

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330>  
УДК 551.326.1:551.383.(268.52)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## Оценка многолетней изменчивости толщины припая в морях Российской Арктики по данным полярных станций

*А.Б. Тимофеева\**, *М.В. Шаратунова*, *У.В. Прохорова*

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

*\*tianna@aari.ru*

### Резюме

В работе проанализированы ряды данных по толщине припая и приземной температуре воздуха (ПТВ) наземных полярных гидрометеорологических станций, расположенных на побережье Российской Арктики. Проведено сравнение данных наблюдений за современный 15-летний период (2005–2020 гг.) с данными наблюдений до 2004 г. (с 1930–1940-х гг.). В результате выявлено, что с 2005 г. толщина припая на момент максимального развития уменьшилась на 13 % в Карском море, на 9 % в Восточно-Сибирском море, на 5 % в морях Лаптевых и Чукотском. Процесс нарастания стал значительно медленнее, а переход между возрастными градами сместился на 1–2 декады на более поздний срок. С 2005 г. температура воздуха повысилась в среднем на 2,7 °С, при этом наибольший вклад в это вносит осенний период (октябрь–декабрь), а наименьшая разница по сравнению с предыдущими десятилетиями наблюдается в летние месяцы. Поскольку приземная температура воздуха является одним из определяющих факторов нарастания толщины льда, в работе рассмотрена ее корреляция с суммой градусо-дней мороза (СГДМ). В среднем по станциям СГДМ снизилась на 14 %; все рассматриваемые 15 зимних сезонов с 2005 г. можно классифицировать как мягкие, ни на одной из станций зимы не соответствовали критериям суровой или умеренной. Повторяемость мягких зим увеличилась на 36–95 % по станциям. Снижение СГДМ хорошо согласуется с изменениями среднесезонных значений (за ноябрь–май) и максимальных значений толщины припайного льда на станциях. В заключение следует отметить, что исследуемый 15-летний период (2005–2020 гг.) отличается самыми мягкими условиями за всю историю наблюдений на полярных станциях российских арктических морей.

**Ключевые слова:** арктические моря, максимальная толщина льда, полярные станции, припай, сумма градусо-дней мороза, толщина морского льда.

**Для цитирования:** *Тимофеева А.Б., Шаратунова М.В., Прохорова У.В.* Оценка многолетней изменчивости толщины припая в морях Российской Арктики по данным полярных станций // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 3. С. 310–330. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330>.

Поступила 09.05.2023

После переработки 06.07.2023

Принята 12.07.2023

## **Estimation of fast ice thickness multiyear variability in the Russian Arctic seas according to polar stations data**

*Anna B. Timofeeva\**, *Maria V. Sharatunova*, *Uliana V. Prokhorova*

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

*\*tianna@aari.ru*

### **Summary**

The warming process in the Arctic steadily continues and significantly affects the entire regime of sea ice cover development. Most of the sea ice thickness studies are based on numerical modeling and information obtained using satellite radar altimetry such that these estimations require validation by means of contact measurements. However, the comparison of data is difficult due to the irregularity and locality of measurements. This makes contact measurements at polar stations highly relevant. In this study, contact measurements were carried out by drilling for each 10-day period during winter season, they are quite accurate and have a long observations series in the same regime conditions from year to year, allowing one to assess the long-term variability of fast ice thickness. In this study, we analyzed the data series of the fast ice thickness and the surface air temperature at 16 Roshydromet land-based polar stations in the Russian Arctic Seas. The data series were taken into account from the beginning of regular measurements (the end of the 1930s, the year of the beginning varies depending on the station) to 2020 for the period November–May. Observations for the recent 15-year period (2005–2020) are compared with those prior to 2004 (from the 1930s–40s). Since 2005 sea ice thicknesses at the moment of maximum development (maximum sea ice thickness) have decreased by 13 % in the Kara Sea, by 9 % in East Siberian Sea, by 5 % in the Laptev and Chukchi Seas in comparison with the previous period. The sea ice thickness development process has become much slower, transition between the sequential stages of development is shifted by 10–20 days (in some points 30–40 days) later. The surface air temperature is on average 2,7 °C higher than for the previous period at all sea stations. The most significant changes (1,4–6,1 °C) are observed in the autumn season (October–December), all the stations show the lowest difference in the summer months. Averaged over the stations, the sum of the frost degree-days (SFDD) decreased by 14 %; all 15 recent winter seasons can be classified as mild and none of the stations has experienced winters that meet the criteria of severe winter. The frequency of mild winters increased by 36–95 % by stations. The SFDD decline is in good agreement with the changes of the mean seasonal (November–May) and maximum SIT at the stations. In conclusion, it is noteworthy that the recent 15-year period (2005–2020) is distinguished by the mildest conditions.

**Keywords:** arctic seas, fast ice, ice thickness, polar stations, sum of frost degree-days.

**For citation:** *Timofeeva A.B., Sharatunova M.V., Prokhorova U.V.* Estimation of fast ice thickness multiyear variability in the Russian Arctic seas according to polar stations data. *Arctic and Antarctic Research*. 2023, 69 (3): 310–330. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330>.

**Received 09.05.2023**

**Revised 06.07.2023**

**Accepted 12.07.2023**

### **ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы процесс потепления в Арктике неуклонно развивается. Одним из проявлений этого процесса является значительное уменьшение площади арктического морского льда во все сезоны года [1–3]. Наиболее сильное сокращение ледяного покрова наблюдается в сентябре, по окончании летнего периода таяния [4–6]. Наблюдаемое потепление оказывает существенное влияние на весь режим развития ледяного покрова. Сроки начала ледообразования смещаются, изменяется возрастной состав льда [7], процессы таяния и различные характеристики ледового режима в российских арктических морях также претерпевают изменения [8, 9]. Некоторые авторы подчеркивают значительное усиление процессов потепления, изменение

термохалинной структуры вод Северного Ледовитого океана и уменьшение ледяного покрова начиная с 2005 г. [10–13].

Толщина морского льда также является важной характеристикой, ее колебания — чувствительный индикатор климатических изменений. Для оценки толщины морского льда используются данные различных методов измерений, как непосредственно контактных, так и различных дистанционных измерений. К ним относят в том числе измерения, выполняемые с помощью гидролокатора, направленного вверх, на подводных лодках [14, 15], данные измерений электромагнитного зондирования с использованием специализированного оборудования [16, 17], а также данные спутниковых наблюдений. Большинство современных исследований толщины морского льда основаны на численном моделировании и информации, полученной с помощью спутниковой радиолокационной альтиметрии [18–21]. Результаты всех исследований свидетельствуют о том, что морской лед Арктики становится тоньше. Об этом также свидетельствуют косвенные оценки толщины льда по возрастному составу ледяного покрова [22]. Однако оценки толщины льда, основанные на данных спутникового дистанционного зондирования и численного моделирования, характеризуются некоторой степенью неопределенности и требуют проведения верификации с помощью контактных измерений. Подобные сравнения выполнялись, например, по результатам ледовых исследований во время экспедиции «Трансарктика» [23]. Однако сравнение и верификация результатов контактных измерений межгодовых изменений затруднены из-за их неравномерности и локальности.

В связи с вышесказанным контактные измерения толщины припая на полярных станциях являются уникальным источником информации. Они достаточно точны и представляют значительный интерес из-за продолжительности рядов наблюдений в одних и тех же режимных условиях из года в год, что позволяет оценить изменения толщины льда в течение десятилетий. Целью данной работы является оценка изменений толщины припая в последние десятилетия, а также оценка связи с изменениями температуры воздуха по имеющимся данным измерений на полярных станциях.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были проанализированы данные по приземной температуре воздуха (ПТВ) и толщине припая (ТП), накопленные по результатам измерений на ряде наземных полярных станций Росгидромета. Массив данных по температуре воздуха доступен на ресурсах Росгидромета, архив измерений толщины льда на припаяе формируется и хранится в ААНИИ (не опубликованы).

Регулярные измерения на полярных станциях проводятся с середины 30-х гг. XX в. Некоторые станции были закрыты в 1990-е гг., их ряды наблюдений прерваны и потому не использовались в анализе. Для исследования были выбраны полярные станции морей Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского (рис. 1): им. М.В. Попова (о. Белый), Диксон, м. Стерлегова, ГМО им. Е.К. Федорова (м. Челюскин), о. Котельный, б. Тикси, пр. Санникова, Кигилях, Амбарчик, Айон, Певек, Валькаркай, м. Биллингс, м. Ванкарем, м. Уэлен. Ряды данных этих станций имеют примерно одинаковую продолжительность наблюдений.

Все станции расположены на материке или островах, а измерения проводятся на припаяе. Толщина припая обычно превышает толщину дрейфующего льда [24, 25]. Припая образуется в осенне-зимний период и достигает своего максимального развития в апреле-мае, при этом наиболее обширный припая формируется в мелко-



Рис. 1. Наземные полярные станции Росгидромета  
 Fig. 1. Roshydromet land-based polar stations

водных частях морей: в северо-восточной части Карского, восточной части Лаптевых, западной части Восточно-Сибирского морей [24].

Измерения толщины припая проводились в соответствии с Наставлением гидрометеорологическим станциям и постам [26] в постоянной точке (ПТ), недалеко от берега на глубине дна не менее 2 метров. Требования для припайного льда в ПТ следующие: лед должен быть гладким, равномерно покрытым снегом и в целом типичным для данного района. Лед пробуравливается специальным буром (в наше время с бензиновыми или электрическими двигателями), и область в радиусе 10–15 метров является фактической ПТ, где выполняются все последующие измерения. Состав наблюдений включает измерение толщины льда и превышения над поверхностью воды (или глубины погружения), а также высоты и плотности снежного покрова. Измерения проводятся один раз в декаду. Если в назначенный день их не удалось выполнить, измерения проводятся в ближайший день с благоприятными условиями для работы.

Архив ААНИИ содержит ежедекадные значения измерений толщины припая, преимущественно с октября по июль. В рядах наблюдений есть пропуски, причиной которых могло быть отсутствие наблюдений в отдельные годы, проблемы с поступлением информации по каналам связи и «человеческий фактор». К сожалению, последнее может быть основной причиной не только пробелов, но и ошибок в данных, чего также нельзя полностью исключить.

Для выполнения оценки межгодовой изменчивости толщины припая были взяты данные с ноября по май. Для минимизации ошибок в расчетах и оценках все сомнительные значения проверялись путем сравнения с информацией соседних станций (ледовые и погодные условия) и в случае несоответствия исключались. Также были исключены некоторые случаи, не соответствовавшие задачам работы: например, резкое увеличение толщины за декаду (значительно превышающее средние многолетние значения нарастания толщины в эти сроки) интерпретировалось как «подсов» льда в результате динамических процессов и торошения. Все такие случаи из расчетов исключались, как и результаты наблюдений после разрушения припая в ПТ и последующей смены площадки, а также случаи измерений на остаточном льду, сохранившемся с предыдущего сезона (например, на о. Котельный в 1962–1963 гг.), поскольку не соответствовали задаче оценки процесса нарастания льда.

Ряды данных по Чукотскому морю можно охарактеризовать как недостаточные. Обе рассматриваемые станции этого моря с доступными данными измерений толщины припая имеют значительные пропуски и часто сомнительные значения (как на м. Ванкарем). Измерения льда на станции м. Уэлен с 1990-х гг. проводились крайне нерегулярно. Некоторые спорадические значения, собранные за последние годы, разумеется, не могут отразить реальную ситуацию. Однако, несмотря на скудную насыщенность данными в Чукотском море, ряды этих станций также были приняты во внимание. Ситуация аналогична для нескольких станций Восточно-Сибирского моря (ВСМ), таких как Валькаркай и м. Биллингса.

Для анализа были взяты ряды данных по станциям до 2020 г. включительно с начала регулярных измерений (конец 1930-х гг.). Год начала измерений различается по станциям, как указано в табл. 1. По температуре воздуха использовались данные, полученные на тех же станциях, осредненные за месяц.

Таблица 1

**Общая информация о рядах наблюдений  
на полярных станциях морей Российской Арктики**

Table 1

**General information about the observations series at polar stations of the Russian Arctic Seas**

Пункт наблюдений	Характеристика	Год начала	Число лет набл.	Пропуски данных, %
им. Попова (о. Белый)	Температура (среднемесячная)	1934	87	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1933/1934	88	17
Диксон	Температура (среднемесячная)	1916	105	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1916/1917	104	2
о. Известий	Температура (среднемесячная)	1959	62	29
	Толщина льда (ежедекадная)	1954/1955	64	4
м. Стерлегова	Температура (среднемесячная)	1934	87	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1936/1937	84	13
м. Челюскин	Температура (среднемесячная)	1932	90	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1934/1935	86	7
б. Тикси	Температура (среднемесячная)	1936	85	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1940/1941	81	3
о. Котельный	Температура (среднемесячная)	1936	85	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1939/1940	81	2
пр. Санникова	Температура (среднемесячная)	1942	79	1
	Толщина льда (ежедекадная)	1942/1943	78	4
Кигилях	Температура (среднемесячная)	1939	82	1
	Толщина льда (ежедекадная)	1939/1940	81	2
Амбарчик	Температура (среднемесячная)	1933	88	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1938/1939	82	4
Айон	Температура (среднемесячная)	1942	79	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1942/1943	78	2
Певек	Температура (среднемесячная)	1942	79	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1941/1942	77	8
Валькаркай	Температура (среднемесячная)	1935	86	4
	Толщина льда (ежедекадная)	1935/1936	85	9
м. Биллингса	Температура (среднемесячная)	1935	86	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1935/1936	85	17
Мыс Ванкарем	Температура (среднемесячная)	1935	86	2
	Толщина льда (ежедекадная)	1936/1937	84	29
Мыс Уэлен	Температура (среднемесячная)	1928	93	0
	Толщина льда (ежедекадная)	1935/36	85	47

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки исторических данных измерений было выполнено сравнение ПТВ и ТП на полярных станциях в Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях за современный период (2005–2020 гг.) с данными наблюдений за период с 1930-х гг. до 2004 г. Процесс ледообразования на акватории, прилегающей к полярным станциям, преимущественно начинается на чистой воде, поскольку в подавляющем большинстве случаев припай полностью разрушается за летний период [24]. Формирование припая начинается при толщине молодого льда 6–8 см, постепенно нарастая и расширяясь в ходе зимнего сезона, он достигает своего максимума в апреле-мае.

### Многолетняя изменчивость максимальной толщины припая

Для дальнейшего анализа использовалась максимальная толщина льда, зафиксированная в каждом годовом цикле. На рис. 2 представлены примеры межгодовой изменчивости максимальной толщины льда на нескольких полярных станциях в каждом из рассматриваемых морей. Несмотря на то, что общие тенденции одинаковы для всех российских арктических морей, развитие гидрометеорологических и ледовых процессов в каждом из морей имеет свои режимные особенности. Основные статистические характеристики межгодовой изменчивости максимальной ТП приведены в табл. 2. Характеристики были рассчитаны для всего ряда наблюдений, а также отдельно для исследуемых периодов: современного 15-летнего (2005–2020 гг.) и периода с 1930-х гг. до 2004 г.

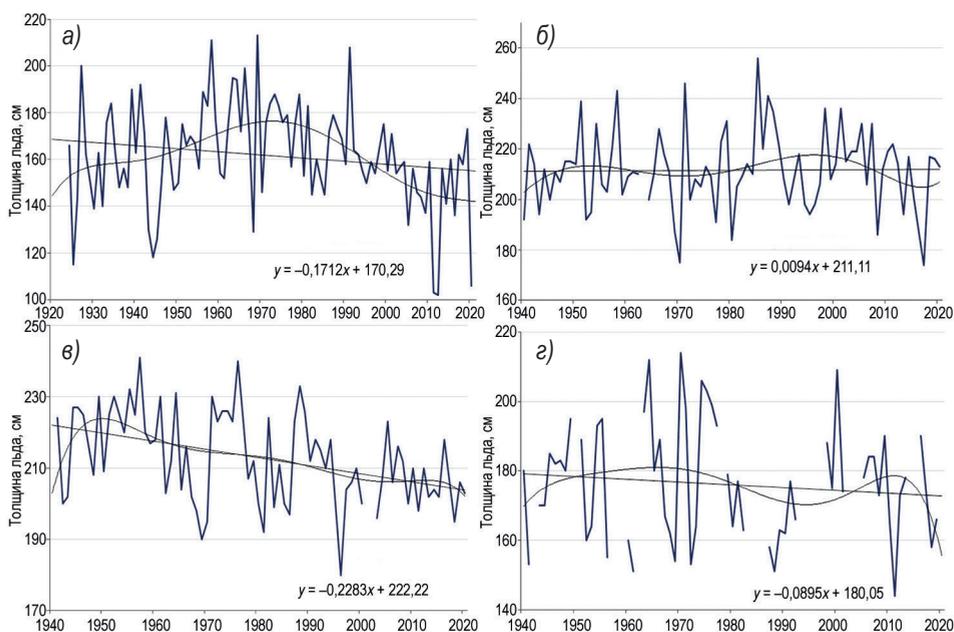


Рис. 2. Межгодовая изменчивость максимальной толщины льда по измерениям на полярных станциях: а) Диксон (Карское море), б) о. Котельный (море Лаптевых), в) Амбарчик (Восточно-Сибирское море), з) м. Ванкарем (Чукотское море); аппроксимация выполнена полиномом 6-й степени

Fig. 2. Interannual variability of the annual maximum ice thickness measured at polar stations: а) Dixon (Kara Sea), б) Kotelny Island (Laptev Sea), в) Ambarchik (East-Siberian Sea), з) Vankarem Cape (Chukchi Sea); the approximation is performed by a polynomial of the 6th degree

Таблица 2

Статистические характеристики максимальной за сезон толщины льда по данным полярных станций

Table 2

Statistical characteristics of ice thickness at the moment of maximum development according to polar stations data

	о. Белый	Диксон	о. Известь	Мыс Стрелгова	Мач Челоккин	б. Тисси	о. Котельный	Китилых	пр. Санникова	Амбаичик	Айон	Певек	Валькаркай	Мыс Билингса	Мыс Ванкарем	Мыс Уэлен
Весь ряд наблюдений с 1930-х гг. по 2019/20 г.																
Среднее, см	148	162	170	193	191	221	212	213	209	211	177	150	181	172	172	135
Максимум, см	198	213	216	239	239	248	256	240	239	239	217	183	235	222	204	167
Минимум, см	90	102	124	150	147	193	174	179	171	194	121	102	104	130	143	117
Размах, см	108	111	92	89	92	55	82	61	68	45	96	81	131	92	61	50
СКО	20	22	24	24	21	12	16	12	16	13	16	20	31	18	18	13
Период с 1930-х гг. по 2004/05 г.																
Среднее, см	150	166	178	196	196	224	212	214	211	212	179	154	185	173	172	135
Максимум, см	198	213	216	239	239	248	256	240	239	239	217	183	235	222	204	167
Минимум, см	99	118	126	154	149	201	175	185	173	180	146	106	130	140	142	111
Размах, см	99	95	90	85	90	47	81	55	66	59	71	77	105	82	62	56
СКО	19	20	21	24	19	11	16	11	15	13	15	17	25	17	16	13
Период с 2005/06 г. по 2019/20 г.																
Среднее, см	133	143	146	177	175	211	207	205	198	204	166	133	160	156	170	122
Максимум, см	154	173	168	197	205	236	230	236	223	218	189	177	217	196	190	127
Минимум, см	90	102	124	150	147	193	174	179	171	194	121	102	104	130	143	117
Размах, см	64	71	44	47	58	43	56	57	52	24	68	75	113	66	47	10
СКО	21	22	14	15	17	11	15	15	13	7	18	21	51	23	15	4
Изменение средней толщины за 15 лет с 2005 г.																
Разница, см/%	-17/-12	-23/-14	-32/-18	-19/-10	-21/-11	-13/-6	-5/-2	-10/-4	-13/-6	-8/-4	-13/-5	-21/-14	-25/-14	-17/-10	-2/-1	-13/-10

Примечание. Красным цветом выделены абсолютные максимумы для каждой из станций, синим абсолютные минимумы.

Note. Absolute maxima for each of the stations are highlighted in red, absolute minima in blue.

Максимальная толщина припая серьезно варьирует от года к году и имеет значительный размах колебаний (55–131 см) за весь ряд наблюдений на станциях. Изменения толщины льда на подавляющем большинстве станций имеют выраженный отрицательный тренд. Некоторые станции, в основном в Карском море, показывают четко прослеживающиеся долгопериодные колебания около 30 лет со значительным увеличением толщины льда в 1960–1980-е гг. Это вполне согласуется с ранее выявленными климатическими колебаниями и циклами [9, 10].

Средняя толщина льда на момент максимального развития в апреле-мае колеблется в пределах 135–221 см по станциям, наиболее толстый лед наблюдается на станциях моря Лаптевых. Наибольшая толщина (256 см) за всю историю наблюдений была зафиксирована на о. Котельный в сезоне 1984/85 г. Абсолютные максимумы толщины льда (максимальные значения за весь ряд наблюдений) на всех станциях наблюдались в период до 2005 г., а все абсолютные минимумы — после 2005 г. (табл. 2).

За 2005–2020 гг. толщина льда на момент максимального нарастания в апреле-мае снизилась на 2–32 см по станциям в сравнении с предыдущим периодом. В среднем на всех станциях Российской Арктики толщина припайного льда сократилась на 8 %. Наибольшие изменения наблюдаются на станциях Карского моря, где толщина припая на момент максимального нарастания уменьшилась на 13 % (наибольшее уменьшение было зафиксировано на станции о. Известий — 18 %). Далее идет Восточно-Сибирское море с убылью толщины льда на 9 %, а также моря Лаптевых и Чукотское — на 5 %. Стоит отметить, что по четырем полярным станциям моря Лаптевых снижение толщины припая колеблется в небольшом диапазоне, в пределах 2–6 %. В то время как разброс значений по станциям Чукотского моря достаточно большой — от 1 до 10 %. Это, вероятно, обусловлено различными режимными особенностями самих станций моря. Географически станции расположены не близко. Так, мыс Уэлен, самая восточная станция, находится под сильным влиянием атмосферных и океанических процессов Берингова моря и Тихоокеанского сектора, а режимные характеристики станции Ванкарем ближе к характеристикам континентальных станций Восточно-Сибирского моря.

Только две станции из всей выборки не демонстрируют многолетний отрицательный тренд максимальной ТП: о. Котельный (в море Лаптевых) и Ванкарем (в Чукотском море). Толщина льда на этих станциях приближается к среднемуголетним значениям на момент максимального развития, что на станции о. Котельный может объясняться режимными особенностями. Однако для станции Ванкарем это скорее всего объясняется некорректной оценкой из-за наличия большого количества пропусков в рядах данных, которые не дают в полной мере оценить величину изменений. Аналогичная ситуация складывается и на другой полярной станции Чукотского моря, мыс Уэлен. Оценка изменений ТП в Чукотском море, вероятнее всего, является неточной.

### **Сезонное нарастание толщины припая**

Для анализа использовались ежедекадные данные за сезон: с осенних месяцев одного года, когда начинается процесс ледообразования, по весенние месяцы последующего года, когда развитие припая достигает своего ежегодного максимума. На рис. 3 представлен сезонный ход нарастания толщины льда. Ряды данных станций были осреднены по каждому отдельному морю за два периода. Очевидно, что

в течение 15-летнего периода с 2005 г. процесс нарастания толщины льда на всех станциях происходил гораздо медленнее, чем в предыдущий период наблюдений. Так, достижение толщины 100 см происходит на 1–2 декады позже, чем до 2004 г. На некоторых станциях (о. Белый, о. Известий) это происходит на 3–4 декады позднее.

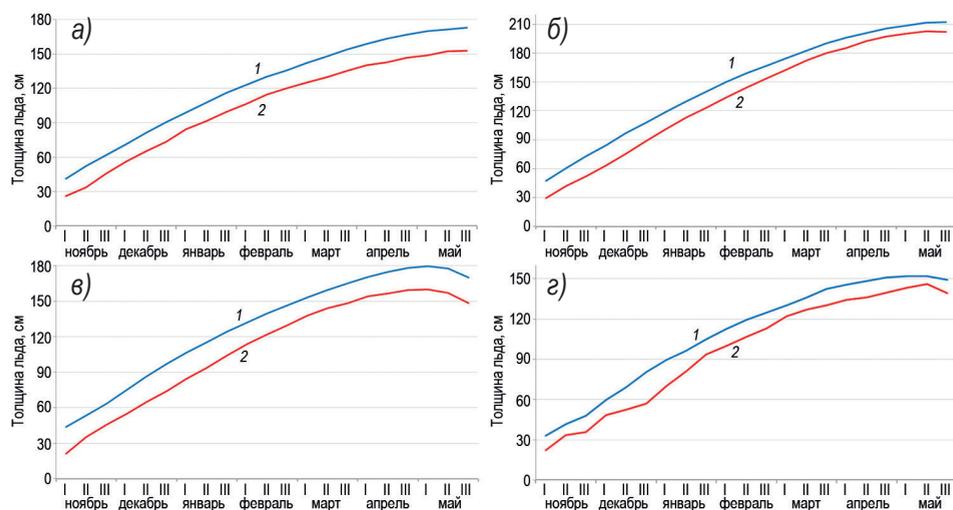


Рис. 3. Подекадное нарастание толщины льда, осредненное по станциям каждого моря за периоды: (1) начало наблюдений — 2004 г. и (2) 2005–2020 гг.: а) Карское море, б) море Лаптевых, в) Восточно-Сибирское море, з) Чукотское море

Fig. 3. Seasonal course of SIT development averaged over the periods (1) the beginning of observations — 2004 and (2) 2005–2020: а) Kara Sea, б) Laptev Sea, в) East-Siberian Sea, з) Chukchi Sea

Разница ТП на полярных станциях за каждую декаду в течение зимнего сезона между исследуемыми периодами представлена в табл. 3. Величина изменений в сезонном ходе различается по станциям: на одних диапазон значений невелик в течение всего периода нарастания (как на б. Тикси,  $-7$ – $13$  см), на других наблюдается большой разброс значений за сезон (как на о. Котельный,  $-3$ – $32$  см). Наибольшие изменения в среднем за сезон наблюдаются на о. Известий (среднесезонное значение  $-26$  см), на м. Биллингса ( $-26$  см) и Валькаркай ( $-23$  см). К сожалению, ряды данных станций м. Биллингса и Валькаркай, как уже отмечалось ранее, содержат большое количество пропусков с 1990-х гг., поэтому стоит учитывать, что значения осреднений могут быть неточными.

В целом все станции Карского моря демонстрируют медленное постепенное нарастание изменений с ноября к концу развития ледяного покрова и его толщины, т. е. к апрелю–маю. В среднем за сезон (ноябрь–май) ТП на станциях Карского моря сократилась на 15 %. В Восточно-Сибирском море также фиксируется уменьшение среднесезонной ТП на 15 %, при этом наблюдаются довольно крупные изменения на протяжении всего сезонного хода. На станциях моря Лаптевых наиболее значительные изменения с 2005 г. зафиксированы в начале процесса развития ледяного покрова. Эта особенность характерна для станций, расположенных на Новосибирских о-вах, но не для континентальной станции б. Тикси. Море Лаптевых демонстрирует наименьшее среди других морей сокращения среднесезонной ТП за последние годы ( $-9$  %). В соответствии с выполненным анализом имеющихся данных, на станциях

Таблица 3  
Table 3

Ежедекадные изменения средней толщины льда за 15 лет с 2005 г. по сравнению с предыдущим периодом наблюдений (см)  
Difference of mean SIT of each 10-day measurement between recent 2005–2020 period compared to the previous observational period (cm)

Месяц Декада	Ноябрь			Декабрь			Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Среднее за сезон
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
о. Белый	0	-4	-6	-8	-13	-18	-19	-20	-19	-19	-17	-16	-17	-19	-18	-17	-16	-16	-16	-16	-16	-17
Диксон	-8	-11	-11	-9	-10	-9	-11	-11	-11	-10	-10	-10	-10	-11	-13	-16	-21	-18	-19	-19	-19	-21
о. Известий	-22	-22	-20	-19	-22	-23	-21	-23	-24	-24	-25	-25	-28	-29	-31	-29	-31	-33	-32	-30	-31	-26
м. Стерлигова	-23	-32	-28	-24	-24	-19	-14	-14	-13	-14	-13	-12	-15	-14	-13	-13	-15	-15	-17	-14	-15	-17
м. Челюскин	-25	-23	-16	-16	-13	-15	-10	-14	-15	-16	-14	-14	-16	-19	-19	-19	-19	-18	-17	-17	-17	-17
Карское море	-16	-18	-16	-15	-16	-17	-15	-16	-16	-17	-16	-15	-17	-18	-19	-20	-20	-20	-21	-19	-20	-18
б. Тисси	-9	-9	-8	-6	-8	-7	-7	-7	-7	-12	-13	-13	-10	-11	-12	-12	-11	-12	-10	-13	-12	-12
о. Котельный	-24	-26	-35	-31	-32	-28	-26	-24	-23	-21	-18	-15	-11	-8	-7	-7	-4	-4	-4	-3	-4	-17
пр. Санникова	-19	-20	-21	-24	-24	-23	-19	-18	-16	-14	-11	-10	-10	-8	-9	-13	-9	-8	-10	-10	-13	-15
Кглиях	-21	-18	-20	-23	-22	-20	-18	-17	-17	-17	-17	-19	-17	-15	-13	-12	-10	-9	-9	-8	-10	-15
Море Лаптевых	-18	-18	-21	-21	-22	-20	-18	-17	-17	-16	-15	-13	-12	-10	-10	-10	-9	-8	-9	-8	-10	-14
Амбарчик	-17	-17	-16	-18	-20	-14	-15	-13	-13	-12	-10	-8	-7	-7	-9	-9	-9	-8	-9	-10	-7	-12
Айон	-25	-25	-18	-20	-21	-21	-20	-19	-17	-15	-13	-13	-14	-11	-10	-10	-9	-9	-10	-13	-13	-16
Певек	-18	-15	-14	-14	-18	-20	-19	-19	-19	-18	-18	-19	-20	-21	-20	-19	-21	-21	-23	-21	-31	-19
Валькаркай	-23	-20	-27	-28	-27	-31	-31	-34	-24	-20	-18	-14	-14	-14	-19	-18	-21	-23	-24	-25	-20	-23
м. Биллингса	-29	-13	-16	-23	-22	-27	-24	-23	-26	-26	-25	-27	-22	-22	-28	-27	-30	-30	-33	-36	-37	-26
Вост.-Сиб. море	-22	-18	-18	-20	-22	-23	-22	-22	-20	-18	-17	-17	-15	-16	-17	-17	-18	-18	-20	-21	-22	-19
м. Ванкарем	-17	-13	-11	-12	-12	-13	-8	-5	-4	-2	-2	-1	-1	-4	-1	-1	-3	-4	-2	-2	-5	-6
м. Уэлен	-5	-36	-14	-10	-21	-34	-31	-27	-19	-24	-23	-22	-15	-15	-24	-21	-22	-19	-14	-10	-14	-20
Чукотское море	-11	-25	-12	-11	-17	-23	-19	-16	-11	-13	-13	-12	-8	-9	-12	-11	-12	-11	-8	-6	-10	-13
Среднее	-17	-20	-17	-17	-19	-21	-18	-18	-16	-16	-15	-14	-13	-13	-15	-14	-15	-14	-14	-14	-15	-16

Чукотского моря среднесезонное снижение ТП составило  $-12\%$ . Однако это значение может отличаться от реального, поскольку значительные пробелы в данных в течение всего сезона не позволяют корректно и точно оценить происходящие изменения, отображая лишь тенденцию.

В целом усредненный по всем станциям сезонный ход нарастания льда показывает более значительные изменения на начальном этапе, с ноября до конца января (16–21 см), затем интенсивность и величина изменений немного снижаются (13–15 см). Это связано со смещением сроков начала процессов ледообразования осенью на более поздние в арктических морях в последние годы [7, 27]. Ледообразование среди остаточных льдов обычно происходит гораздо более интенсивно. Однако в последние годы из-за активного процесса таяния и уменьшения площади распространения льда к окончанию лета ледообразование начинается преимущественно на чистой воде и развивается довольно медленно [28]. В среднем для всех рассматриваемых станций снижение среднесезонной ТП составляет  $12\%$ .

### Изменение приземной температуры воздуха

Поскольку формирование льда и нарастание его толщины тесно связаны с атмосферными процессами, температурой воздуха, данные тех же полярных станций были проанализированы для оценки общих тенденций и изменений, а также оценены изменения такого показателя, как сумма градусо-дней мороза (СГДМ). При поиске связи изменения СГДМ с циркуляцией атмосферы использовался индекс арктического колебания (АО, Arctic Oscillation) [29]. Индекс АО является одной из важных характеристик крупномасштабной циркуляции в арктическом регионе в зимний период. Положительная фаза индекса соответствует фазе преобладания пониженного давления над Арктикой, когда шторм-трек (jet stream) смещается на север, тем самым циклоны и переносимое ими тепло также затягиваются по высокоширотным траекториям далеко на север. При отрицательной фазе АО, наоборот, смещение происходит к югу, траектории циклонов становятся более низкоширотными. Коэффициент корреляции между СГДМ и фазами индекса АО составляет  $-0,39$  и является значимым при уровне  $0,01$ . Во временной изменчивости индекса атмосферной циркуляции АО выделяется несколько длительных периодов преобладания одной из фаз, т. е. преобладание какого-то одного типа циркуляции. Один из таких периодов преобладания положительной фазы АО начался в 2008 г. и продолжается в настоящее время. Это позволяет предположить, что процессы, наблюдающиеся с 2005 г., связаны не только с колебаниями индекса АО, но его положительная фаза во многом усиливает процессы климатических изменений, наблюдающиеся в Арктике и влияющие, в том числе, на толщину льда.

Изменения приземной температуры воздуха наблюдаются в течение всего годового цикла, однако проявляются с разной интенсивностью по морям и сезонам года. С 2005 г. наблюдается рост среднемесячной ПТВ на  $0,1-6,4\text{ }^\circ\text{C}$  по станциям, за исключением станции Ванкарем, где в январе наблюдается снижение ПТВ на  $0,3\text{ }^\circ\text{C}$ . Значения изменений среднемесячной ПТВ по всем станциям и в среднем по морям между исследуемыми периодами приведены в табл. 4. Наибольший рост ПТВ с 2005 г. наблюдается на станциях Карского моря. Максимальное значение изменений среднемесячной температуры ( $6,4\text{ }^\circ\text{C}$ ) зафиксировано на станции о. Известий в марте. Для всех станций Карского моря характерно наиболее сильное повышение температуры в зимне-весенние месяцы (январь–апрель, на  $2,9-6,4\text{ }^\circ\text{C}$ ) и в осенний

период (октябрь–декабрь, на 1,4–5,3 °С). В морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском значительное повышение температуры на 1,4–6,1 °С наблюдается в осенние месяцы (октябрь–декабрь): разница с предыдущим периодом по станциям ВСМ в эти месяцы 3,3–6,1 °С, станции Чукотского моря показывают наибольшее увеличение в декабре 5,1–5,3 °С. Наименьшая разница с данными наблюдений до 2005 г. на всех станциях наблюдается в летние месяцы, особенно в июне и июле (0,1–1,7 °С), а также в январе в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском (от –0,3 до 2,9 °С). В целом осреднение по всем станциям демонстрирует наибольшие изменения в осенний период (октябрь–декабрь). Этот факт хорошо согласуется со смещением сроков начала ледообразования, более медленным процессом нарастания льда и более низкими значениями ТП.

Таблица 4

**Изменения среднемесячной ПТВ за 15 лет с 2005 г.  
по сравнению с предыдущим периодом наблюдений (°С)**

Table 4

**Monthly surface atmosphere temperature values of changes over the recent 15 years (°C)**

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее
о. Белый	3,8	4,8	3,7	3,2	2,1	1,2	2,2	1,3	2,0	2,8	2,9	3,4	2,8
Диксон	3,9	2,9	3,9	3,8	1,9	1,6	2,1	1,2	2,1	2,7	1,4	2,4	2,5
о. Известий	6,3	5,9	6,4	5,4	3,5	1,0	1,4	2,9	3,0	5,0	5,3	3,4	4,1
м. Стерлигова	4,6	3,2	4,0	5,2	2,1	1,2	1,0	1,7	2,5	4,0	3,6	2,1	2,9
м. Челюскин	4,2	3,8	3,7	4,1	2,4	1,0	0,1	1,3	2,6	5,0	4,7	2,8	3,0
Карское море	4,6	4,1	4,3	4,3	2,4	1,2	1,3	1,7	2,4	3,9	3,6	3,6	2,8
б. Тикси	2,9	0,1	2,7	3,4	1,7	1,7	1,2	1,9	1,6	2,6	3,7	1,4	2,1
о. Котельный	2,4	2,2	2,6	4,1	2,1	1,3	1,0	2,1	2,7	4,2	4,4	2,3	2,6
пр. Санникова	2,6	1,9	2,4	3,7	2,3	0,5	0,3	1,8	2,7	5,0	5,0	2,8	2,7
Кигилях	2,0	1,5	2,3	3,1	2,1	1,1	0,8	2,2	2,4	4,4	5,1	2,6	2,5
Море Лаптевых	2,5	1,4	2,5	3,6	2,1	1,2	0,8	2,0	2,4	4,1	4,6	2,3	2,5
Амбарчик	1,1	0,8	2,7	2,8	1,9	1,3	1,4	2,0	2,1	3,3	5,1	2,9	2,3
Айон	0,9	2,3	2,5	2,9	1,5	1,1	1,6	2,0	2,8	4,9	5,7	4,6	2,7
Певек	0,5	1,7	2,3	2,1	1,7	1,2	1,4	1,9	2,6	4,8	6,1	4,2	2,6
Валькаркай	1,3	2,5	2,9	2,8	2,1	0,6	1,6	2,0	2,9	5,1	6,1	5,2	2,9
м. Биллингса	0,5	2,7	2,4	2,2	1,7	0,5	1,3	1,7	2,7	4,9	5,2	4,3	2,5
Вост.-Сиб. море	0,9	2,0	2,6	2,5	1,8	0,9	1,4	1,9	2,6	4,6	5,6	4,2	2,6
м. Ванкарем	–0,3	3,6	2,2	1,4	1,8	1,2	1,1	1,9	2,7	5,2	4,5	5,1	2,5
м. Уэлен	0,8	3,9	1,7	1,8	1,8	1,6	1,1	1,4	2,0	3,3	4,0	5,3	2,4
Чукотское море	0,2	3,0	2,0	1,6	1,8	1,4	1,1	1,7	2,3	4,2	4,2	5,2	2,4
Среднее	2,3	2,7	3,0	3,3	2,0	1,1	1,2	1,8	2,5	4,2	4,6	3,4	2,7

*Примечание.* Красным выделены наибольшие значения изменения температуры (свыше 5,0 °С); оранжевым крупные изменения (3,5–5,0 °С); голубым выделены наименьшие изменения (менее 1,5 °С).

*Note.* The largest values of temperature changes (over 5.0 °C) are highlighted in red; large changes (3.5–5.0 °C) are highlighted in orange; the smallest changes (less than 1.5 °C) are highlighted in blue.

### Типизация зим и сумма градусо-дней мороза

Такой показатель, как сумма градусо-дней мороза, хорошо подходит для совместной оценки изменений температуры воздуха и нарастания толщины льда. Зависимость толщины льда от СГДМ изучалась многими авторами и довольно хорошо известна [30–32]. Суровость зимнего периода является важным параметром для оценки климатических изменений, и СГДМ используется для определения критериев и интервалов для выделения типов зим в зависимости от их суровости. В соответствии с методологией, описанной в монографии [33], ряды данных каждой рассматриваемой полярной станции были проанализированы, по результатам рассчитаны критерии и интервалы, по которым определены типы зим для каждого года с начала наблюдений до 2020 г. (табл. 1). В пределах выделенных диапазонов СГДМ зимы классифицируются как суровые (С), умеренные (У) и мягкие (М). Средние значения СГДМ и повторяемость типов зимы для каждой станции содержатся в табл. 5.

Все станции демонстрируют снижение СГДМ с 2005 г. на 10–26 %. Наиболее значительное снижение наблюдается на станциях Карского моря 19 %, в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море уменьшение СГДМ составило 15 %, в Чукотском

Таблица 5

Средние значения СГДМ и повторяемость суровых (С), умеренных (У) и мягких (М) зим за исследуемые периоды времени

Table 5

Mean values of sum of the frost degree-days and the repeatability of severe (C), moderate (Y) and mild (M) winters for the time periods investigated

Полярная станция	СГДМ, С°		Повторяемость типов зим, %						Коэфф. корреляции СГДМ/средне-сезонная ТП	Коэфф. корреляции СГДМ/максимальная ТП
	до 2004	2005–2020	до 2004			2005–2020				
			С	У	М	С	У	М		
о. Белый	4084	3364	20	68	12	0	33	67	0,7	0,7
Диксон	4497	3778	20	67	13	0	47	53	0,8	0,8
о. Известий	4900	3626	44	52	4	0	27	73	0,7	0,6
м. Стерлигова	5255	4363	16	67	7	0	33	67	0,6	0,5
м. Челюскин	5445	4436	22	69	8	0	20	80	0,6	0,6
Карское море	4836	3913	24	67	9	0	32	68	0,5	0,4
б. Тикси	5342	4820	23	61	16	0	47	53	0,5	0,6
о. Котельный	5509	4732	25	71	4	0	20	80	0,4	0,3
пр. Санникова	5596	4812	25	68	6	0	7	93	0,5	0,3
Кигилях	5377	4510	26	70	5	0	0	100	0,4	0,3
Море Лаптевых	5468	4662	24	64	11	0	20	80	0,7	0,6
Амбарчик	5045	4452	21	69	10	0	25	75	0,5	0,5
Айон	4985	4272	23	71	6	0	20	80	0,4	0,3
Певек	4543	3748	25	59	16	0	40	60	0,4	0,4
Валькаркай	4714	3937	16	76	8	0	25	75	0,4	0,4
м. Биллингса	4775	4021	19	74	7	0	40	60	0,3	0,5
Вост.-Сиб. море	4812	4086	21	70	9	0	25	75	0,4	0,4
м. Ванкарем	4187	3509	20	71	9	0	40	60	0,3	0,4
м. Уэлен	3228	2700	11	75	14	0	50	50	0,4	0,4
Чукотское море	3708	3105	16	73	11	0	45	55	0,3	0,5
Среднее	4685	4030	24	70	6	0	0	100	0,6	0,8

море — 16 %. За период 2005–2020 гг. в среднем по всем станциям показатель СГДМ сократился на 14 %, максимальное падение зафиксировано на о. Известий (Карское море), наименьшее снижение в б. Тикси (море Лаптевых).

В период до 2005 г. суровые зимы наблюдались чаще, чем мягкие, эта особенность характерна практически для каждой станции. Самая низкая повторяемость суровых зим и самая высокая повторяемость мягких за этот период наблюдалась на станциях Чукотского моря, что указывает на его более мягкие условия по сравнению с другими морями. Преобладание повторяемости умеренных зим наблюдалось на всех станциях до 2005 г. За 15-летний период с 2005 г. ни на одной из станций не было отмечено зимы, которая соответствовала бы критериям суровой, при этом повторяемость умеренных зим уменьшилась, а частота мягких зим увеличилась на 36–95 % в зависимости от станции. Наблюдающееся в последнее время смягчение зимнего сезона можно объяснить преобладанием положительной фазы Арктического колебания АО и, соответственно, смещением атлантических циклонов по более высокоширотным траекториям с привносом тепла.

Снижение СГДМ оказывает значительное влияние как на максимальную толщину льда, так и на среднесезонную (осреднение за ноябрь–май). Соответствие изменений СГДМ максимальной и среднесезонной толщине льда показано на рис. 4.

Очевидно, что снижение СГДМ хорошо согласуется с изменениями среднесезонной и максимальной толщины льда на станциях. Наибольшая величина изменений всех трех характеристик отмечается на станции о. Известий. Изменения на станции о. Котельный выделяются значительным снижением СГДМ и среднесезонной толщины, но почти неизменной максимальной толщиной льда в ходе современного аномально теплого периода. По рис. 4 заметна некоторая несогласованность изучаемых параметров на станциях Валькаркай, м. Биллингса, Ванкарем, м. Уэлен. Возможные причины, связанные в большей степени с пропусками в рядах наблюдений, уже обсуждались ранее.

Для рядов данных по каждой станции был проведен корреляционный анализ как для максимальной, так и для среднесезонной толщины льда (табл. 5). Коэффициенты

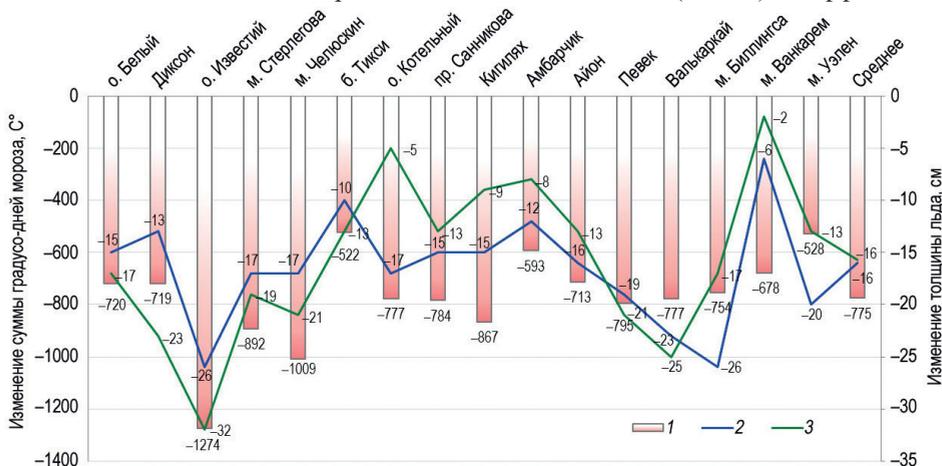


Рис. 4. Изменения СГДМ (1), среднесезонной, ноябрь–май (2), и максимальной (3) толщины льда по полярным станциям, наблюдающиеся с 2005 г.

Fig. 4. Changes of the SFDD (1), and the seasonal mean (November–May) sea ice thickness (2) annual maximum sea ice thickness (3) at the polar stations from 2005

статистически значимы на всех станциях. На станциях Чукотского моря отмечается более слабая связь со среднесезонной толщиной. Ранее в литературе отмечалось, что формирование ледяного покрова в арктических морях определяется либо термическими, либо термодинамическими факторами [34]. Вероятно, в Чукотском море, помимо температуры воздуха, важную роль играет океаническая циркуляция, что снижает корреляцию с температурой воздуха. Однако погрешность может также давать большое количество пропусков в ежегодных данных этих станций.

Примечательно, что среднесезонная толщина льда часто показывает лучшую корреляцию с СГДМ, чем максимальная толщина льда. Такой параметр, как максимальная толщина льда, широко используется в разнообразных гидрометеорологических исследованиях. Обычно максимальное значение толщины льда в годовом цикле фиксируется в апреле или мае, т. е. в конце периода развития припая. Однако дата, когда был достигнут максимум, и то, как быстро происходило нарастание толщины в ходе сезона, обычно не принимаются во внимание, в гидрометеорологическом анализе учитывается лишь само максимальное значение. Тем не менее снижение индекса СГДМ и сокращение продолжительности периода активного нарастания льда могут быть лучше отражены такой характеристикой, как среднесезонная толщина льда. Этот показатель представляется более информативным, поскольку он учитывает как максимальные значения сезонного хода, так и более медленное течение процесса ледообразования и нарастания, а также имеет хорошую корреляцию с СГДМ. Имеет смысл более тщательно рассмотреть согласованность этих параметров в дальнейших исследованиях.

На рис. 5 представлена межгодовая повторяемость суровых, умеренных и мягких зим и кривая многолетней изменчивости максимальной толщины льда (осреднение по всем станциям). Годы были типизированы по критериям, рассчитанным на основании осредненных по всем изучаемым станциям рядов СГДМ, начиная с сезона 1942/43 (с этого года наблюдения есть на всех станциях) по 2022-й. На графике хорошо проявляется окончание известного в литературе периода потепления Арктики 1930–1940-х гг. [9, 10, 36, 37] за счет повышенной повторяемости умеренных зим и более низких значений ТП вплоть до 1950-х гг. Период 1960–1980-х гг.

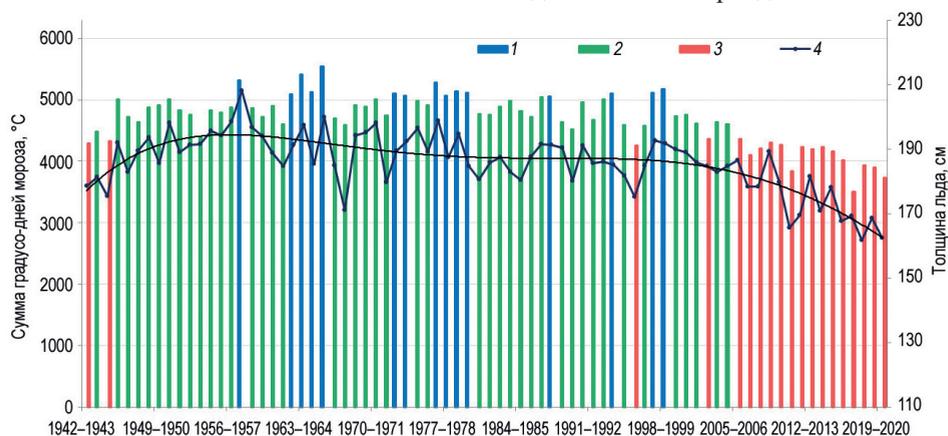


Рис. 5. Межгодовая изменчивость осредненной по всем полярным станциям СГДМ и максимальной толщины льда. Суровая зима (1), умеренная (2), мягкая (3) и максимальная толщина льда (4)  
 Fig. 5. Interannual variability of SFDD averaged by all polar stations and annual maximum sea ice thickness. Severe winter (1), moderate (2), mild (3) and maximum sea ice thickness (4)

выделяется высокой повторяемостью суровых зим и большой толщиной льда. С 1980-х наблюдается уменьшение повторяемости суровых зим, последний сезон, классифицированный по критериям как суровый, это 1998/99. Примечательно, что довольно продолжительный период, с 1944/1945 по 1995/1996 годы мягких зим не наблюдалось вовсе. Однако 15-летний период 2005–2020 гг. резко выделяется тем, что в нем присутствуют зимы, классифицируемые только как мягкие, и со значительным снижением максимальной толщины льда.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение толщины льда по данным полярных станций, разумеется, не может полноценно характеризовать динамику толщины арктического ледяного покрова, поскольку измерения проводятся на припайном, а не на дрейфующем льду (припайный лед всегда более толстый). Тем не менее длинный ряд наблюдений с достаточно точными контактными измерениями позволяет с высокой степенью надежности оценивать изменения толщины льда в современных климатических условиях.

Максимальная толщина льда (максимум, достигнутый за один зимний сезон) широко используется в различных исследованиях морского льда и других гидрометеорологических изысканиях. Межгодовая изменчивость максимальной толщины льда на станциях характеризуется значительным диапазоном колебаний (55–131 см) и хорошо выраженным отрицательным трендом. Толщина льда на момент максимального нарастания колеблется по станциям в пределах 135–221 см, самый толстый припай в рядах наблюдений выявлен на станциях моря Лаптевых. Абсолютные максимумы толщины припая (т. е. максимальное значение за всю историю наблюдений на конкретной станции) на всех станциях были зафиксированы в период до 2005 г., а все абсолютные минимумы — после 2005 г. В среднем толщина припая на момент максимального нарастания по станциям Арктики сократилась на 8 % по сравнению с предыдущим периодом. Наибольшее уменьшение характерно для станций Карского моря, –13 %. Для станций Восточно-Сибирского моря уменьшение составило –9 % и –5 % в морях Лаптевых и Чукотском.

Анализ сезонного хода развития ледяного покрова по ежедекадным измерениям выявил значительно более медленное нарастание толщины льда на всех станциях за 15-летний период с 2005 г. Ледообразование начинается позже, а сроки перехода между возрастными градациями сместились на 1–2 декады на более поздний срок (в некоторых случаях даже на 3–4 декады, как на о. Белый и о. Известий). Средняя за сезон (за ноябрь–май) толщина припая по всем станциям сократилась на 12 %. Наибольшее сокращение наблюдается на станциях Карского и Восточно-Сибирского моря — 15 %, уменьшение на станциях Чукотского моря составляет –12 %, а море Лаптевых демонстрирует наименьшее сокращение среднесезонной толщины льда за последние годы, –9 %.

Поскольку изменения толщины припая в первую очередь связаны с процессами, происходящими в атмосфере, были проанализированы изменения температуры воздуха на тех же станциях. Выявлено, что с 2005 г. среднемесячная ПТВ увеличилась в среднем на 2,7 °С. Наибольший рост ПТВ наблюдается на станциях Карского моря, для которого характерен значительный рост ПТВ в зимне-весенние (январь–апрель) и осенние месяцы (2,9–6,4 °С). В целом во всех морях наиболее значительное повышение температуры наблюдается в осенние месяцы (октябрь–декабрь), а наименьшее в летние месяцы (июнь–июль), а также в январе (кроме Карского). Факт значительных изменений ПТВ

в осенний период хорошо согласуется со смещением сроков начала ледообразования, медленным нарастанием льда и более низкими значениями ТП к концу сезона.

Это подтверждает и изменение показателя СГДМ, который за период 2005–2020 гг. в среднем по всем станциям сократился на 14 %. До 2005 г. на всех станциях преобладали умеренные зимы, наблюдались суровые и мягкие. С 2005 г. повторяемость мягких зим увеличилась на 36–95 %, и ни на одной из станций не было отмечено зимы, которая соответствовала бы критериям суровой. А при аналогичном анализе с осреднением СГДМ всех станций с 1942/43 г. выявлено, что 15-летний период 2005–2020 гг. резко выделяется наличием зим, классифицируемых только как мягкие, и, как следствие, значительным снижением толщины льда. Изменения и максимальной, и среднесезонной (ноябрь–май) толщины льда хорошо согласуются со снижением СГДМ, коэффициенты корреляции статистически значимы на всех станциях. В некоторых случаях среднесезонное значение толщины льда показывает лучшую корреляцию с СГДМ, чем максимальная толщина припая, вероятно, по причине того, что в этом параметре уже частично отражаются сезонные особенности, он более чувствителен к накоплению СГДМ. В заключение следует отметить, что исследуемый 15-летний период (2005–2020 гг.) отличается самыми мягкими условиями за всю историю наблюдений на полярных станциях российских арктических морей.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках программы ЦНТП № 5.1.2. 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.

**Благодарности.** Авторы признательны заведующему отделом ледового режима и прогнозов Е.У. Миронову за помощь при подготовке статьи.

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

**Funding.** The work was carried out within the framework of section 5.1.2 Development of existing and new methods and technologies for long-term (monthly and seasonal) forecasting of the ice-hydrological regime elements of the Arctic seas, down the rivers and estuaries in the climate change conditions.

**Acknowledgments.** The authors are grateful to E.U. Mironov, Head of the Department of Ice Regime and Forecasts, for help in preparing the article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Comiso J.J.* Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover // *J. Clim.* 2012. V. 25. P. 1176–1193.
2. *Petty A.A., Stroeve J.C., Holland P.R., Boisvert L.N., Bliss A.C., Kimura N., Meier W.N.* The Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows // *The Cryosphere.* 2018. V. 12 (2). P. 433–453. <http://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018>.
3. *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 // *Climate Change.* 2012. V. 110. P. 1005–1027. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>.
4. *Serreze M.C., Stroeve J., Barrett A.P., Boisvert L.N.* Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121. P. 11463–11485. <https://doi.org/10.1002/2016JD025161>.

5. *Stroeve J.C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A.* Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss // *Geophys. Res. Lett.* V. 41 (4). P. 1216–1225. <http://doi.org/10.1002/2013GL058951>.
6. *Serreze M.C., Holland M.M., Stroeve J.* Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover // *Science.* 2007. V. 315. P. 1533–1536. <https://doi.org/10.1126/science.1139426>.
7. *Егоров А.Г., Павлова Е.А.* Изменение сроков устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в начале XXI в. // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2019. Т. 6 (4). С. 389–404. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>.
8. *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. С. 44–60.
9. *Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E., Smolyanitsky V.* Climate change in Eurasian Arctic shelf seas. *Centennial Ice Cover Observations.* Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd., 2009. 164 p.
10. *Иванов В.В., Алексеенков Г.А., Коржииков А.Я.* О совершенствовании макроциркуляционного метода долгосрочного метеорологического прогноза в Карском море // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России).* 2018. № 4 (370). С. 105–121.
11. *Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е.* Изменение климата Арктики при глобальном потеплении // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2015. № 1 (103). С. 32–42.
12. *Ашик И.М., Иванов В.В., Кассенс Х., Махотин М.С., Поляков И.В.* Основные результаты океанологических исследований Северного Ледовитого океана в последнее десятилетие // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2015. № 1 (103). С. 42–56.
13. *Timofeeva A., Sharatunova M, Pavlova E., Sheveleva T., Yulin A.* General tendencies of the ice extent changes in the Russian Arctic seas // *Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC-2021),* June 14–18, 2021, Moscow, Russia. URL: <https://www.poac.com/Proceedings/2021/POAC21-078.pdf> (дата обращения: 01.09.2023).
14. *Rothrock D.A., Yu Y., Mayakut G.A.* Thinning of Arctic Sea ice cover // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 3469–3472.
15. *Rothrock D., Zhang J., Yu Y.* The Arctic ice thickness anomaly of the 1990s: a consistent view from observations and models // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108 (C3). Paper 3083. doi: 10.1029/2001JC001208.
16. *Haas C.* Late-summer sea ice thickness variability in the Arctic Transpolar Drift 1991–2001 derived from ground-based electromagnetic sounding // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L09402. doi: 10.1029/2003GL019394.
17. *Haas C., Howell S.E.L.* Ice thickness in the Northwest Passage // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. 10.1002/2015GL065704. <https://doi.org/10.1002/2015GL065704>
18. *Kwok R., Untersteiner N.* The thinning of Arctic sea ice // *Phys. Today.* 2011. V. 64. P. 36–41. doi: 10.1063/1.3580491.
19. *Ricker R., Hendricks S., Girard-Ardhuin F., Kaleschke L., Lique C., Tian-Kunze X., Nicolaus M., Krumpfen T.* Satellite observed drop of Arctic sea ice growth in winter 2015–2015 // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. P. 3236–3245. <https://doi.org/10.1002/2016GL072244>.
20. *Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C.* A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data // *The Cryosphere.* 2017. V. 11. P. 1607–1623. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>.
21. *Stroeve J.C., Schroeder D., Tsamados M., Feltham D.* Warm winter, thin ice? // *The Cryosphere.* 2018. V. 12. P. 1791–1809. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1791-2018>.
22. *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. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>.

23. Смоляницкий В.М., Торяков А.Б., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat-2 и численных оценок системы PIOMAS // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66 (3). С. 337–348. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348>.
24. Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX — начале XXI века. СПб.: ААНИИ, 2012. 180 с.
25. Карклин В.П., Карелин И.Д., Юлин А.В., Иванов Н.Е., Усольцева Е.А. Особенности формирования припая в море Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3 (97). С. 5–14.
26. РД 52.10.842-2017 Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Ч. I. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. М.: ООО «Издание ИТРК», 2017. 375 с.
27. 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. № 3 (113). С. 16–26. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26>.
28. Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. канд. геогр. наук И.М. Ашика. СПб.: ААНИИ, 2021. 360 с.
29. National Oceanic and Atmospheric Administration, Daily archive of Arctic Oscillation Index. URL: <https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/cwlinks%20/> (дата обращения: 27.10.2022).
30. Зубов Н.Н. О льдах Арктики и Антарктики. М.: МГУ, 1956. 60 с.
31. Доронин Ю.П. К вопросу о нарастании морского льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1959. № 1. С. 73–79.
32. Тимофеева А.Б., Шаратунова М.В. Многолетняя изменчивость толщины припая в море Лаптевых по данным полярных станций // Российская Арктика. 2021. № 12. С. 62–76. doi: 10.24412/2658-4255-2021-1-62-76.
33. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
34. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V. Long-term ice variability in Arctic marginal seas // Journal of Climate. 2003. V. 16. № 12. P. 2078–2085. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<2078:LIVIAM>2.0.CO;2.
35. Гирс А.А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 560 с.
36. 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. № 4. С. 50–65. doi: 10.7868/S0205961413040076.

## REFERENCES

1. Comiso J.J. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover. J. Clim. 2012, 25: 1176–1193.
2. Petty A.A., Stroeve J.C., Holland P.R., Boisvert L.N., Bliss A.C., Kimura N., Meier W.N. The Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows. The Cryosphere. 2018, 12 (2): 433–453. <http://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018>.
3. 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. Climate Change. 2012, 110: 1005–1027. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>.
4. Serreze M.C., Stroeve J., Barrett A.P., Boisvert L.N. Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale. J. Geophys. Res.: Atmos. 2016, 121: 11463–11485. <https://doi.org/10.1002/2016JD025161>.

5. *Stroeve J.C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A.* Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophys. Res. Lett.* 2014, 41 (4): 1216–1225. <http://doi.org/10.1002/2013GL058951>.
6. *Serreze M.C., Holland M.M., Stroeve J.* Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *Science.* 2007, 315: 1533–1536. <https://doi.org/10.1126/science.1139426>.
7. *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. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (4):389–404. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>.
8. *Yulin A.V., Timofeeva A.B., Pavlova E.A., Sharatunova M.V., Hotchenkov S.V.* Interannual and seasonal changes the ice cover in the Russian Arctic seas in the modern climatic period. *Trudy GOIN.* GOIN Proceedings. 2019, 220: 44–60. [In Russian].
9. *Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E., Smolyanitsky V.* Climate change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial ice cover observations. Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd., 2009: 164 p.
10. *Ivanov V.V., Alekseyev 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.* HydrometeoCenter Proceed. 2018, 4 (370): 105–121. [In Russian].
11. *Alekseev G.V., Radionov V.F., Alexandrov E.I., Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E.* Climate change in the Arctic under global warming. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2015, 1 (103): 32–42. [In Russian].
12. *Ashik I.M., Ivanov V.V., Kassens H., Makhotin M.S., Polyakov I.V.* General results of Arctic Ocean oceanological studies in the last decade. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2015, 1 (103): 42–56. [In Russian].
13. *Timofeeva A., Sharatunova M, Pavlova E., Sheveleva T., Yulin A.* General tendencies of the ice extent changes in the Russian Arctic seas. Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC-2021), June 14–18, 2021, Moscow, Russia. Available at: <https://www.poac.com/Proceedings/2021/POAC21-078.pdf> (accessed 01.09.2023).
14. *Rothrock D.A., Yu Y., Maykut G.A.* Thinning of Arctic sea ice cover. *Geophys. Res. Lett.* 1999, 26: 3469–3472.
15. *Rothrock D., Zhang J., Yu Y.* The Arctic ice thickness anomaly of the 1990s: a consistent view from observations and models. *J. Geophys. Res.* 2003, 108 (C3): 3083. doi: 10.1029/2001JC001208.
16. *Haas C.* Late-Summer sea ice thickness variability in the Arctic Transpolar Drift 1991–2001 derived from ground-based electromagnetic sounding. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 31: L09402. doi: 10.1029/2003GL019394.
17. *Haas C., Howell S.E.L.* Ice thickness in the Northwest Passage. *Geophys. Res. Lett.* 2015, 42: 10.1002/2015GL065704. <https://doi.org/10.1002/2015GL065704>
18. *Kwok R., Untersteiner N.* The thinning of Arctic sea ice. *Phys. Today.* 2011, 64: 36–41. doi: 10.1063/1.3580491.
19. *Ricker R., Hendricks S., Girard-Ardhuin F., Kaleschke L., Lique C., Tian-Kunze X., Nicolaus M., Krumpfen T.* Satellite observed drop of Arctic sea ice growth in winter 2015–2015. *Geophys. Res. Lett.* 2017, 44: 3236–3245. <https://doi.org/10.1002/2016GL072244>.
20. *Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C.* A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data. *The Cryosphere.* 2017, 12: 1791–1809. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>.
21. *Stroeve J.C., Schroeder D., Tsamados M., Feltham D.* Warm winter, thin ice? *The Cryosphere.* 2018, 12: 1791–1809. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1791-2018>.
22. *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]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>.

23. Smolyanitsky V.M., Turyakov A.B., Filchuk K.V., Frolov I.E. Comparison of direct measurements of sea ice thickness and snow height, CryoSat-2 observations and PIOMAS numerical estimates. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 337–348. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348>.
24. Karelin I.D., Karklin V.P. Pripaj i zapripajnye polyn'i arkticheskikh morej sibirskogo shel'fa v konce XX — nachale XXI veka. Landfast ice and flaw polynyas of the Arctic seas of Siberian offshore in late XX — early XXI century. St. Petersburg: AARI, 2012: 180 p. [In Russian].
25. Karklin V.P., Karelin I.D., Yulin A.V., Ivanov N.E., Usoltseva E.A. Landfast ice formation features in the Laptev Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2013, 3 (97): 5–14. [In Russian].
26. RD 52.10.842-2017 *Nastavleniya gidrometeorologicheskim stanciyam i postam*. Vyp. 9. *Gidrometeorologicheskie nablyudeniya na morskikh stanciyah i postah*. CH. I. *Gidrologicheskie nablyudeniya na beregovykh stanciyah i postah*. Manual for hydrometeorological stations and posts. Issue 9. Hydrometeorological observations at sea stations and posts. Part I. Hydrological observations at coastal stations and posts. Moscow: OOO "Izdanie ITRK", 2017: 375 p. [In Russian].
27. 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]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26>.
28. *Moria Rossijskoi Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh*. Russian Arctic Seas the in modern climatic conditions. Ed. I.M. Ashik. St. Petersburg: AARI, 2021: 360 p. [In Russian].
29. National Oceanic and Atmospheric Administration, Daily archive of Arctic Oscillation Index. Available at: <https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/cwlinks%20/> (accessed: 27.10.2022).
30. Zubov N.N. *O l'dakh Arktiki i Antarktiki*. Concerning the ice of the Arctic and Antarctic. Moscow: Moscow State University, 1956: 60 p. [In Russian].
31. Doronin Yu. P. Concerning the issue of sea ice development. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 1959, 1: 73–79. [In Russian].
32. Timofeeva A.B., Sharatunova M.V. Multiyear variability of the fast ice thickness in the Laptev Sea according to the polar stations data. *Russian Arctic*. 2021, 12: 62–76. [In Russian]. doi: 10.24412/2658-4255-2021-1-62-76.
33. Dumanskaya I.O. *Ledovye usloviya morej aziatskoj chasti Rossii*. Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. Moscow: IG–SOCIN, 2017: 640 p. [In Russian].
34. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V. Long-term ice variability in Arctic marginal seas. *Journal of Climate*. 2003, 16 (12): 2078–2085. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<2078:LIVIAM>2.0.CO;2.
35. Girs A.A. *Osnovy dolgosrochnykh prognozov pogody*. Fundamentals of long-term weather forecasts. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1960: 560 p. [In Russian].
36. Ivanov V.V., Alexeev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Does Arctic ocean ice cover become seasonal? *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. Earth Observation and Remote Sensing. 2013, 4: 50–65. [In Russian]. doi: 10.7868/S0205961413040076.