

НЕКОТОРЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ИЗМЕНЕНИИ ЛЕДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ В XXI ВЕКЕ

И.О. Думанская

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации;
dumansk@rambler.ru*

Введение

Приведенные в статье результаты климатического исследования, которое подробно будет описано в готовящемся в настоящее время издании «Ледовые условия морей азиатской части России» – это обобщение фактов, накопленных на протяжении 60–90 лет в виде рядов системных инструментальных и визуальных наблюдений. В табл. 1 – информация об использованных рядах наблюдений (заканчивающихся ледовым сезоном 2014/2015 гг.). Следует отметить, что в рядах ледовых характеристик имеются пропуски информации, причиной которых является либо отсутствие наблюдений в отдельные годы, либо непоступление информации в ФГБУ «Гидрометцентр России» по каналам связи. Кроме того, некоторое искажение информации могло происходить в ходе перевода информации в код КН-02, а также в ходе расшифровки данных кода (человеческий фактор). Для минимизации ошибок в сомнительных случаях проводилось сравнение информации соседних станций. Недостоверные случаи по возможности исключались из расчетов. Правдоподобие экстремальных ледовых ситуаций проверялось путем сопоставления их с сопутствующими метеорологическими (прежде всего температурными) условиями.

Ряды данных наблюдений за суммой градусодней мороза (СГДМ), ледовыми фазами (ЛФ) и толщинами припайного льда

(ТЛ) находятся в электронном ледовом архиве Гидрометцентра России. Мониторинг изменчивости ледовитости арктических морей и площадей ледяных массивов осуществляют специалисты ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ААНИИ) [4].

Таблица 1

Ряды наблюдений за ледовыми характеристиками в арктических морях и пропуски данных в них

Море	Район моря, пункт или объект наблюдений	Характеристика	Число лет наблюдений	Пропуски данных, %
Карское	Амдерма	СГДМ	76	0
	о. Диксон	СГДМ	94	0
	Стерлигова	СГДМ	80	2
	о. Визе	СГДМ	69	0
	о. Голомянный	СГДМ	84	0
	Челюскин	СГДМ	82	0
	Амдерма	ЛФ	81	5
	Усть-Кара	ЛФ	81	10
	Марре-Сале	ЛФ	82	3
	о. Белый	ЛФ	81	12
	о. Диксон	ЛФ	82	0
	Сопочная Карга	ЛФ	60	17
	Стерлигова	ЛФ	81	6
	Известий ЦИК	ЛФ	62	8
	о. Визе	ЛФ	70	6
	о. Голомянный	ЛФ	79	4
	Челюскин	ЛФ	83	6
	Амдерма	ТЛ	76	2
	Марре-Сале	ТЛ	76	0
	о. Белый	ТЛ	82	12
	Диксон	ТЛ	92	2
	Сопочная Карга	ТЛ	74	2
	Стерлигова	ТЛ	79	4
	Известий ЦИК	ТЛ	61	0
	о. Визе	ТЛ	70	2
	о. Голомянный	ТЛ	78	19
	Челюскин	ТЛ	81	9
ЮЗ часть моря*	Л	75	0	
СВ часть моря*	Л	75	0	
Все море*	Л	75	0	

Продолжение табл. 1

Море	Район моря, пункт или объект наблюдений	Характеристика	Число лет наблюдений	Пропуски данных, %
Карское	НЗМ*	ПЛ	78	0
	СЗМ*	ПЛ	78	0
	СКМ*	ПЛ	66	0
Лаптевых	Хатанга	СГДМ	82	0
	Тикси	СГДМ	80	0
	о. Котельный	СГДМ	79	0
	Тикси	ЛФ	82	1
	Кигилях	ЛФ	81	4
	Санникова	ЛФ	72	6
	о. Котельный	ЛФ	79	6
	Тикси	ТЛ	75	1
	Кигилях	ТЛ	81	2
	Санникова	ТЛ	75	4
	о. Котельный	ТЛ	76	0
	З часть моря**	Л	74	2
	В часть моря**	Л	74	2
	Все море**	Л	74	2
	ТМ**	ПЛ	78	4
Восточно-Сибирское	Чокурдах	СГДМ	76	3
	Амбарчик	СГДМ	81	0
	о. Айон	СГДМ	73	0
	Биллингса	СГДМ	80	0
	Амбарчик	ЛФ	80	6
	Рау-Чуа	ЛФ	74	9
	о. Айон	ЛФ	74	2
	Певек	ЛФ	73	9
	Валькаркай	ЛФ	80	5
	Биллингса	ЛФ	80	18
	Амбарчик	ТЛ	82	5
	Рау-Чуа	ТЛ	74	9
	о. Айон	ТЛ	73	0
	Певек	ТЛ	74	1
	З часть моря****	Л	70	0
	В часть моря****	Л	70	0
	Все море****	Л	70	0
	НСМ****	ПЛ	70	0
АМ****	ПЛ	70	0	
Чукотское	м. Шмидта	СГДМ	81***	0
	о. Врангеля	СГДМ	89	1
	Ванкарем	СГДМ	80	1

Море	Район моря, пункт или объект наблюдений	Характеристика	Число лет наблюдений	Пропуски данных, %
Чукотское	Уэлен	СГДМ	84	1
	Ванкарем	ЛФ	80	12
	Уэлен	ЛФ	81	11
	ЮЗ часть моря	Л	77	0
	ВМ	ПЛ	77	0
	СЧМ	ПЛ	51	2

Примечание. СГДМ – сумма градусодней мороза, ЛФ – ледовые фазы, ТЛ – толщина припайного льда, Л – ледовитость, ПЛ – площадь, НЗМ – Новоземельский массив, СЗМ – Североземельский массив, СКМ – Северный Карский массив, ТМ – Таймырский массив, ЯМ – Янский массив, НСМ – Новосибирский массив, АМ – Айонский массив, ВМ – Врангелевский массив, СЧМ – Северный Чукотский массив;

* данные за июнь с 1968 г. (длина ряда наблюдений для июня – 48 лет, для июля-сентября – в соответствии с таблицей);

** данные за июнь с 1967 г. (длина ряда наблюдений для июня – 49 лет, для июля-сентября – в соответствии с таблицей);

*** данные до 2013 года;

**** данные за июнь с 1965 г. (длина ряда наблюдений для июня – 51 год, для июля-сентября – в соответствии с таблицей).

Изменения ледового режима арктических морей на рубеже XX–XXI веков

В табл. 2 приведены средние, максимальные и минимальные значения СГДМ за 100-летний период (XX век), за последние 30 лет и за первые 15 лет XXI века для ряда гидрометеорологических станций (ГМС).

Анализ табл. 2 показывает, что в последнее 30-летие по сравнению с XX веком средние СГДМ для западных арктических морей уменьшились на 257 °С (на 5 %), а для восточных морей – на 307 °С (на 7 %). В течение первых 15 лет XX века процесс потепления шел примерно с одинаковой интенсивностью на западных и восточных морях. Средняя СГДМ для акваторий морей уменьшилась на 521–528 °С, потери СГДМ составили 11 % по отношению к средним значениям в XX веке.

В последнее 30-летие ни по одному морю не был перекрыт абсолютный максимум XX века для сумм градусодней мороза, а на первые 15 лет XXI века пришлось 82 % всех абсолютных минимумов СГДМ.

Таблица 2

Средние, максимальные и минимальные значения сумм градусо-дней мороза (СГДМ) за различные периоды времени (в °С)

Море, район моря	ГМС	СГДМ								
		в XX веке			за последнее 30-летие			за 15 лет XXI века		
		Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.
ЮЗ часть Карского моря	Амдерма	2990	4110	1949	2775	4043	1874	2610	3189	1874
	о. Диксон	4480	5803	3324	4300	5168	2976	4110	5134	2976
СВ часть Карского моря	Стерлигова	5260	6369	4083	5040	5997	3816	4730	5732	3816
	о. Визе	5130	6190	4068	4660	5754	2451	4140	5632	2451
	о. Голомян- ный	5385	6540	4336	5080	6162	3742	4660	5856	3742
	Челюскин	5445	6467	4257	5190	6084	4092	4855	5732	4092
Море Лаптевых	Хатанга	5570	6697	4495	5330	6228	4584	5215	6228	4584
	Тикси	5340	6205	4400	5180	6105	4477	5060	5763	4493
	о. Котельный	5525	6138	4811	5260	5874	4448	4990	5682	4448
Восточно- Сибирское море	Чокурдах	5810	6418	5050	5560	6257	4917	5385	5855	4917
	Амбарчик	5080	5853	4123	4815	5679	4122	4595	5202	4122
	о. Айон	5040	5973	4094	4670	5521	3935	4410	4958	3935
	Биллингса	4820	5630	3748	4470	5244	3748	4250	4983	3800
Чукотское море	м. Шмидта	4550	5254	3529	4250	4920	3512	4030	4416	3512
	о. Врангеля	4240	4940	3311	3850	4381	3140	3605	4057	3140
	Ванкарем	4215	4905	3179	3955	4610	3165	3770	4197	3165
	Уэлен	3270	4037	2348	3000	3730	2261	2810	3512	2261
Среднее по морям Западной Арктики, °С		5014	6058	3969	4757	5713	3607	4486	5439	3608
Среднее по морям Восточной Арктики, °С		4628	5376	3673	4321	5043	3600	4107	4648	3607
Изменение по сравнению с XX веком для морей Западной Арктики, °С					-257	-345	-363	-528	-619	-361
Изменение по сравнению с XX веком для морей Восточной Арктики, °С					-307	-334	-73	-521	-729	-66
Изменение по сравнению с XX веком для морей Западной Арктики, %					-5	-6	-9	-11	-10	-9
Изменение по сравнению с XX веком для морей Восточной Арктики, %					-7	-6	-2	-11	-14	-2

Примечание. В табл. 3 и 4 к морям Западной Арктики отнесены Карское море и море Лаптевых, к морям Восточной Арктики – Восточно-Сибирское и Чукотское моря.

В рамках подготовки пособия «Ледовые условия морей азиатской части России» осуществлен расчет интервалов критериев суровости зим по суммам градусодней мороза для ряда ГМС. Определены критерии для мягкой, умеренной и суровой зим. К умеренным отнесены такие зимы, для которых СГДМ попадает в интервал от значения, соответствующего «среднее плюс 20 % амплитуды» до значения «среднее минус 20 % амплитуды». При этом самая холодная и самая теплая зимы исключены из расчета как наименее характерные. Расчет осуществлен по данным о температуре за XX век.

В табл. 3 – критерии мягких (МЗ), умеренных (УЗ) и суровых (СЗ) зим, а также характерные значения СГДМ для морских ГМС Западной и Восточной Арктики.

Анализ табл. 3 показывает, что уменьшение СГДМ за последнее 30-летие на островных ГМС, располагающихся в центральных частях арктических морей (о. Визе, о. Голомянный, о. Котельный, о. Врангеля) составило в среднем 358 °С, а для остальных ГМС – 257 °С. Уменьшение СГДМ за последнее 15-летие для островных ГМС составило в среднем 724 °С, а для остальных ГМС – 463 °С

Сравним интенсивность глобального потепления в холодный период года на морях Европейской территории России (ЕТР) и на арктических морях. Проведенный в [6] анализ полных рядов наблюдений (до ледового сезона 2011/2012 гг.) за СГДМ показал, что за первые годы XXI века в морях ЕТР:

- количество мягких зим выросло в среднем на 25 % и составило 43 %;

- количество суровых зим сократилось на 16 % до средней по всем морям величины – 2 %; критериям суровой зимы соответствовали три зимы: 2000/2001 гг. – для юго-западной части Карского моря, 2010/2011 гг. – для Белого моря, 2002/2003 гг. – для Черного моря;

- наибольшая изменчивость повторяемости мягких зим зафиксирована в Финском заливе, где их количество увеличилось на 38 % [6].

Критерии мягких (МЗ), умеренных (УЗ) и суровых (СЗ) зим, характерные значения СГДМ для морских ГМС российской Арктики, уменьшение СГДМ за последние 30 и 15 лет по сравнению со средними значениями в XX веке (в °С)

ГМС Западной Арктики									
	Амдерма	о. Диксон	Стерлиго-ва	о. Визе	о. Голо-мянный	Челюскин	Хатанга	Тикси	о. Котель-ный
Расчетный период	1940-2000 (61 год)	1922-2000 (79 лет)	1936-2000 (65 лет)	1947-2000 (54 года)	1932-2000 (69 лет)	1934-2000 (67 лет)	1934-000 (67 лет)	1936-2000 (65 лет)	1937-2000 (64 года)
Критерии для МЗ	<2545	<4060	<4880	<4720	<4980	<5090	<5155	<5000	<5280
Критерии для УЗ	2545-3390	4060-4890	4880-5640	4720-5560	4980-5785	5090-5810	5155-5980	5000-5685	5280-5770
Критерии для СЗ	>3390	>4890	>5640	>5560	>5785	>5810	>5980	>5685	>5770
СГДМ самой суровой зимы	4110 1968/69	5803 1968/69	6369 1968/69	6190 1963/64	6540 1968/69	6467 1957/58	6697 1957/58	6205 1957/58	6138 1965/66
СГДМ самой мягкой зимы	1874 2011/12	2976 2011/12	3816 2011/12	2451 2011/12	3742 2011/12	4092 2011/12	4495 1967/68	4400 1942/43	4448 2010/11
Уменьшение СГДМ за последн. 30 лет	215	180	220	470	305	255	240	160	265
Уменьшение СГДМ за последн. 15 лет	380	370	530	990	725	590	355	280	545

Таблица 3 (продолжение)

ГМС Восточной Арктики								
	Чокурдах	Амбарчик	о. Айон	Биллингса	м. Шмидта	о. Врангеля	Банкарем	Уэлен
Расчетный период	1940–2000 (61 год)	1935–2000 (66 лет)	1943–2000 (58 лет)	1936–2000 (65 лет)	1933–2000 (68 лет)	1927–2000 (74 года)	1936–2000 (65 лет)	1932–2000 (69 лет)
Критерии для МЗ	<5590	<4810	<4780	<4490	<4255	<3970	<3895	<2930
Критерии для УЗ	5590–6040	4810–5360	4780–5290	4490–5160	4255–4855	3970–4520	3895–4545	2930–3610
Критерии для СЗ	>6040	>5360	>5290	>5160	>4855	>4520	>4545	>3610
СГДМ самой суровой зимы	6418 1965/66 гг.	5863 1965/66 гг.	5973 1965/66 гг.	5630 1965/66 гг.	5254 1945/46 гг.	4940 1975/76 гг.	4905 1945/46 гг.	4037 1945/46 гг.
СГДМ самой мягкой зимы	4917 2010/11 гг.	4122 2006/07 гг.	3935 2010/11 гг.	3748 1995/96 гг.	3512 2010/11 гг.	3140 2010/11 гг.	3165 2010/11 гг.	2261 2013/14 гг.
Уменьшение СГДМ за последние 30 лет	260	260	370	350	300	390	260	270
Уменьшение СГДМ за последние 15 лет	400	485	630	570	520	635	445	460

Таблица 4

Повторяемость мягких (М), умеренных (У) и суровых (С) зим в различные периоды времени (в %)

Море, район моря	ГМС	Повторяемость зим								
		в XX веке			за последнее 30-летие			за 15 лет XXI века		
		М	У	С	М	У	С	М	У	С
ЮЗ часть Карского моря	Амдерма	17	67	16	33	57	10	47	53	0
	о. Диксон	14	67	19	30	60	10	47	46	7
СВ часть Карского моря	Стерлигова	20	55	25	47	33	20	86	7	7
	о. Визе	20	56	24	50	33	17	86	7	7
	о. Голомянный	20	63	17	47	40	13	86	7	7
	Челюскин	24	58	18	37	50	13	60	40	0
Море Лаптевых	Хатанга	16	68	16	37	56	7	53	40	7
	Тикси	18	61	21	27	63	10	40	53	7
	о. Котельный	23	55	22	50	40	10	80	20	0
Восточно-Сибирское море	Чокурдах	21	63	16	63	30	7	80	20	0
	Амбарчик	17	66	17	57	33	10	80	20	0
	о. Айон	22	57	21	60	30	10	87	13	0
	Биллингса	17	68	15	57	40	3	80	20	0
Чукотское море	м. Шмидта	19	61	20	57	39	4	85	15	0
	о. Врангеля	15	66	19	53	47	0	93	7	0
	Ванкарем	17	61	22	47	43	10	67	33	0
	Уэлен	19	68	13	57	40	3	80	20	0
Среднее по западным морям, °С		19	61	20	40	48	12	65	30	5
Среднее по восточным морям, °С		18	64	18	56	38	6	81	19	0
Изменение по сравнению с XX веком для западных морей					21	-13	-8	46	-31	-15
Изменение по сравнению с XX веком для восточных морей					38	-26	-12	63	-45	-18

Анализ табл. 4, в которой приведено количество мягких, умеренных и суровых зим в арктических морях, показал, что за первые 15 лет XXI века:

- количество мягких зим в морях Западной Арктики выросло в среднем на 46 % и составило в среднем 65 %; в морях Восточной Арктики выросло в среднем на 63 % и составило в среднем 81 %;

- количество суровых зим во всех морях сократилось в среднем на 17 % до средней по всем морям величины 2 %;

- в морях Западной Арктики две зимы оказались соответствующими критериям суровой зимы: 2000/2001 гг. – для юго-западной части Карского моря и Хатангского залива, 2003/2004 гг. – для северо-восточной части Карского моря и района, прилегающего к губе Буор-Хая;

- в морях Восточной Арктики в XXI веке не было ни одной суровой зимы.

Сравнение результатов потепления в европейских и арктических морях показывает, что процесс потепления в арктической зоне идет значительно интенсивнее, чем в европейских морях средней полосы и в южных морях, причем эта интенсивность нарастает с юга на север. Наиболее сильные изменения отмечаются на ГМС удаленных от побережья и располагающихся в центральных частях арктических морей (о. Визе, о. Голомянный, о. Котельный, о. Врангеля). Для этих четырех станций среднее количество мягких зим в XX веке составляло 19 %, а в XXI веке достигло 86 %.

В [6] были приведены линейные тренды изменчивости СГДМ и показана направленность процесса уменьшения суровости зим на всех морях ЕТР. Средние скорости уменьшения СГДМ в XX веке – начале XXI века по 115-летним периодам (оканчивающихся зимой 2014/2015 гг.) ранжируются следующим образом: Финский залив (Санкт-Петербург) – 2,91 °С в год, Азовское море (Ростов-на-Дону) – 2,51 °С в год, Северный Каспий (Астрахань) – 2,04 °С в год, Белое море (Архангельск) – 1,58 °С в год.

К сожалению, ряды сумм градусодней мороза в арктических морях короче и составляют в соответствии с табл. 1 от 69 до 90 лет. В связи с этим были выбраны 70-летние ряды для расчета скорости

уменьшения СГДМ за период с ледового сезона 1945/1946 гг. по сезон 2014/2015 гг. Средние скорости уменьшения СГДМ в течение этого периода для российских морей приведены в табл. 5.

Таблица 5

Средние скорости уменьшения СГДМ за последние 70 и 30 лет (в °С в год)

Море, район моря	ГМС	Скорость уменьшения СГДМ	
		за 70 лет	за 30 лет
Черное	Одесса	1,3	1,1
Азовское	Ростов-на-Дону	3,5	3,3
Каспийское	Астрахань	3,6	2,1
Финский залив	Санкт-Петербург	4,9	3,3
Белое	Архангельск	2,7	11,7
Баренцево	Баренцбург	9,3	38,7
	Нарьян-Мар	4,5	15,0
ЮЗ часть Карского моря	Амдерма	6,0	21,9
	о. Диксон	7,6	29,8
СВ часть Карского моря	Стерлигова	7,6	42,3
	о. Визе	13,2	70,4
	о. Голомянный	11,2	58,8
	Челюскин	9,6	47,5
Лаптевых	Хатанга	8,2	19,9
	Тикси	5,0	12,8
	о. Котельный	9,0	35,1
Восточно-Сибирское	Чокурдах	8,0	19,4
	Амбарчик	8,3	22,4
	о. Айон	10,3	27,9
	Биллингса	10,5	27,9
Чукотское	м. Шмидта	10,0	24,7
	о. Врангеля	12,1	30,0
	Ванкарем	8,6	23,3
	Уэлен	8,0	20,1
Берингово	Эгвекиног	9,5	15,6
	Анадырь	4,2	11,9
	П-Камчатский	3,4	2,8
Охотское	Магадан	7,5	9,4
	Аян	6,2	5,2
Татарский пр.	Александровск	5,0	7,6
	Сов. Гавань	6,6	4,1
Зал. Петра	Владивосток	3,5	2,2

Анализ табл. 5 позволяет выявить особенности изменчивости температурного режима в зимний период на морях России:

– средняя скорость уменьшения СГДМ для последних 30 лет составила в арктических морях – 32 °С в год, в дальневосточных морях – 7 °С в год, в российских европейских неарктических морях – 11 °С в год, т. е. уменьшение СГДМ в Арктике шло в 4,5 раза быстрее, чем в дальневосточных морях, и в 3 раза быстрее, чем в европейских морях;

– скорости уменьшения СГДМ в течение последних 70 и 30 лет находились в прямой зависимости от широты (чем больше широта, тем выше скорость), коэффициенты корреляции между значениями скорости уменьшения СГДМ и значениями широты составили 0,75 для 70-летних рядов и 0,85 для 30-летних рядов;

– среднее изменение скорости уменьшения СГДМ с широтой составляли для последних 30 лет – 1,35 °С в год на один градус широты.

Данная закономерность количественно обосновывает тот факт, что именно в центральной Арктике наиболее значительно проявляются последствия потепления. Иллюстрацией к этому может служить рис. 1, на котором показаны границы наименьшего распространения льда за два периода: с 1940 по 1975 г – результат обобщения данных ледовых авиаразведок [2, 3], с 1978 по 2015 г. – результат обобщения данных ИСЗ.

Чтобы выявить конкретные годы, которые обеспечили высокое положение границы льда за второй период, необходимо проанализировать данные о ледовитости морей, используя ряды наблюдений, показанные в табл. 1.

В табл. 6 – данные о ледовитости морей в июне-сентябре. Следует отметить, что положение северных границ районов измерения ледовитости моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, принятое в ААНИИ (по причине традиционно проводимых многолетних исследований в пределах этих границ), отличается от географического положения северных границ морей: измерения не захватывают примерно 20 % площади на северных окраинах морей [7].

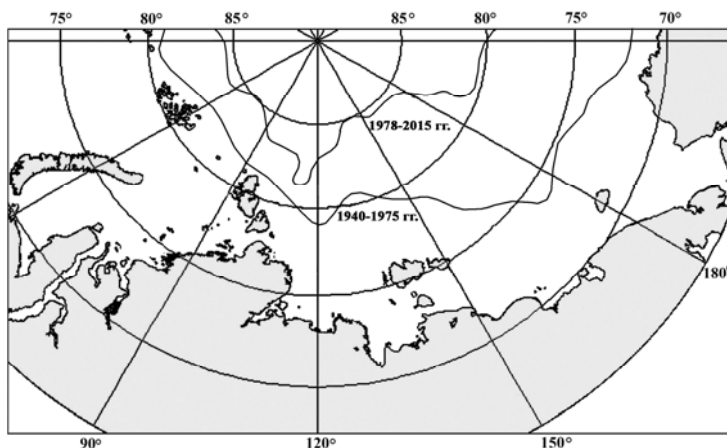


Рис. 1. Границы наименьшего распространения льда в российских арктических моря. в середине сентября за периоды 1940-1975 гг. и 1978-2015 гг.

Таблица 6

Ледовитость арктических морей в июне–сентябре (в %)

Месяц	VI			VII			VIII			IX		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Карское море (XX век – с 1940 по 2000 г. – 61 год)												
Средняя	94	92	89	85	78	70	57	47	38	32	29	28
Макс.	100	99	98	99	98	98	96	92	85	74	65	67
Год	1981	1999	1981	1966	1999	1966	1966	1966	1966	1966	1958	1969
Мин.	78	77	69	55	38	30	11	3	1	2	4	4
Год	1995	1995	1975	1945	1945	1945	1945	1945	1945	1945	1945	1945
Карское море (XXI век – с 2001 по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	90	84	77	69	58	41	31	22	16	14	12	12
Макс.	99	97	98	90	94	78	63	58	53	50	45	42
Год	2014	2014	2014	2003	2003	2003	2002	2003	2003	2003	2003	2003
Мин.	75	49	35	23	19	9	8	7	1	1	0	0
Год	2015	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2012	2005	2005
Море Лаптевых (XX век – с 1942 г. по 2000 г. – 59 лет)												
Средняя	92	91	89	85	81	72	61	49	40	35	34	33
Макс.	100	100	98	100	97	98	92	90	84	83	82	84
Год	1982	1984	1986,	1963	1972	1984	1962	1962	1963	1962	1962	1962
		1999	1996									
Мин.	81	77	76	61	53	33	17	4	0	1	1	0
Год	1981	1988	1973	1973	1973	1945	1995	1995	1995	1995	1973	1959
											1995	1995

Месяц	VI			VII			VIII			IX		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Море Лаптевых (XXI век – с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	88	85	80	77	72	57	39	27	21	17	15	15
Макс.	99	98	96	97	95	96	86	73	56	59	54	58
Год	2004	2001	2001	2008	2002	2004	2004	2004	2001	2004	2001	2001
Мин.	69	71	65	46	32	18	5	0	0	0	0	0
Год	2014	2014	2014	2014	2014	2014	2012	2011	2011	2011-2013	2011-2014	2011-2014
Восточно-Сибирское море (XX век – с 1942 г. по 2000 г. – 59 лет)												
Средняя	98	97	96	95	93	91	85	79	72	67	63	62
Макс.	100	100	100	100	100	99	99	98	97	95	94	94
Год	13 лет	9 лет	4 года	1979, 1998	1998	4 года	1949	1965	1979	1979	1979 1985	1985
Мин.	74	74	75	71	63	46	16	12	3	3	6	12
Год	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990
Восточно-Сибирское море (XXI век – с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	96	96	95	93	90	81	60	49	39	29	22	19
Макс.	100	100	100	98	99	97	93	86	83	72	71	61
Год	2012	2015	2004	2004 2008	2004	2004	2001	2001	2001	2001	2001	2001
Мин.	86	87	90	84	65	56	14	6	0	0	0	0
Год	2014	2014	2009	2007 2009	2007	2007	2007	2007	2007	2007	2007	2007
Юго-западная часть Чукотского моря (XX век – с 1940 г. по 2000 г. – 61 год)												
Средняя	92	83	74	63	53	42	34	29	24	20	18	16
Макс.	100	100	99	98	89	85	74	67	60	60	59	69
Год	10 лет,	1985, 1991	1955	1985	1955, 1956	1955	1942	1941	1994	1994	1983	1947
Мин.	70	39	36	22	16	6	1	0	0	0	0	0
Год	1986	1967	1967	1967	1967	1997	1997	1968, 1997	3 года	12 лет	15 лет	21 год
Юго-западная часть Чукотского моря (XXI век – с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	76	63	52	39	27	23	18	12	6	3	3	3
Макс.	95	83	77	59	56	51	49	52	33	17	32	34
Год	2010	2010	2012	2012	2004	2004	2012	2012	2012	2001	2001	2001
Мин.	44	39	32	18	4	1	0	0	0	0	0	0
Год	2009	2007	2007	2009	2015	2009	4 года	5 лет	6 лет	11 лет	13 лет	13 лет

Примечание: пропуски в рядах данных и информацию об уменьшении длины рядов в июне см. в табл. 1

Таким образом, все годы, которые обеспечили высокое положение границы наименьшего распространения льда, относятся к началу XXI века. В этот период происходило быстрое сокращение площади, занятой льдом в конце летнего периода во всей Арктике. Минимум этого уменьшения был зафиксирован в 2012 г., когда площадь арктических льдов в сентябре составила 3,37 млн кв. км при среднем значении более 6 млн кв. км. При сохранении современных темпов потепления [1] в период 2029–2037 гг. возможно исчезновение льда в Арктике в конце летнего сезона. В этом же источнике показана связь между летней температурой воздуха в Арктике и площадью, занятой льдами в сентябре. Коэффициент корреляции по данным за 1979–2014 гг. оказался равным 0,93. Этот факт объясняет, почему в арктических морях ледовые условия в сентябре после более суровой зимы бывают легче, чем после более мягкой.

Из анализа табл. 6 следует, что произошло значительное уменьшение средней ледовитости арктических морей в XXI веке по сравнению со второй половиной XX века в июне – сентябре, которое составило (на середину месяца):

- в Карском море: 8 % в июне, 20 % в июле, 25 % в августе, 17 % в сентябре; при этом наибольший вклад в это уменьшение в июне и июле вносит юго-западная часть моря, а в августе и сентябре – северо-восточная часть;

- в море Лаптевых: 6 % в июне, 9 % в июле, 22 % в августе, 19 % в сентябре;

- в Восточно-Сибирском море: 1–3 % в июне-июле, 30 % в августе, 41 % в сентябре;

- в Чукотском море: 20 % в июне, 26 % в июле, 17 % в августе, 15 % в сентябре.

Таким образом, наиболее существенные изменения произошли в июне в Чукотском море, в июле – в Карском и Чукотском морях, в августе и сентябре – в Восточно-Сибирском море. В целом наименьшие изменения произошли в море Лаптевых.

В период таяния льда в арктических морях формируются ледяные массивы, которые представляют собой скопления льдов большой сплоченности (7–10 баллов), повышенной толщины и

торосистости. На рис. 3 показано положение ледяных массивов в российских арктических морях. Климатические изменения коснулись состояния всех этих массивов.

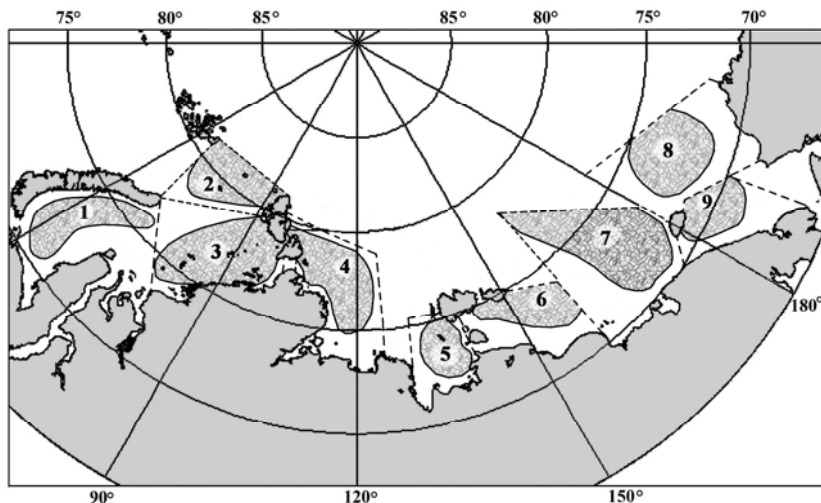


Рис. 3. Ледяные массивы российских арктических морей:

1 – Новоземельский, 2 – Северный Карский, 3 – Североземельский, 4 – Таймырский, 5 – Янский, 6 – Новосибирский, 7 – Айонский, 8 – Северный Чукотский, 9 – Врангелевский; пунктирные линии – границы районов, выделенных для расчета площади массивов.

В табл. 7 – информация о площади ледяных массивов за вторую половину XX века и за первые 15 лет XXI века.

Анализ табл. 7 показывает, что за первые 15 лет XXI века по сравнению с XX веком уменьшение средних значений площадей массивов (на середину месяца) составило:

- для Новоземельского: в июне-июле – 16–18 %, августе – 8 %, сентябре – 1 %;

- для Североземельского: в июне – 13 %, июле-августе – 16–19 %, сентябре – 8 %;

- для Северного Карского: в июне – 11 %, июле – 24 %, августе – 32 %, сентябре – 22 %;

- для Таймырского: в июне–сентябре – 6–9 %;
- для Янского: в июне–сентябре – 1–10 %;
- для Новосибирского: в июне-июле уменьшения нет, в августе–сентябре – 14–24 %;
- для Айонского: в июне-июле – 2–7 %, в августе–сентябре – 27–38 %;
- для Врангелевского: в июне-июле – 19–20 %, в августе–сентябре – 7 %;
- для Северного Чукотского: в июне – 9 %, в июле–сентябре – 19–28 %.

Осредненное за 4 месяца уменьшение ледовитости массивов составляет в Карском море 11–22 %, в море Лаптевых 6–8 %, в Восточно-Сибирском и Чукотском морях – 10–19 %.

Таблица 7

Площадь ледяных массивов во второй половине XX века и в первые 15 лет XXI века (в %)

Месяц	VI			VII			VIII			IX		
Декада	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Новоземельский массив (с 1938 г. по 2000 г. – 63 года)												
Средняя	85	80	73	60	45	29	15	7	3	2	1	1
Макс.	99	98	99	98	86	85	60	44	32	19	15	11
Мин.	51	42	37	13	0	0	0	0	0	0	0	0
СКО	11	12	15	21	22	19	15	10	6	4	2	2
Новоземельский массив (с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	74	64	55	41	27	11	5	1	0	0	0	0
Макс.	92	85	81	79	82	41	18	6	1	0	0	0
Мин.	38	14	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0
СКО	14	20	23	24	22	12	6	2	0	0	0	0
Североземельский массив (с 1938 г. по 2000 г. – 63 года)												
Средняя	88	85	81	74	67	57	47	34	26	19	16	15
Макс.	100	100	100	100	99	96	96	92	80	68	61	58
Мин.	62	49	33	33	24	19	2	0	0	0	0	0
СКО	12	16	18	19	23	23	25	24	22	19	17	16

Месяц	VI			VII			VIII			IX		
Декада	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Североземельский массив (с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	80	72	67	56	48	35	27	18	13	9	8	6
Макс.	97	98	95	94	98	94	83	90	86	55	52	35
Мин.	52	50	44	26	23	7	4	3	0	0	0	0
СКО	12	15	17	18	21	23	20	21	20	13	13	9
Северный Карский массив (с 1950 г. по 2000 г. – 51 год)												
Средняя	96	94	91	87	82	76	64	58	49	44	40	38
Макс.	100	100	100	100	100	99	100	99	93	98	90	88
Мин.	84	72	62	47	44	33	13	4	0	0	2	1
СКО	3	6	8	11	13	17	22	24	25	26	25	23
Северный Карский массив (с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	88	83	77	67	58	45	34	26	21	18	18	17
Макс.	98	97	99	93	96	94	89	89	89	91	90	76
Мин.	71	52	48	36	22	11	5	1	0	1	0	0
СКО	7	12	13	18	20	24	22	22	22	23	24	23
Таймырский массив (с 1938 г. по 2000 г. – 63 года)												
Средняя	91	87	84	80	72	60	49	41	35	29	27	24
Макс.	100	100	100	99	99	93	93	94	85	77	80	72
Мин.	45	51	51	36	23	10	5	0	0	0	0	0
СКО	11	11	13	16	19	20	22	23	22	22	20	19
Таймырский массив (с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	85	81	75	71	63	51	37	32	23	19	18	17
Макс.	99	98	98	99	96	95	86	83	75	78	80	73
Мин.	63	56	39	30	25	4	1	0	0	0	0	0
СКО	12	13	16	20	22	28	27	25	24	25	23	23
Янский массив (с 1938 г. по 2000 г. – 63 года)												
Средняя	97	97	95	92	83	58	30	13	6	3	2	2
Макс.	100	100	100	100	100	100	98	64	52	38	20	29
Мин.	83	91	88	75	64	10	0	0	0	0	0	0
СКО	4	2	3	6	10	22	25	19	12	8	4	5

Месяц	VI			VII			VIII			IX		
Декада	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Янский массив (с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	96	96	93	88	73	37	17	3	1	0	0	0
Макс.	100	99	99	97	98	70	57	32	6	0	0	0
Мин.	91	90	84	70	40	0	0	0	0	0	0	0
СКО	2	3	4	8	19	27	20	8	2	0	0	0
Новосибирский массив (с 1940 г. по 2000 г. – 61 год)												
Средняя	98	96	94	94	83	66	47	32	23	16	14	11
Макс.	100	100	100	100	100	98	98	90	74	71	65	72
Мин.	49	48	38	25	16	0	0	0	0	0	0	0
СКО	8	9	12	12	15	23	28	25	20	18	18	18
Новосибирский массив (с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	99	98	98	94	84	56	23	8	1	1	0	0
Макс.	100	100	100	100	99	77	60	23	8	15	0	1
Мин.	93	93	91	84	62	7	0	0	0	0	0	0
СКО	2	2	3	4	10	19	20	8	2	4	0	0
Айонский массив (с 1946 г. по 2000 г. – 55 лет)												
Средняя	98	97	95	92	87	81	74	67	60	56	52	53
Макс.	100	100	100	100	98	97	94	91	94	91	85	89
Мин.	84	78	72	69	55	43	1	0	0	0	2	2
СКО	3	6	7	7	10	12	16	18	20	21	22	22
Айонский массив (с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	97	95	93	87	80	68	54	40	24	18	14	12
Макс.	100	100	99	98	97	92	86	80	78	65	56	62
Мин.	90	82	71	58	48	21	6	0	0	0	0	0
СКО	3	5	7	10	14	20	24	23	19	18	17	17
Врангелевский массив (с 1939 г. по 2000 г. – 62 года)												
Средняя	86	76	64	49	36	24	16	11	8	6	7	7
Макс.	100	99	100	95	86	71	47	44	39	45	45	42
Мин.	40	21	20	14	7	4	0	0	0	0	0	0
СКО	14	17	19	20	17	15	11	10	10	9	10	11
Врангелевский массив (с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	68	54	41	28	17	14	8	4	1	1	0	1
Макс.	93	82	68	50	33	30	24	32	13	7	4	8
Мин.	37	30	21	9	3	1	0	0	0	0	0	0
СКО	16	16	13	13	11	11	8	8	3	2	1	2

Месяц	VI			VII			VIII			IX		
Декада	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Северный Чукотский массив (с 1965 г. по 2000 г. – 36 лет)												
Средняя	98	95	89	82	72	56	38	28	23	19	20	17
Макс.	100	100	100	99	97	95	80	85	63	76	80	84
Мин.	80	74	60	50	36	8	0	0	0	0	0	0
СКО	4	6	11	14	17	23	21	22	19	19	22	22
Северный Чукотский массив (с 2001 г. по 2015 г. – 15 лет)												
Средняя	92	86	78	64	44	26	15	9	5	2	1	0
Макс.	100	100	96	84	74	60	45	48	43	16	8	1
Мин.	78	67	55	43	4	0	0	0	0	0	0	0
СКО	6	9	12	13	21	21	15	13	11	4	2	0

Примечание: пропуски в рядах данных и информацию об уменьшении длины рядов в июне см. в табл. 1; СКО – среднеквадратическое отклонение.

Уменьшение суровости арктических зим привело к сдвигам в наступлении ледовых фаз на арктических морях. В табл. 8 приведены количественные данные о сдвиге в последние годы дат первого появления льда (ПП) на морях в сторону более поздних сроков, дат очищения моря ото льда (ОО) в сторону более ранних сроков, а также уменьшению продолжительности ледового периода (ЛП) по сравнению со средними многолетними значениями. Для расчетов были использованы ряды наблюдений за ледовыми фазами (ЛФ) на морских ГМС. Длина рядов указана в табл. 1.

Исследование изменчивости наступления ледовых фаз и повторяемости очищения моря ото льда по данным ГМС показало, что за первые 15 лет XXI века по сравнению с полным периодом наблюдений:

- в Карском море продолжительность ледового периода сократилась на 1–5,5 недели, наибольшее уменьшение ледового периода (на месяц и более) зафиксировано на участке трассы СМП от о. Диксон до западных подходов к проливу Вилькицкого, а также у открытой части моря (о. Визе);

- у западного побережья архипелага Северная Земля (о. Голомянный), на восточных подходах к проливу Вилькицкого и в самом проливе (м. Челюскин) наблюдаются наименьшие изменения: здесь продолжительность ледового периода сократилась

на 7–12 дней и наблюдается наименьшая для Карского моря повторяемость очищения моря ото льда в летний период (50–70 %);

Таблица 8

Сдвиг средних дат наступления ледовых фаз по данным гидрометеорологических станций

Море, район моря	Сдвиг, дни					
	за последнее 30-летие			за 15 лет XXI века		
	даты ПП в сторону поздних сроков	даты ОО в сторону ранних сроков	ЛП в сторону уменьше- ния	даты ПП в сторону поздних сроков	даты ОО в сторону ранних сроков	ЛП в сторону уменьше- ния
Карское, ЮЗ часть	3-7	5-15	8-17	5-15	8-15	14-28
Карское, СВ часть	2-7	1-12	4-15	6-18	3-13	7-38
Лаптевых	1-5	1-9	3-14	3-12	3-15	6-39
Восточно- Сибирское	1-8	4-15	8-26	5-13	6-16	24-35
Чукотское	4-7	1-2	8-26	9-15	2-3	11-37

– в море Лаптевых продолжительность ледового периода сократилась на промежуток времени от 6 дней (в районе Тикси) до 39 дней (в районе Котельного);

– повторяемость очищения моря ото льда по данным всех ГМС моря Лаптевых, приведенных в табл. 1, составила 100 % (при этом для полного периода наблюдений повторяемость очищения моря ото льда на ГМС Кигилях – 86 %, Санникова – 74 %, о. Котельный – 73 %);

– в Восточно-Сибирском море продолжительность ледового периода сократилась на 3–5 недель, наибольшее уменьшение ледового периода зафиксировано на ГМС Рау-Чуа, о. Айон и Валькаркай – на 32–35 дней;

– повторяемость очищения ото льда прибрежных районов Восточно-Сибирского моря по данным всех станций, приведенных в табл. 1, составила 100 % (при этом для полного периода наблюдений повторяемость очищения моря ото льда на ГМС Амбарчик – 96 %, Рау-Чуа – 74 %, Айон – 72 %, Певек – 87 %, Валькаркай – 61 %, Биллингса – 58 %);

– в Чукотском море продолжительность ледового периода сократилась на 1,5–5,5 недель, наибольшее его уменьшение зафиксировано на ГМС Ванкарем – на 5 недель;

– не отмечено случаев сохранения льда в течение всего тепло-го периода в районах прибрежных морских ГМС Уэлен и Ванкарем.

В табл. 9 приведена информация о средней и максимальной толщине припайного льда на момент наибольшего развития ледяного покрова в мае – начале июня для всего периода наблюдений и для первых 15 лет XXI века на отдельных ГМС.

Таблица 9

Средняя ($H_{\text{ср}}$) и максимальная ($H_{\text{макс}}$) толщина припайного льда на момент наибольшего развития ледяного покрова в мае – начале июня для всего периода наблюдений и для первых 15 лет XXI века (в см)

Море, район моря	ГМС	$H_{\text{ср}}$ за полный период набл.	$H_{\text{макс}}$ за полный период набл.	$H_{\text{ср}}$ за 15 лет XXI века	$H_{\text{макс}}$ за 15 лет XXI века	Уменьшение $H_{\text{ср}}$	Уменьшение $H_{\text{макс}}$
Карское, ЮЗ часть	Амдерма	116	178	111	140	5	38
	Марре-Сале	139	196	135	167	4	29
	о. Белый	146	198	141	154	5	44
	Диксон	157	213	142	171	15	42
	Соп. Карга	168	236	146	160	22	76
Карское, СВ часть	о. Диксон	157	213	142	171	15	42
	о. Известий	174	216	158	187	16	29
	м. Стерлигова	190	244	177	197	13	47
	о. Голомяный	187	228	172	208	15	20
	о. Визе	172	227	165	204	7	23
	м. Челюскин	187	239	179	205	8	34
Лаптевых	Тикси	220	248	219	240	1	8
	Кигилях	210	240	210	235	0	5
	Санникова	206	239	202	223	4	16
	о. Котельный	210	256	210	236	0	20
Восточно-Сибирское	Амбарчик	210	241	204	223	6	18
	Рау-Чуа	185	246	185	214	0	32
	Айон	179	217	175	189	4	28
	Певек	152	186	136	177	16	9
Среднее		177	224	169	195	8	29

В табл. 10 приведены обобщенные данные об изменении толщин припайного льда в арктических морях, представляющие собой средние значения для каждого моря по группам станций, имеющим продолжительные ряды наблюдений за толщиной льда (ТЛ). Информация о длине рядов наблюдений приведена в табл. 1.

Таблица 10

Изменение средней и максимальной толщины льда на момент наибольшего развития ледяного покрова

Море, район моря	Уменьшение толщины льда на момент наибольшего развития ледяного покрова, см			
	за последнее 30-летие		за 15 лет XXI века	
	средняя	максимальная	средняя	максимальная
Карское, ЮЗ часть	4	25	10	46
Карское, СВ часть	6	14	12	33
Лаптевых	0	5	1	12
Восточно-Сибирское	2	10	7	22
Среднее по всем арктическим ГМС	3	14	8	29

Анализ табл. 9 и 10 показывает, что за первые 15 лет XXI века средние толщины припайного льда на момент максимального развития ледяного покрова в Карском море уменьшились по сравнению со средними за полные ряды наблюдений на 10–12 см (максимальные – на 33–46 см), в море Лаптевых – на 1 см (максимальные – на 12 см), в Восточно-Сибирском море – на 7 см (максимальные – на 22 см). К сожалению, из-за нерегулярности поступления данных от ГМС Чукотского моря качественной оценки изменения толщины льда за первые 15 лет XXI века сделать не удалось.

Для всех ГМС среднее уменьшение значений $H_{\text{ср}}$ составило 8 см, $H_{\text{макс}}$ – 29 см.

Выводы

Основные изменения в ледовом режиме арктических морей, произошедшие за 15 лет XXI вв. следующие:

– процесс потепления в этот период шел примерно с одинаковой интенсивностью на западных и восточных арктических морях,

средняя СГДМ уменьшилась на 521–528 °С, уменьшение СГДМ составило 11 % по отношению к средним значениям в XX веке;

– ни по одному морю не был перекрыт абсолютный максимум XX века для сумм градусодней мороза;

– на этот период пришлось 82 % всех абсолютных минимумов СГДМ;

– уменьшение СГДМ на островных ГМС составило в среднем 724 °С, а для остальных ГМС – 463 °С, т. е. уменьшение СГДМ на островных станциях оказалось в 1,6 раза больше уменьшения на станциях, приближенных к материке;

– уменьшение СГДМ в Арктике шло в 4,5 раза быстрее, чем в дальневосточных морях, и в 3 раза быстрее, чем в европейских морях России;

– интенсивность потепления как для арктических, так и для неарктических морей имело прямую линейную зависимость от географической широты, нарастая с юга на север на 1,35 °С в год при изменении географической широты на 1°, эта закономерность количественно обосновывает тот факт, что именно в центральной Арктике наиболее значительно проявились последствия потепления;

– в то время как количество мягких зим в морях ЕТР выросло в среднем на 20–25 % и составило 43 %, в морях Западной Арктики оно выросло на 46 % и составило 65 %, в морях Восточной Арктики выросло на 63 % и составило 81 %, а на островных ГМС выросло на 67 % и составило 86 %;

– в морях Западной Арктики две зимы оказались соответствующими критериям суровой зимы, в морях Восточной Арктики не было ни одной суровой зимы;

– произошло значительное уменьшение средней ледовитости арктических морей в июне–сентябре: для Карского моря в среднем на 18 %, моря Лаптевых – 14 %, Восточно-Сибирского моря – 19 %, для юго-западной части Чукотского моря – на 20 %;

– осредненное за июнь–сентябрь уменьшение площади ледяных массивов составило в Карском море 11–22 %, в море Лаптевых 6–8 %, в Восточно-Сибирском и Чукотском морях – 10–19 %, самые существенные изменения коснулись северных массивов –

Северного Карского и Северного Чукотского, а также Айонского массива, уменьшение ледовитости которых составило 18–22 %, при этом наибольшее сокращение Северного Чукотского массива пришлось на июль (28 %), Северного Карского массива – на август (32 %), Айонского массива – на сентябрь (38 %);

– во всех арктических морях для ледовых фаз имели место сдвиги дат в сторону облегчения ледовых условий: по данным ГМС даты первого появления льда сдвинулись в сторону более поздних сроков на 3–18 дней, даты очищения моря ото льда – на 3–16 дней, продолжительность ледового периода уменьшилась на 1–5,5 недели;

– средние толщины припайного льда на момент максимального развития ледяного покрова в Карском море уменьшились по сравнению со средними за полные ряды наблюдений на 10–12 см (максимальные – на 33–46 см), в море Лаптевых – на 1 см (максимальные – на 12 см), в Восточно-Сибирском море – на 7 см (максимальные – на 22 см);

– по суммарному изменению ледовых характеристик наименее подверглось влиянию процесса потепления море Лаптевых.

Список использованных источников

1. *Алексеев Г.В.* Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология.* – 2015. – № 1. – С. 11–26.
2. *Атлас Арктики.* – М.: ГУ геодезии и картографии при СМ СССР, 1984. – 203 с.
3. *Атлас океанов. Северный Ледовитый океан* – М.: ГУ геодезии и картографии при СМ СССР, 1980. – 184 с.
4. Данные официального сайта ААНИИ. – <http://www.aari.ru>
5. Данные официального сайта проекта ВМО "Глобальный банк цифровых данных по морскому льду". – <http://wdc.aari.ru>
6. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей европейской части России. – М.: ИГ-СОЦИН, 2014. – 605 с.
7. *Наблюдения за ледовой обстановкой. Учебное пособие / Под ред. Е.У. Миронова.* – СПб: ААНИИ, 2009. – 359 с.

Поступила в редакцию 09.08.2016 г.