжительности безледного периода.

### Введение

В настоящее время изучению ледяного покрова Северного Ледовитого океана (СЛО) уделяется пристальное внимание. Многочисленные исследования убедительно показали, что в связи с происходящими климатическими изменениями в последние десятилетия наблюдается резкое уменьшение ледяного покрова Арктики [1—6]. В ряде исследований неоднократно отмечался колебательный характер изменения площади льда в Северном Ледовитом океане [7—9]. Однако уменьшение ледовитости, начавшееся в 1980—1990-х годах и значительно усилившееся в начале XXI в., носит более глубокий характер по сравнению с предыдущим аналогичным периодом пониженной ледовитости в 1920—

1950-х годах [10]. Кроме изменений ледовитости наблюдаются серьезные изменения, происходящие в возрастном составе арктического морского льда [11; 12]. В течение XX в. на момент максимального развития ледяного покрова, в апреле, в СЛО наблюдалось преобладание старых и двухлетних льдов, однако в последние десятилетия отмечается устойчивое преобладание однолетних льдов [13]. Устоявшиеся сезонные характеристики и сезонные этапы развития ледяного покрова также претерпевают существенные изменения. В частности, в арктических морях наблюдаются смещение сроков начала ледообразования на более поздние, уменьшение интенсивности зимнего нарастания толщины льда и более раннее начало таяния [14—16]. Наибольшее сокращение ледяного покрова наблюдается в момент годового минимума, в сен-

тябре, на который приходится окончание периода таяния. Некоторые авторы полагают, что в будущем ледяной покров в арктических морях и даже в СЛО может полностью разрушаться в летнее время [17; 18]. Ледовитость арктических морей имеет хорошо выраженный сезонный ход. В зимний период арктические моря полностью покрыты дрейфующим и припайным льдом различной толщины, момент максимального развития ледяного покрова приходится на середину мая. Ледовитость морей зимой близка к 100%, а свободные ото льда участки образуются в основном за счет развития припайных полыней. В Карском и Чукотском морях обширные участки открытой воды часто образуются в районах проливов (Карские Ворота и Берингов) из-за поступления тепла из Атлантического и Тихоокеанского регионов. Процессы таяния начинаются в июне, интенсивно продолжаются в июле и августе и заканчиваются в сентябре, когда ледовитость постепенно снижается до сезонного минимума, после чего начинается новый цикл ледообразования [19]. В данной работе уделено внимание сезонной ледовитости в летний период.

### Материалы и методы

В статье использованы данные электронного архива ледовитости отдела ледового режима и прогнозов Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), синхронизированные с аналогичным электронным архивом отдела морских прогнозов Гидрометцентра России. Архив содержит информацию о круглогодичном распределении ледяного покрова в виде карт и количественных оценок ледовитости в арктических морях [20]. Для анализа изменчивости межгодовых значений температуры воздуха использованы данные Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) [21]. При расчете аномалий за норму приняты средние значения температуры за новый (последний) 30-летний период по рекомендации Всемирной метеорологической организации за 1991—2020 гг.

Мониторинг ледяного покрова в морях российской Арктики проводился в соответствии с методологией, разрабатывавшейся в АНИИ с начала 1930-х годов и описанной в «Руководстве по выполнению ледовой авиаразведки» 1981 г. [22]. С 1930-х до середины 1940-х годов сбор данных носил фрагментарный характер, а с середины 1940-х годов мониторинг стал регулярным [23]. С конца 1970-х годов выполнение ледовой авиаразведки постепенно прекратилось. Авиаразведка начала последовательно заменяться спутниковым мониторингом, который стал основным источником информации о ледяном покрове с 1990-х годов.

Следует отметить, что регион центральной Арктики не был охвачен ледовой авиаразведкой, поскольку она проводилась главным образом по мо-

рям вдоль трассы Северного морского пути (СМП) и в значительной степени ориентировалась на нужды судоходства [24]. Из-за этого границы и площади арктических морей для оценок ледяного покрова были приняты в несколько урезанном виде еще с конца 1930-х годов и продолжили так использоваться в дальнейшем, отличаясь от официальных границ морей, установленных позже [25]. Мониторинг ледовых условий, а также расчет характеристик ледяного покрова выполнялись в пределах этих районов (границ АНИИ). Для сохранения непрерывности длинных рядов наблюдений и возможности сопоставления современные результаты мониторинга также рассчитываются в пределах этих границ.

Площади морей в границах АНИИ: Карское — 830 тыс. км<sup>2</sup>, Лаптевых — 536 тыс. км<sup>2</sup>, Восточно-Сибирское — 770 тыс. км<sup>2</sup> и юго-западная часть Чукотского моря — 266 тыс. км<sup>2</sup>. Анализируемый параметр, ледовитость, понимается как отношение площади льда любой сплоченности к площади арктических морей (в данном случае к площади морей, принятых в границах АНИИ), приведенное в процентах [26]. В статье рассматривается ледовитость морей, по которым проходит трасса СМП: Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и юго-западной части Чукотского моря, выделенной как наиболее значимый район моря с активными судоходством и экономической деятельностью (далее — Чукотское море).

Доступный архив данных позволяет рассматривать непрерывные ряды наблюдений за ледовитостью морей вдоль СМП за каждую декаду месяца в период с июля по сентябрь. Для анализа были отобраны ряды наиболее достоверных данных одинаковой длины для каждого моря с 1946 по 2022 гг. (длина рядов данных составляет 77 лет). Данные были проанализированы с помощью статистических методов, проверены на стационарность по математическому ожиданию и дисперсии.

Для анализа использовалась среднесезонная ледовитость морей, осредненная за период июль-сентябрь. Этот параметр хорошо коррелирует с сентябрьским минимумом ледовитости и является более информативным показателем, чем просто минимальная ледовитость или ледовитость, взятая за отдельные летние месяцы. Физический смысл этого показателя связан с тем, что он характеризует всю величину сезонных изменений в отличие от среднемесячных значений.

### Результаты и обсуждение

Многие авторы [8; 9; 11; 27] описывали климатические колебания в Северном полушарии в течение XX в. как чередование периодов относительного «похолодания» и «потепления», которые сопровождались сменой температурного режима и соответственно повышенным фоном ледовитости либо уменьшением площади ледяного покрова. В связи

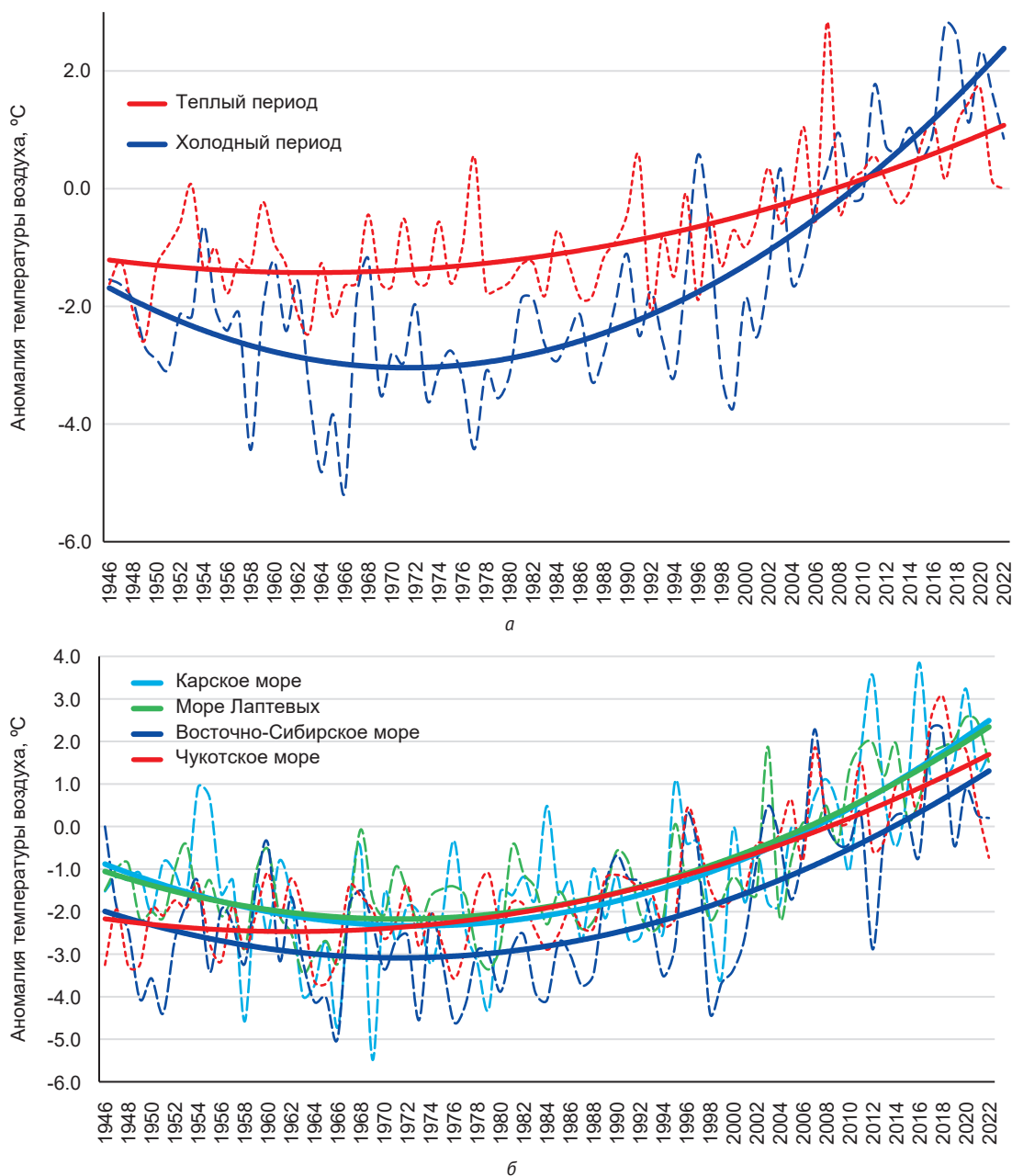


Рис. 1. Межгодовая изменчивость аномалий температуры воздуха: а – сезонных, взятых за холодный (октябрь-май) и теплый (июнь-сентябрь) периоды года для акватории четырех морей трассы СМП; б – годовых по каждому из рассматриваемых морей Fig. 1. Interannual variability of air temperature anomalies: a – seasonal, taken for the cold (October-May) and warm (June-September) periods of the year for the four seas of the NSR route; б – annual for each of the seas under consideration

с этим рассмотрена также межгодовая изменчивость температуры воздуха.

Изменчивость средних значений аномалий температуры воздуха за зимний и летний периоды года для четырех морей российской Арктики с 1946 по 2022 гг. представлен на рис. 1а. Следует отметить, что до начала 2000-х годов наблюдались преимущественно отрицательные аномалии температуры воздуха (относительно рассматриваемой нормы). Наиболее крупные понижения температуры отмечались в 1960-х годах, что соответствует периоду от-

носительного «похолодания». Как видно на графике, в течение этого периода устойчивые отрицательные аномалии температуры воздуха преобладали как в зимний, так и в летний сезоны. С начала 2000-х устойчивый фон с отрицательными аномалиями температуры воздуха сменился на положительный и охватил все сезоны года, при этом наибольший вклад в текущее потепление вносит холодный период года.

Годовые значения аномалий температуры воздуха отдельно для каждого из морей СМП пред-

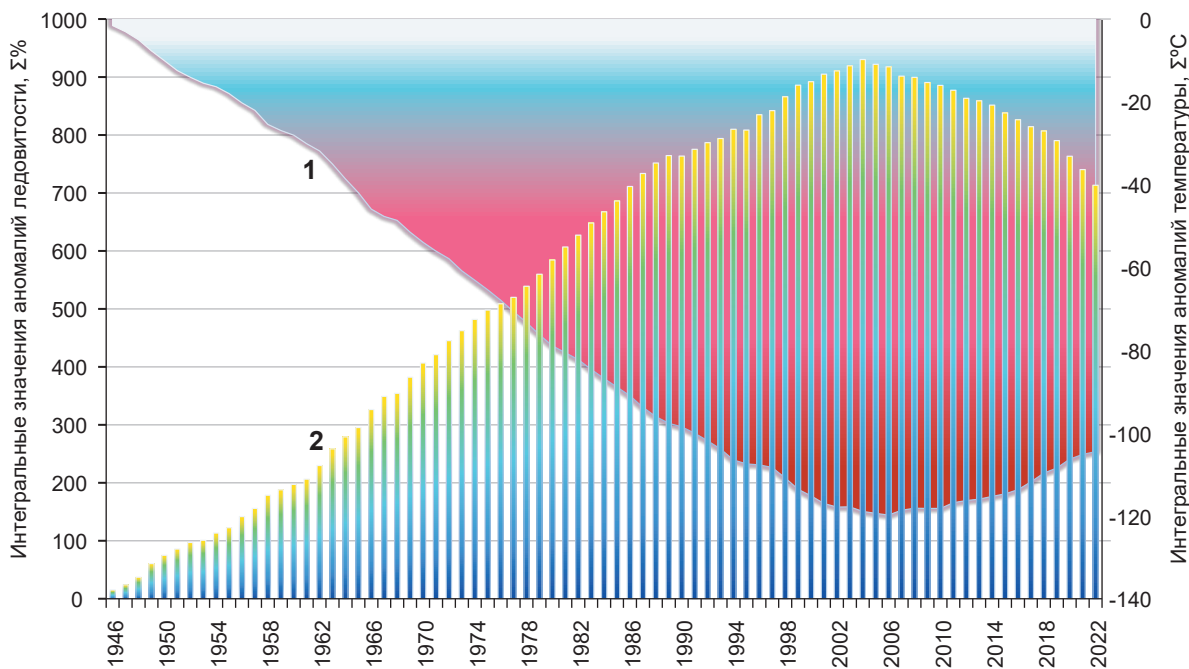


Рис. 2 Ход интегральных значений среднегодовых аномалий температуры воздуха (1) и аномалий ледовитости (2) за период с 1946 по 2022 гг.  
 Fig. 2 The course of integral values of mean annual air temperature anomalies (1) and ice cover anomalies (2) for the period 1946–2022

ставлены на рис. 16. Для всех морей характерен рост положительных аномалий температуры воздуха с начала 2000-х годов. Из графика следует, что наиболее холодным является Восточно-Сибирское море. Закономерности изменений температуры воздуха морей Карского и Лаптевых довольно схожи, а аномалии выше, чем у Восточно-Сибирского моря. Эти моря были теплее на протяжении всего исследуемого периода. Чукотское море также имеет более высокий фон температурных аномалий, чем Восточно-Сибирское. Однако в начале исследуемого периода аномалии температуры воздуха в этих морях сопоставимо низкие, что указывает на то, что в текущее «потепление» на трассе СМП наибольший вклад внесли процессы, происходящие в морях восточного сектора Арктики.

Представляет особый интерес совместный анализ многолетнего хода интегральных среднегодовых аномалий температуры воздуха в Северной полярной области с аномалиями среднесезонной ледовитости рассматриваемых арктических морей. Сопоставление хода интегральных среднегодовых аномалий показывает, что они хорошо согласуются и имеют хорошо выраженную обратную связь с коэффициентом парной корреляции  $-0,98$  (рис. 2). На рисунке ясно прослеживаются устойчивые периоды однородной направленности процесса накопления аномалий. Выделяется 2004 г., в котором отмечается наибольшее значение накопленных положительных аномалий ледовитости и отрицательных аномалий температуры воздуха. Начиная с 2005 г.

направленность процессов меняется: быстро и интенсивно накапливаются отрицательная аномалия ледовитости морей и положительная аномалия температуры воздуха. При этом в межгодовом ходе до 2005 г. тоже неоднократно наблюдались отрицательные аномалии ледовитости и положительные аномалии температуры воздуха, однако при накоплении они уравнивались значениями аномалий другого знака. Но с 2005 г. фиксируются весьма крупные по величине аномалии, при этом устойчиво и регулярно. Это и повлияло на смену направления накопления аномалий, что свидетельствует о серьезном изменении процессов.

То, что рост температуры воздуха и сокращение ледяного покрова в последние десятилетия происходят очень интенсивно, отмечают многие авторы. Некоторые из них [12; 16; 28] также особо выделяли значительные изменения в океанических и атмосферных процессах и положительную аномалию температуры воздуха начиная с 2005 г., поэтому в данном исследовании особое внимание уделено этому периоду.

Основные статистические характеристики для каждого из морей и общей для всех морей среднесезонной ледовитости представлены в табл. 1. Наибольшая межгодовая изменчивость ледовитости выявлена в море Лаптевых, размах колебаний составляет 85% со среднеквадратическим отклонением (СКО) 19,8%. Наименьшие колебания с размахом 58% и СКО 14,6% характерны для Чукотского моря.

Таблица 1. Основные статистические характеристики средней за летний сезон (июль-сентябрь) ледовитости арктических морей с 1946 по 2022 гг.

Table 1. Main statistical characteristics of the average summer season (July-September) ice cover in the Arctic seas from 1946 to 2022

Характеристика	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море	Общая ледовитость
Среднее, %	46	49	70	28	48
Минимум, %	9	3	25	3	10
Максимум, %	85	89	97	61	83
Размах колебаний, %	76	85	72	58	73
СКО, %	18,0	19,8	18,5	14,6	17,7

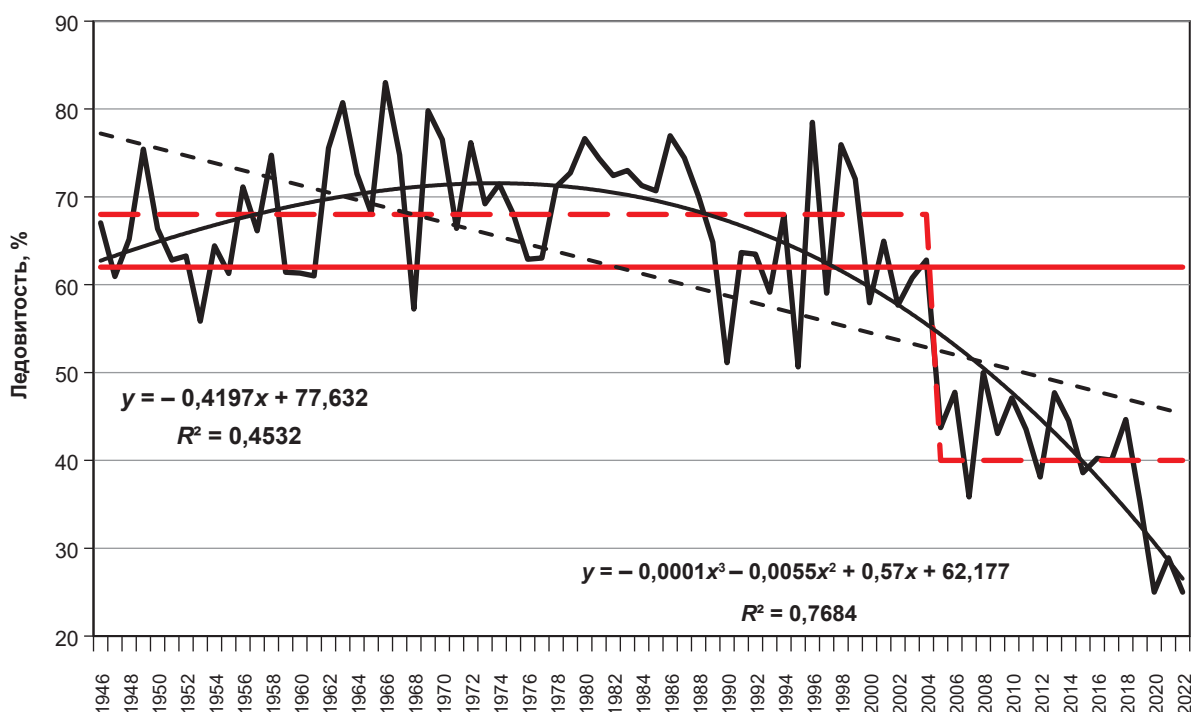


Рис. 3. Межгодовая изменчивость осредненной за летний период (июль-сентябрь) ледовитости морей СМП  
Fig. 3. Interannual variability of ice cover in the NSR seas averaged over the summer period (July-September)

Межгодовая изменчивость осредненной за летний сезон (июль-сентябрь) ледовитости морей СМП представлена на рис. 3. На графике четко определяется статистически значимая (для уровня значимости 0,01) линейная тенденция уменьшения ледовитости, составляющая около 30% за весь период наблюдений, или 4% за десятилетие. Полиномиальная аппроксимация 3-й степени хорошо описывает межгодовые изменения ледовитости и позволяет учитывать до 76% общей дисперсии колебаний.

На графике хорошо выделяются соответствующие периодам «похолодания» и «потепления» периоды повышенного и пониженного фона ледовитости. Так, уменьшением ледовитости в арктических морях ха-

рактеризуется период до 1950-х годов, что соответствует известному в литературе периоду потепления Арктики 1930—1940-х годов [29]. В 1960—1980-х годах наблюдался повышенный фон ледовитости, с 1990-х годов — заметное ее уменьшение, а затем резкое сокращение с 2005 г.

Существенные отличия в изменениях ледовитости арктических морей нуждаются в проверке исследуемого ряда на стационарность (неизменность статистических характеристик ряда по времени), поэтому для последующего анализа весь ряд наблюдений был разделен на два периода: с 1946 по 2004 гг. (выборка из 59 значений) и с 2005 по 2022 гг. (выборка из 18 значений). Неравнознач-

Таблица 2. Основные статистические характеристики ледовитости (в %) для двух исследуемых периодов 1946—2004 и 2005—2022 гг.

Table 2. Main statistical characteristics of ice cover (in %) for the two investigated periods, 1946—2004 and 2005—2022

Характеристика	Средняя ледовитость		Уменьшение ледовитости (разница)
	1946—2004 гг.	2005—2022 гг.	
Среднее, %	68	40	-28 (в 1,7 раза)
Минимум, %	51	25	-26 (в 2,0 раза)
Максимум, %	83	50	-33 (в 1,7 раза)
Размах колебаний, %	32	25	-7 (в 1,3 раза)
СКО, %	7,4	7,5	0,1 (в 1,0 раз)

ность выборок не противоречит требованиям проверки стационарности. Выделение именно этих периодов вызвано значительными изменениями ледовитости в российских арктических морях с 2005 г.

Обе выборки были проверены на стационарность по математическому ожиданию и дисперсии. Проверка гипотезы по t-критерию Стьюдента показала, что эмпирическое значение критерия превышает критическое значение для уровня значимости 0,01. Это дает основание отвергнуть гипотезу о стационарности ряда и признать, что разница между средними значениями двух выборок статистически значима, т. е. период 2005—2022 гг. признается как существенно отличающийся от предыдущего периода (1946—2004 гг.).

Проверка гипотезы о равенстве дисперсий двух выборок с использованием F-критерия Фишера показывает противоположный результат, поскольку эмпирический критерий меньше критического значения. Сравнение дисперсий двух выборок демонстрирует схожесть изменчивости ледовитости в ходе обоих периодов. Различие в степени изменчивости статистически незначимо (для уровня значимости 0,01), весь ряд наблюдений с 1946—2022 гг. является стационарным по дисперсии.

Таким образом, проведенный анализ показал, что изменения ледовитости в российских арктических морях в 2005—2022 гг. по сравнению с 1946—2004 гг. являются статистически значимыми. Средний уровень ледовитости, относительно которого проходили межгодовые колебания с 2005 г., резко снизился. Если до 2004 г. среднесезонная ледовитость составляла в среднем 68% в диапазоне колебаний 51—83%, то начиная с 2005 г. средний уровень ледовитости снизился на 28%, или в 1,7 раза (до 40% с колебаниями в диапазоне 20—50%). Сформировавшаяся тенденция является устойчивой и сохраняется на протяжении всего периода 2005—2022 гг. При этом значения размаха колебаний и среднеквадратическое отклонение практически

не изменились, т. е. ледовитость колеблется в том же диапазоне, но на более низком среднем уровне. Все значения представлены в табл. 2.

Графики сезонного хода ледовитости, осредненные подекадно для выделенных периодов 1946—2004 и 2005—2022 гг. по морям, представлены на рис. 4. Характерной особенностью наблюдаемых изменений после 2005 г. является более интенсивное таяние и смещение сроков очищения на более ранние во всех арктических морях. Некоторые авторы [30; 31] уже отмечали эту особенность развития летних ледовых условий. Согласно правилам судоходства на СМП, прибрежные участки плавания очищаются ото льда и становятся доступными для плавания судов всех ледовых классов, когда ледовитость уменьшается до 70% [32]. Как видно на рисунке, в 1946—2004 гг. этот показатель достигался в начале июля в морях Карском и Лаптевых, в начале августа в Восточно-Сибирском море и в середине июня в Чукотском море. С 2005 г. это событие происходило на две-три декады раньше.

Большинство стандартных навигационных маршрутов (прибрежных, центральных и мористых) становятся доступными после очищения значительной части морской акватории, составляющей две трети площади моря, т. е. уменьшения ледовитости до 30—40%. В среднем это событие происходило в начале июля в Чукотском море, в конце июля — начале августа в морях Карском и Лаптевых, и в середине августа в Восточно-Сибирском море. В 2005—2022 гг. значительная часть акватории морей и все основные судоходные трассы плавания очищаются примерно на три декады раньше, чем в предыдущий период.

И наконец, полное очищение акватории морей, когда льды сохраняются на площади, занимающей не более 10% акватории, наступает во второй декаде августа в Чукотском море, в третьей декаде августа в морях Карском и Лаптевых и в середине сентября в Восточно-Сибирском море. В 1946—2004 гг. такие масштабные сокращения площади



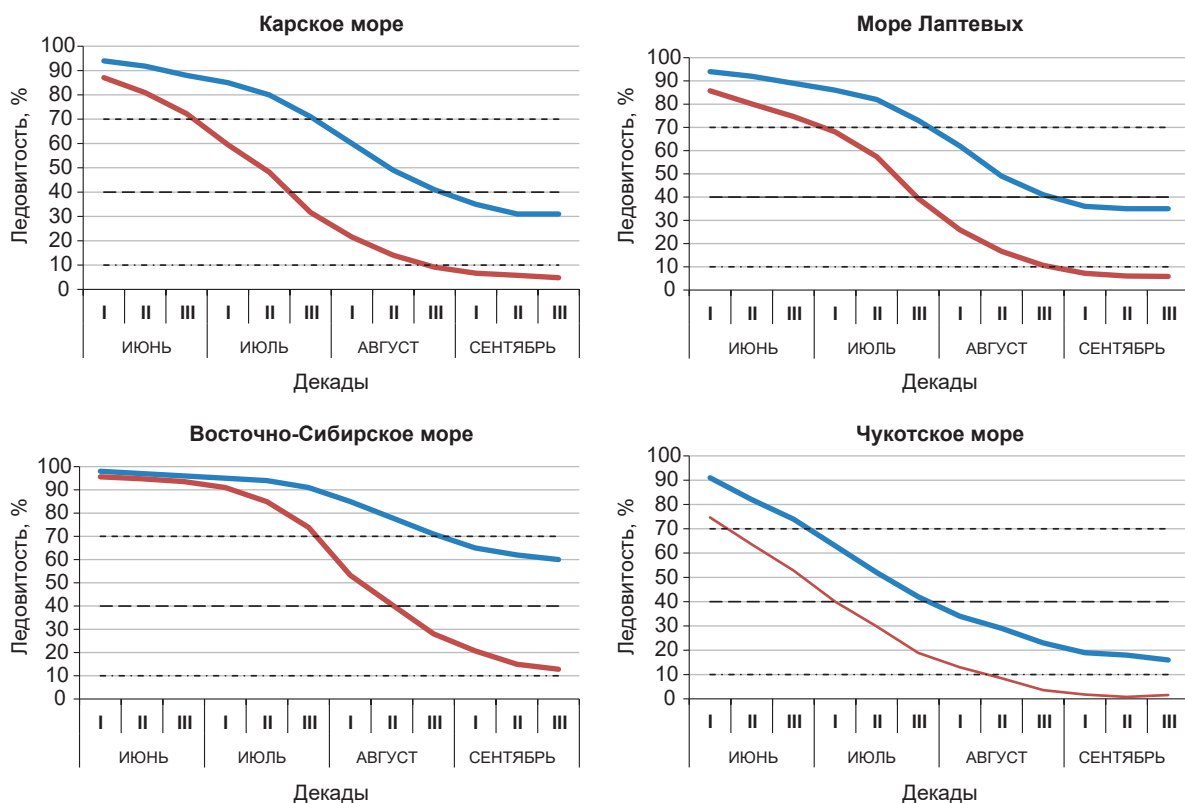


Рис. 4. Сезонный ход ледовитости морей осредненный за 1946–2004 гг. (синяя линия) и 2005–2022 гг. (красная линия)  
 Fig. 4. Seasonal course of the sea ice cover averaged for periods 1946–2004 (blue line) and 2005–2022 (red line)

Таблица 3. Ежедекадная ледовитость за летний сезон российских арктических морей, осредненная за два периода: 1946–2004 и 2005–2022 гг.

Table 3. Ten-day ice cover for the summer season in the Russian Arctic seas averaged over two periods: 1946–2004 and 2005–2022

Море	Период	Ежедекадные значения ледовитости, %											
		Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Карское	1946–2004	94	92	88	85	80	71	60	49	41	35	31	31
	2005–2022	87	81	72	59	48	32	22	14	9	7	6	5
	Изменения	-7	-11	-16	-26	-32	-39	-38	-35	-32	-28	-25	-26
Лаптевых	1946–2004	94	92	89	86	82	73	62	49	41	36	35	35
	2005–2022	86	80	75	68	57	39	26	17	11	7	6	6
	Изменения	-8	-12	-14	-18	-25	-34	-36	-32	-30	-29	-29	-29
Восточно-Сибирское	1946–2004	98	97	96	95	94	91	85	78	71	65	62	60
	2005–2022	96	95	94	91	85	74	53	41	28	21	15	13
	Изменения	-2	-2	-2	-4	-9	-17	-32	-37	-43	-44	-47	-47
Чукотское	1946–2004	91	82	74	63	52	42	34	29	23	19	18	16
	2005–2022	75	64	53	40	30	19	13	8	4	2	1	2
	Изменения	-16	-18	-21	-23	-22	-23	-21	-21	-19	-17	-17	-14

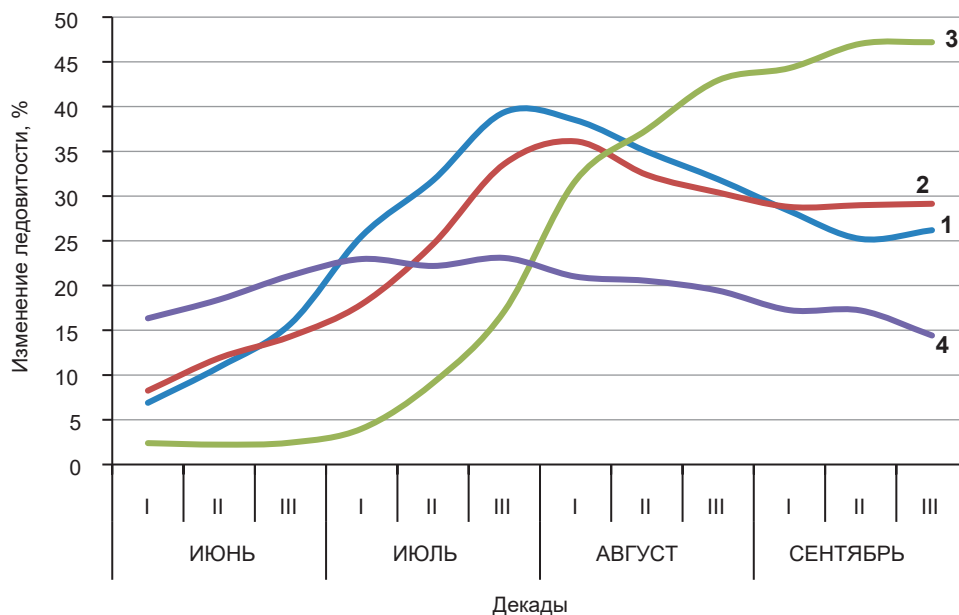


Рис. 5. Изменения средней ледовитости за каждую декаду летнего сезона за период 2005–2022 гг. по сравнению с периодом 1946–2004 гг.: 1 – Карское море, 2 – Море Лаптевых, 3 – Восточно-Сибирское море, 4 – Чукотское море  
 Fig. 5. Changes in average ice cover for each ten-day period of the summer season for the period 2005–2022 in comparison to the period 1946–2004: 1 – Kara Sea, 2 – Laptev Sea, 3 – East Siberian Sea, 4 – Chukchi Sea

льдов в российских арктических морях в среднем не наблюдались.

Значения средней ледовитости за каждую декаду летнего сезона и произошедшие изменения за выделяемые периоды представлены в табл. 3, а кривые выявленных изменений — на рис. 5.

В целом с 2005 г. во всех морях наблюдается снижение средней ледовитости уже с начала летнего сезона. Для морей Карского и Лаптевых изменения сходны: в июне отмечается снижение на 7–16%, наибольшие изменения приходятся на конец июля — начало августа и составляют 36–38%. Для Восточно-Сибирского моря характерно отсутствие существенных изменений в первую половину лета (снижение ледовитости лишь на 2–4%) вплоть до третьей декады июля. Однако с конца июля — начала августа наблюдается резкое изменение сезонного хода: ледовитость существенно сократилась, достигая максимальной разницы с предыдущим периодом в сентябре (–47% с 2005 г.). В Чукотском море уменьшение ледовитости по сравнению с периодом 1946–2004 гг. достаточно равномерно в течение всего летнего сезона, некоторый рост интенсивности изменений отмечается в июле до 22–23%.

Раннее начало и интенсивное развитие таяния приводят к тому, что к началу сентября арктические моря по трассе СМП очищаются ото льда практически полностью (ледовитость менее 10%). В 1946–2004 гг. подобные случаи наблюдались достаточно редко: 20% всех лет периода в морях Карском и Лаптевых, 15% в Восточно-Сибирском

море, 40% в Чукотском море. С 2005 г. повторяемость случаев полного очищения акватории моря увеличилась в Карском и Чукотском морях до 90%, в море Лаптевых — до 75%, в Восточно-Сибирском море — до 60%.

### Выводы

В работе проанализирована ледовитость морей, по которым проходит трасса СМП, осредненная за период июль–сентябрь, что является информативным показателем, хорошо коррелирующим с сентябрьским минимумом и отражающим внутрисезонные изменения. Данные взяты с 1946 г. Для всех рассматриваемых морей характерна сильная межгодовая изменчивость ледовитости, размах колебаний варьирует от 58% (Чукотское море) до 85% (море Лаптевых), а среднее по морям стандартное отклонение составляет 17,7%. Изменения ледовитости имеют статистически значимую линейную тенденцию к уменьшению, около 30% за всю историю наблюдений.

Выявлено, что с 2005 г. ледовитость морей резко сокращается, с этого года происходит накопление крупных отрицательных аномалий ледовитости, что хорошо согласуется с ростом и накоплением положительных аномалий температуры воздуха. При этом выявлено, что наибольший вклад в текущее потепление вносит зимний (холодный) сезон года, а также процессы, происходящие в морях восточного сектора Арктики.

Из-за существенных различий исследуемый ряд данных был проверен на стационарность (неиз-



менность статистических характеристик ряда по времени) и разделен на два периода: с 1946 по 2004 гг. и с 2005 по 2022 гг. Проверка гипотезы на стационарность по математическому ожиданию по *t*-критерию Стьюдента показала, что изменения в период 2005—2022 гг. определяются как статистически значимые. Сравнение дисперсий двух выборок демонстрирует схожесть межгодовой изменчивости ледовитости в ходе обоих исследуемых периодов, т. е. весь ряд наблюдений является стационарным по дисперсии. Средний уровень ледовитости с 2005 г. снизился в 1,7 раза, однако характеристики размаха колебаний и стандартного отклонения изменились незначительно, таким образом, ледовитость колеблется в практически не изменившемся диапазоне, но на более низком среднем уровне.

Характерной особенностью изменений сезонного хода с 2005 г. являются более раннее начало и более интенсивный процесс очищения морей, что приводит к более раннему (на 20—30 дней) освобождению морей ото льда. В морях Карском и Лаптевых интенсивное уменьшение ледовитости с 2005 г. выявлено в первой половине летнего сезона, в Восточно-Сибирском море — во второй половине лета, а в Чукотском море наблюдаются достаточно равномерные изменения в течение всего сезона таяния. Повторяемость полного очищения морей значительно возросла (до 60—90%).

Все выявленные изменения имеют прикладное значение для разработки прогностических моделей и обеспечения навигации на акватории морей СМП.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках программы ЦНТП № 5.1.2 «Развитие существующих и разработка новых методов и технологий долгосрочного (месячного и сезонного) прогнозирования элементов ледо-гидрологического режима арктических морей, низовьев и устьевых областей рек в условиях климатических изменений».

### Литература/References

1. Stroeve J. C., Serreze M. C., Holland M. M. et al. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change*, 2012, vol. 110, pp. 1005—1027. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>.
2. Comiso J. J. Large decadal decline of the arctic multi-year ice cover. *J. of Climate*, 2012, vol. 25, pp. 1176—1193. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
3. Petty A. A., Stroeve J. C., Holland P. R. et al. The Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows. *The Cryosphere*, 2018, vol. 12 (2), pp. 433—453. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018>.
4. Алексеев Г. В., Александров Е. И., Глок Н. И. и др. Эволюция площади морского ледяного покрова

Арктики в условиях современных изменений климата // *Исследование Земли из космоса*. — 2015. — № 2. — С. 5—19. — URL: <https://doi:10.1134/S0001433815090029>.

Alekseev G. V., Aleksandrov E. I., Glok N. I. et al. Arctic Sea Ice Cover in Connection with Climate Change. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 9, pp. 889—902. Available at: <https://doi:10.1134/S0001433815090029>. (In Russian).

5. Алексеев Г. В., Данилов А. И., Катцов В. М. и др. Изменения площади морских льдов северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // *Изв. Рос. акад. наук. Сер. «Физика атмосферы и океана»*. — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 723—735. — URL: <https://doi:10.1134/S0001433809060012>.

Alekseev G. V., Danilov A. I., Katcov V. M. et al. Changes in the Climate and Sea Ice of the Northern Hemisphere in the 20th and 21st Centuries from Data of Observations and Modeling. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, vol. 45, no. 6, pp. 723—735. Available at: <https://doi:10.1134/S0001433809060012>. (In Russian).

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. — № 60 (1). — URL: <https://doi.org/10.31857/S2076673420010029>.

Matveeva T. A., Semenov V. A., Astafieva E. S. The ice extent in the Arctic Seas and its relation to the surface air temperature in the northern hemisphere. *Ice and Snow*, 2020, 60 (1). Available at: <https://doi.org/10.31857/S2076673420010029>. (In Russian).

7. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П. и др. Научные исследования в Арктике. — Т. 2: Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. — СПб.: Наука, 2007. — 136 с.

Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P. et al. Scientific research in the Arctic. Vol. 2. Climatic changes in the ice cover of the Eurasian shelf seas. St. Petersburg, Nauka, 2007, 136 p. (In Russian).

8. Шерстюков Б. Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата / ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». — Обнинск, 2008. — 247 с.

Sherstyukov B. G. Regional and seasonal patterns of changes in the modern climate. VNIIGMI-MDC. Obninsk, 2008, 247 p. (In Russian).

9. Иванов В. В., Алексеенков Г. А., Коржииков А. Я. О совершенствовании макроциркуляционного метода долгосрочного метеорологического прогноза в Карском море // *Гидрометеор. исслед. и прогнозы* (Тр. Гидрометцентра России). — 2018. — № 4 (370). — С. 105—121.

Ivanov V. V., Alekseyenkov G. A., Korzhikov A. Ya. On improvement of the microcirculation method for long-range weather forecasting in the Kara Sea. *Hydrometeorological research and Forecasts* (Trudy Hydrometcentra Rossii), 2018, № 4 (370), pp. 105—121. (In Russian).

10. Юлин А. В., Тимофеева А. Б., Павлова Е. А. и др. Межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости российских арктических морей в современном климатическом периоде // Тр. ГОИН. — 2019. — № 220. — С. 44—60.  
Yulin A. V., Timofeeva A. B., Pavlova E. A. et al. Interannual and seasonal changes the ice cover in the Russian Arctic seas in the modern climatic period. Proceedings of the VI All-Russian Conference on Applied Oceanography. Trudy GOIN, 2019, no. 220, pp. 44—60. (In Russian).
11. Kwok R., Cunningham G. F., Wensnahan M. et al. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003—2008. *J. of Geophysical Research*, 2009, vol. 114, no. C07005. Available at: <https://doi.org/10.1029/2009JC005312>.
12. Иванов В. В., Алексеев В. А., Алексеева Т. А. и др. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследование Земли из космоса. — 2013. — № 4. — С. 50—65. — URL: <https://doi.org/10.7868/S0205961413040076>.  
Ivanov V. V., Alekseev V. A., Alekseeva T. A. et al. Does Arctic Ocean Ice Cover Become Seasonal? *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2013, no. 4, pp. 50—65. Available at: <https://doi.org/10.7868/S0205961413040076>. (In Russian).
13. Виноградная Е. С., Егорова Е. С., Шевелева Т. В. и др. Изменчивость положения границ старых льдов в весенний период и остаточных льдов в осенний период в Северном Ледовитом океане в текущем климатическом периоде // Рос. Арктика. — 2020. — № 9. — С. 41—55. — URL: <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12094>.  
Vinogradnyaya E. S., Egorova E. S., Sheveleva T. V. et al. Variability of the spring old ice and fall residual ice boundary in the Arctic Ocean over the current period of climate changes. *Russian Arctic*, 2020, no. 9, pp. 41—55. Available at: <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12094>. (In Russian).
14. Егоров А. Г., Павлова Е. А. Изменение сроков устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2019. — № 65 (4). — С. 389—404. — URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>.  
Egorov A. G., Pavlova E. A. Change in the time of stable ice formation in the Russian Eastern Arctic seas at the beginning of 21st century. *Arctic and Antarctic Research*, 2019, 65 (4), pp. 389—404. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>. (In Russian).
15. Stroeve J. C., Markus T., Boisvert L. et al. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41 (4), pp. 1216—1225. Available at: <https://doi.org/10.1002/2013GL058951>.
16. Думанская И. О. Ледовые условия морей азиатской части России. — М.: Изд-во ИГ-СОЦИН, 2017. — 640 с.  
Dumanskaya I. O. Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. Moscow, IG-SOCIN, 2017, 640 p. (In Russian).
17. Serreze M. C., Stroeve J., Barrett A. P. et al. Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale. *Geophys. J. Res. Atmos.*, 2016, vol. 121, pp. 11463—11485. Available at: <https://doi.org/10.1002/2016JD025161>.
18. Третьяков В. Ю., Фролов С. В., Сарафанов М. И. Изменчивость ледовых условий плавания по трассам Северного морского пути за период 1997—2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2019. — № 65 (3). — С. 328—340. — URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340>.  
Tretyakov V. Yu., Frolov S. V., Sarafanov M. I. The variability of ice conditions along the northern sea route for the period 1997—2018. *Arctic and Antarctic Research*, 2019, no. 65 (3), pp. 328—340. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340>. (In Russian).
19. Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика; ААНИИ. — СПб., 2021. — 360 с.  
Russian Arctic Seas in the modern climatic conditions. Ed. by I. M. Ashik. St. Petersburg, AARI, 2021, 360 p. (In Russian).
20. Архив Мирового центра данных по морскому льду. — URL: <http://wdc.aari.ru>.  
Archive of the World Sea Ice Data Center. Available at: <http://wdc.aari.ru>. (In Russian).
21. Архив Мирового центра данных по гидрометеорологической информации ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». — URL: <http://meteo.ru>.  
Archive of the World Data Center for Hydrometeorological Information of the State Institution “VNIIGMI-WCD”. Available at: <http://meteo.ru>. (In Russian).
22. Руководство по производству ледовой авиаразведки. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 240 с.  
Manual for the accomplishment of ice air reconnaissance. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1981. (In Russian).
23. Бородачев В. Е., Шильников В. И. История ледовой авиационной разведки в Арктике и на замерзающих морях России (1914-1993). — СПб.: Гидрометеиздат, 2002. — 441 с.  
Borodachev V. Ye., Shilnikov V. I. History of air reconnaissance in the Arctic and on the freezing seas of Russia. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2002. (In Russian).
24. Моря Советской Арктики / Под ред. Ю. Л. Визе. — Москва; Ленинград: Главсевморпуть, 1948. 418 с.  
Seas of the Soviet Arctic. Ed by Yu. Vize. Moscow; Leningrad, Glavsevmorput', 1948, 418 p. (In Russian).
25. Границы океанов и морей. — Л., 1960. — 208 с.  
The boundaries of the oceans and seas. Leningrad, 1960. (In Russian).
26. 1989—2017. Sea ice Nomenclature. WMO, no. 259.
27. Карклин В. П., Юлин А. В., Карелин И. Д. и др. Климатические колебания ледовитости аркти-

- ческих морей сибирского шельфа // Тр. ААНИИ. — 2001. — Т. 443. — С. 5—11.
- Karklin V. P., Yulin A. V., Karelin I. D. et al. Climatic fluctuations of ice cover extent in the Siberian shelf Arctic seas. Trudy AANII. [Proc. AARI], 2001, vol. 443, pp. 5—11. (In Russian).
28. Ашик И. М., Иванов В. В., Кассенс Х. Основные результаты океанологических исследований Северного Ледовитого океана в последнее десятилетие // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2015. — № 1 (103). — С. 42—56.
- Ashik I. M., Ivanov V. V., Kassens H. et al. General results of Arctic Ocean oceanological studies in the last decade. Arctic and Antarctic Research, 2015, no. 1 (103), pp. 42—56. (In Russian).
29. Гирс А. А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. — Л.: Гидрометеиздат, 1960. — 560 с.
- Girs A. A. Fundamentals of long-term weather forecasts. Leningrad, Gidrometeizdat, 1960. 560 p. (In Russian).
30. Гудкович З. М., Карклин В. П., Миронов Е. У. и др. Развитие ледовых и метеорологических условий в Арктике в период 2007—2013 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 96 (2). — С. 90—102.
- Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Mironov E. U. et al. Development of ice and weather conditions in the Arctic during 2007—2013. Arctic and Antarctic Research, 2013, no. 96 (2), pp. 90—102. (In Russian).
31. Егоров А. Г. Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — № 66 (2). — С. 124—143. — URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>.
- Egorov A. G. The Russian Arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century. Arctic and Antarctic Research, 2020, no. 66 (2), pp. 124—143. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>. (In Russian).
32. Правила плавания в акватории Северного морского пути / Минтранс России. — М., 2020. — 28 с.
- Rules of navigation in the waters of the Northern Sea Route. Ministry of Transport of Russia. Moscow, 2020. (In Russian).

---

### Информация об авторах

**Тимофеева Анна Борисовна**, научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), e-mail: [tianna@aari.ru](mailto:tianna@aari.ru).

**Юлин Александр Викторович**, кандидат географических наук, заведующий лабораторией ледового режима и долгосрочных ледовых прогнозов, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), e-mail: [icefor@aari.ru](mailto:icefor@aari.ru).

**Иванов Владимир Васильевич**, кандидат географических наук, заведующий лабораторией долгосрочных метеорологических прогнозов, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), e-mail: [v\\_ivanov@aari.ru](mailto:v_ivanov@aari.ru).

**Шаратунова Мария Владимировна**, научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), e-mail: [mvsh@aari.ru](mailto:mvsh@aari.ru).

**Павлова Евгения Анатольевна**, научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), e-mail: [pavlova@aari.ru](mailto:pavlova@aari.ru).

## ICE COVER OF THE RUSSIAN ARCTIC SEAS ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE IN THE CURRENT CLIMATIC PERIOD

Timofeeva, A. B., Yulin, A. V., Ivanov, V. V., Sharatunova, M. V., Pavlova, E. A.

Arctic and Antarctic Research Institute (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on November 30, 2023

### For citing

Timofeeva A. B., Yulin A. V., Ivanov V. V., Sharatunova M. V., Pavlova E. A. Ice cover of the Russian Arctic seas along the Northern sea route in the current climatic period. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 135—146. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-135-146. (In Russian).

### Abstract

The paper considers the ice cover in the Arctic seas of the Northern Sea Route (NSR): Kara, Laptev, East Siberian and Chukchi since 1946. A comparison of the long-term course of integral average annual air temperature anomalies and seasonal average ice cover anomalies allows identifying a year 2005, starting from which the sea ice cover sharply decreases in a good agreement with the increase and accumulation of positive air temperature anomalies. The researchers reveal that the average level of ice cover has decreased by 1.7 times since 2005, however, the values of the range of fluctuations and standard deviation have remained almost unchanged, i.e. ice cover fluctuates in the same range, but at a lower average level. The main shipping routes are cleared about three decades earlier. The repeatability of complete cleansing of the seas has increased to 60—90%.

**Keywords:** *ice cover, ice conditions, Northern Sea Route, NSR, Russian Arctic seas, seasonal course of ice cover, reduction of ice cover, the ice-free period duration increase.*

### Funding

The work was carried out within the framework of the CSTP program no. 5.1.2 “Development of existing and development of 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 estuaries of rivers in conditions of climate change”.

### Information about the author

**Timofeeva, Anna Borisovna**, Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397), e-mail: tianna@aari.ru.

**Yulin, Alexander Viktorovich**, PhD of Geography, Head of the Laboratory of Ice Regime and Long-term Ice Forecasts, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397), e-mail: icefor@aari.ru.

**Ivanov, Vladimir Vasilyevich**, PhD of Geography, Head of the Laboratory of Long-term Meteorological Forecasts, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397), v\_ivanov@aari.ru.

**Sharatunova, Maria Vladimirovna**, Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397), e-mail: mvsh@aari.ru.

**Pavlova, Evgeniya Anatolyevna**, Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397), e-mail: pavlova@aari.ru.

© Timofeeva A. B., Yulin A. V., Ivanov V. V., Sharatunova M. V., Pavlova E. A., 2024