

КОГДА НАСТУПИТ БЕЗЛЕДНЫЙ РЕЖИМ РЕГИОНОВ АРКТИКИ?

В.Н. Малинин¹, П.А. Вайновский²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru

² ООО «Прогноз»

Рассмотрены особенности межгодовой вариабельности и возможных изменений в текущем столетии максимальной (март) и минимальной (сентябрь) площади распространения морского льда (ПРМЛ) в различных регионах Арктики и Северного полушария в целом за период 1979—2017 гг. по спутниковым данным. Впервые выполнен сравнительный анализ трендов на основе введения безразмерного индекса тренда, который позволяет сравнивать ПРМЛ, значительно различающиеся по абсолютной величине не только для различных регионов, но даже в сезонном ходе для одного и того же региона. Представлены оценки выхода на безледный режим в сентябре разных регионов на основе экстраполяции линейных и нелинейных трендов за период 1979—2017 гг. Для Северного полушария выход на безледный режим ожидается в 2074 г., для Арктического бассейна — в 2076 г.

Ключевые слова: Арктика, площадь морского льда, индекс тренда, безледный режим Арктики, температура воздуха.

WHEN WILL ICE-FREE REGIME OF DIFFERENT ARCTIC REGIONS COME ON?

V.N. Malinin¹, P.A. Vainovsky²

¹ Russian State Hydrometeorological University

² LLC “Prognoz”

The article describes the features of interannual variability and possible changes of the maximum (in March) and the minimum (in September) sea ice extent in different Arctic regions and the regions in the northern hemisphere in the current century according to satellite data for 1979—2017 period. For the first time, a comparative analysis of trends has been carried out based on inclusion of dimensionless trend index. It allows comparing sea ice extents which significantly differ in absolute value not only for different regions, but even in the seasonal course for the same region. Estimates of the time of the beginning of the ice-free period in September are presented based on the extrapolation of linear and non-linear trends for 1979—2017. In general, the ice-free period is expected in 2074 in the northern hemisphere, in the Arctic basin - in 2076. This can occur when the global air temperature increases by 1.85 °C compared with 1979.

Keywords: Arctic, sea ice extent, trend index, ice-free Arctic regime, air temperature

Введение

Известно, что климат Арктики теплеет гораздо быстрее, чем климат на планете в целом. Средняя годовая температура в Арктике с 1900 г. повысилась примерно на 2,5 °C, в то время как в целом на земном шаре — примерно на 1 °C, причем в последние 30 лет отмечается ускорение повышения температуры в Арктике по сравнению с глобальной температурой. Такое явление, получившее название полярного усиления, формируется за счет положительных обратных связей между процессами, обеспечивающими повышение приземной температуры воздуха

в Арктике [2]. В результате площадь морского льда в Арктике стремительно уменьшается. Возможно, площадь современного ледяного покрова является минимальной за последние примерно 1500 лет [15]. Арктика является богатейшей кладовой природных ресурсов, и для их освоения необходима разработка долговременных (на длительную перспективу) прогнозов климатических характеристик. Таким образом, вопрос о том, когда Арктика полностью очистится от морского льда, становится крайне актуальным. Очевидно, это произойдет, прежде всего, в сентябре, когда площадь морского льда в годовом ходе достигает наименьших размеров.

Построение детерминированных прогнозов на длительную перспективу представляется очень сложным делом из-за недостаточности наших знаний об изменчивости природных процессов. Обычно для этого используются климатические сценарии МГЭИК, на основе которых рассчитываются оценки изменений глобального климата до 2100 г. с помощью комплекса (ансамбля) моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Наиболее широкое распространение такие модели получили в рамках проектов СМIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3) и СМIP5, результаты которых использовались соответственно в Четвертом [14] и Пятом [13] оценочных докладах Межправительственной группы экспертов по изучению климата (МГЭИК). При этом прогностические результаты, рассчитанные по отдельным моделям, характеризуются значительными расхождениями [8, 18].

Неопределенность оценок климатических прогнозов весьма значительна. По глобальной температуре воздуха на 2100 г. она составляет 4,5 °С, но еще больше неопределенность прогностических оценок климатических параметров для Арктики. Например, разброс прогнозных оценок года, когда в летний период может исчезнуть морской лед в Арктике, составляет более 70 лет (ближайший 2030 г.). Из-за значительных расхождений в получаемых результатах обычно принято рассчитывать средние значения параметров по всему комплексу климатических моделей, мерой неопределенности которых служат среднеквадратические ошибки на каждом шаге, или выбирать «лучший» сценарий и «лучшую» модель.

В работе [17] представлены результаты прогноза сентябрьской ледовитости Арктики по комплексу из 13 климатических (IPCC AR4) моделей в рамках проекта СМIP3 на 2100 г., которые свидетельствуют об огромном разбросе как диагностических, так и прогностических оценок ледовитости. Особенно заметным неудовлетворительное описание изменений площади морских льдов (ПМЛ) становится после 2000 г. Темпы уменьшения площади морских льдов существенно занижаются по сравнению с данными наблюдений. В результате даже в 2100 г. климатические модели не выходят на безледный режим в летний период.

В Пятом отчетном докладе МГЭИК [13] приводятся результаты моделирования сентябрьской ледовитости с использованием в рамках СМIP5 более 40 моделей для четырех климатических сценариев, которые также свидетельствуют об огромном разбросе прогностических оценок площади морского льда на 2100 г. Если по «агрессивному» сценарию RCP8.5 в 2100 г. возможен выход на безледный режим, то по наиболее мягкому сценарию RCP2.6, близкому к современному климату, после 2040 г. происходит стабилизация площади морского льда на уровне около 4 млн км².

Полученные прогностические оценки площади морского льда в дальнейшем неоднократно уточнялись. В работе [8] приводится сравнение результатов моделирования площади морских льдов в рамках проектов СМIP3 и СМIP5 в XX и XXI веках для всей Арктики, Центральной Арктики и Баренцева моря. Модели ансамбля пятого поколения СМIP5 «агрессивного» сценария RCP8.5 гораздо лучше по сравнению с моделями третьего поколения СМIP3 воспроизводят средние значения и тренд наблюдаемых значений площади морского льда в Арктике. К концу XXI века, согласно СМIP3, площадь морского льда может составить 2 млн км², в то время как аналогичная оценка по ансамблю СМIP5 выходит на нуль, т. е. на безледный режим. Однако неопределенность средней оценки площади морских льдов, характеризуемой значением $\pm\sigma$, достигает для СМIP3 ± 4 млн км² и для СМIP5 ± 2 млн км². При этом 90 %-ный доверительный интервал для среднего значения ПМЛ по ансамблю СМIP5, определяемый по среднеквадратическому отклонению, составляет ± 75 лет. Такой разброс сводит на нет результаты климатических прогнозов.

Очевидно, в дополнение к климатическим моделям необходима разработка альтернативных способов долговременного прогноза ледовитости, в качестве которых могут быть использованы статистические методы. Например, если линейные (нелинейные) тренды описывают значительную часть дисперсии исходных рядов, то в предположении стационарности (неизменности) климатических условий, т. е. при сохранении их в будущем, нетрудно получить прогнозные оценки климатической характеристики практически на любой заданный год.

Цель данной работы состоит в экспертном прогнозе выхода на безледный режим минимальной (сентябрьской) ледовитости разных регионов Арктики и Северного полушария в целом на основе простого статистического метода трендов.

Материалы и методы

В настоящее время наиболее точные данные о характеристиках морского льда можно получать с помощью спутниковых измерений радиометром SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) в микроволновом диапазоне, который фиксирует данные о морской поверхности при наличии облачности и любой освещенности, в том числе в течение полярной ночи. Основными параметрами, получаемыми со спутников, являются площадь морского льда (ПМЛ) и площадь распространения (протяженности) морского льда (ПРМЛ). ПМЛ представляет собой интегральную площадь океана, покрытую морскими льдами, а ПРМЛ — это площадь внутри границы 15%-ной сплоченности (концентрации) морских льдов [8]. Величину ПРМЛ, отнесенную к общей рассматриваемой площади (моря, региона, океана) и выраженную в процентах, называют ледовитостью.

Суточные и среднемесячные значения ПМЛ (Sea Ice Area) и ПРМЛ (Sea Ice Extent) находятся в свободном доступе на сайте NASA <https://neptune.gsfc.nasa.gov/csb/index.php?section=59> для девяти различных районов Арктики и всего Северного полушария с октября 1978 г. по настоящее время. В настоящей работе использовались среднемесячные данные ПРМЛ за период 1979—2017 гг. Способы и

алгоритмы обработки спутниковых данных представлены в работах [11, 12]. С учетом общедоступности непрерывно пополняемых спутниковых данных это делает их важнейшим источником фактической информации о современных тенденциях в состоянии ледяного покрова [2, 10, 16]. При этом оценки изменчивости и статистических трендов параметров ледяного покрова являются самыми точными и достоверными по сравнению с другими климатическими характеристиками [8].

Хотя результаты расчетов трендов ледовитости по спутниковым данным за различные периоды времени носят массовый характер, количественные оценки их сравнения отсутствуют. Дело в том, что для анализа используется коэффициент тренда a_1 , который зависит от площади морского льда. Однако, поскольку площадь морского льда сильно варьирует не только для разных регионов, но даже в сезонном ходе для одного и того же региона, количественное сравнение трендов ледовитости практически невозможно.

В настоящей работе для этой цели вводится индекс тренда, который представляет собой отношение размаха тренда ($a_1 n$) к его среднему значению (X_{cp}) и выражается в условных единицах [6]:

$$I_{tp} = 100 a_1 n / X_{cp}, \quad (1)$$

где a_1 — коэффициент уравнения линейного тренда ($X = a_1 t + a_0$), характеризующий скорость изменения X в единицу времени t ; n — длина ряда. Индекс тренда — безразмерная величина, что очень удобно для сравнения характеристик разной размерности и даже одной размерности, но значительно различающихся по абсолютной величине. Это полностью относится к спутниковым данным ПРМЛ.

На рис. 1 приводится годовой ход оценок a_1 и I_{tp} для Баренцева и Карского морей за период 1979—2017 гг. Можно отметить малую изменчивость значений a_1 и, наоборот, высокую изменчивость значений I_{tp} . Если максимальная оценка

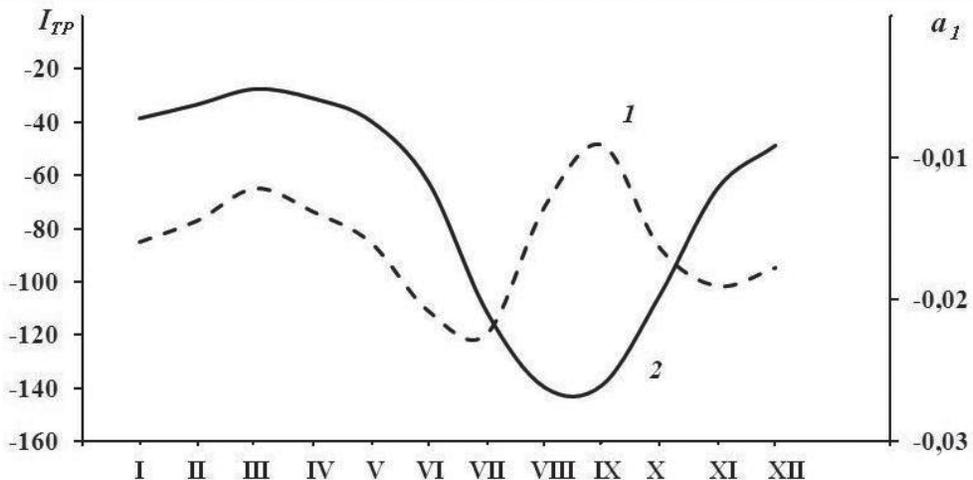


Рис. 1. Годовой ход коэффициентов тренда a_1 (1) и индексов тренда I_{tp} (2) для акватории Баренцева и Карского морей, осредненный за период 1979—2017 гг.

a_1 превышает минимальную ровно в два раза, то для оценки $I_{тр}$ это отношение составляет более пяти. Нетрудно видеть, что при почти одном и том же значении $a_1 = -0,013 \cdot 10^5$ км²/год (март и август) оценки $I_{тр}$ составляют $-27,4$ и $-139,9$, т. е. отличаются друг от друга в пять раз.

Анализ трендов

Статистические оценки трендов ПРМЛ для марта и сентября за период 1979—2017 гг. для разных регионов Северного полушария приводятся в табл. 1. В соответствии с критерием Стьюдента при $\alpha = 0,05$ получим приближенное критическое значение $R^2_{кр} \approx 0,10$. При $R^2 > R^2_{кр}$ тренд считается значимым [5]. Из табл. 1 видно, что коэффициенты тренда a_1 для Северного полушария (S_{NH}) и Арктического бассейна (S_{AB}) на порядок больше значений a_1 для других северных регионов в сентябре, однако индексы тренда заметно меньше, чем в некоторых регионах Арктики.

Таблица 1

Характеристики линейного тренда ПРМЛ (10^5 км²/год)
для разных регионов Северного полушария в за период 1979—2017 гг.

Акватория	Сентябрь			Март		
	R^2	a_1	Индекс тренда	R^2	a_1	Индекс тренда
Баренцево и Карское моря	0,37	-0,091	-138,5	0,55	-0,121	-27,4
Берингово море	0,72	-0,002	-151,6	0,00	-0,001	-0,6
Канадский Арктический архипелаг	0,18	-0,038	-34,9	0,00	-0,000	-0,00
Моря Лабрадор и Баффина	0,22	-0,012	-59,4	0,12	-0,056	-16,1
Гренландское море	0,18	-0,037	-46,3	0,65	-0,088	-41,2
Гудзонов залив	0,51	-0,016	-125,6	0,01	-0,000	-0,00
Арктический бассейн	0,73	-0,649	-48,4	0,14	-0,003	-0,02
Охотское и Японское моря	----	---	---	0,31	-0,097	-34,3
Залив Св. Лаврентия	---	---	---	0,12	-0,021	-39,0
Северное полушарие	0,77	-0,845	-51,8	0,74	-0,386	-10,0

Примечание. R^2 — доля дисперсии исходного ряда, описываемая трендом.

В сентябре все тренды являются значимыми. С увеличением ПРМЛ случайные колебания нивелируются, дисперсия временных рядов, как правило, уменьшается. Поэтому максимальный коэффициент детерминации отмечается для S_{NH} и S_{AB} . Минимальные оценки R^2 имеют место для ПРМЛ Канадского Арктического архипелага и Гренландского моря. В марте для нескольких регионов (Берингово море, Канадский Арктический архипелаг, Гудзонов залив) тренды ледовитости оказываются незначимыми. Максимальный коэффициент детерминации тренда опять-таки свойствен S_{NH} . Быстрее всего значение $I_{тр}$ уменьшается в марте в Гренландском море и заливе Св. Лаврентия. Практически неизменным остается ледяной покров на акватории Канадского Арктического архипелага, Гудзонова залива, а также Берингова моря. Все тренды в марте по величине $I_{тр}$ значительно уступают

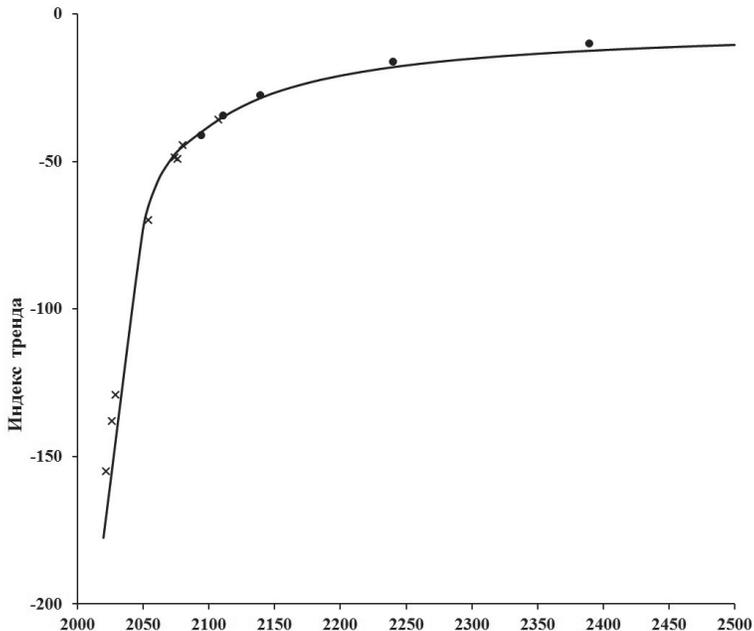


Рис. 2. Зависимость года выхода на безледный режим площади распространения морского льда в разных регионах в сентябре (кружки) и марте (крестики) от индекса тренда.

трендам в октябре. Особенно велики различия в Баренцевом и Карском морях, для которых индекс тренда в сентябре больше, чем в марте, на 108 единиц. Только для Гренландского моря значения индекса тренда примерно одинаковы.

Максимальные оценки индекса тренда отмечаются для сентябрьских значений ледовитости Берингова моря ($I_{тр} = -151,6$) и Баренцева, Карского морей ($I_{тр} = -138,5$). Максимальная оценка индекса тренда в марте наблюдается для Гренландского моря ($I_{тр} = -42,1$). Для S_{AB} и S_{NH} индексы тренда в сентябре близки (48,4 и 51,8), однако в марте значение $I_{тр}$ для S_{AB} близко к нулю, т. е. Арктический бассейн практически полностью покрывается льдами.

Индексам тренда можно дать четкую интерпретацию. Обратимся к рис. 2, на котором приводится распределение года выхода на безледный режим ($N_{бр}$) в сентябре и марте в зависимости от значимых индексов тренда $I_{тр}$. Нетрудно видеть, что чем больше индекс тренда, тем быстрее наступает безледный режим, а с уменьшением $I_{тр}$ период выхода на $N_{бр}$ резко увеличивается, причем $N_{бр} \rightarrow \infty$ при $I_{тр} \rightarrow 0$. В результате аппроксимации данной зависимости была получена простая гиперболическая формула вида

$$N_{бр}(t) = -3481,1/I_{тр} + 3,41. \quad (2)$$

Здесь $N_{бр}(t) = N_{бр} - 2000$. Формула (2) точно аппроксимирует зависимость между $N_{бр}$ и $I_{тр}$ ($R^2 = 0,99$), поэтому средняя квадратическая ошибка мала ($\sigma_N = 4,1$ года). Если, например, $I_{тр} = -50$, то $N_{бр} = 73 + 2000 = 2073 \pm 4$ г.

К оценке выхода на безледный режим регионов Северного полушария в сентябре

Рассмотрим оценки выхода на безледный режим регионов Северного полушария в сентябре на основе трендового подхода. Как уже было указано выше, в его основе лежит предположение стационарности (неизменности) климатических условий за весь период времени, т. е. климатический режим в период 1979—2017 гг. не должен изменяться вплоть до выхода на безледный режим. Если же произойдет очередное «полярное усиление», то рассчитанные оценки выхода на безледный режим будут отклоняться в сторону более ранних сроков.

Помимо линейного тренда, будем использовать также нелинейный тренд в виде полинома второй степени. В табл. 2 приводятся годы выхода на безледный режим для разных регионов. Как известно, величина тренда — весьма изменчивая характеристика, которая полностью зависит от длины ряда. При ее изменении тренд может появляться, исчезать, менять свою интенсивность и форму [5]. В связи с этим для проверки степени устойчивости линейного тренда был выполнен следующий эксперимент. В качестве начального периода был взят промежуток времени 1979—2010 гг., для которого рассчитывался линейный тренд ПРМЛ для всех регионов. Затем путем добавления каждый раз по одному году были рассчитаны тренды вплоть до 2017 г.

Итак, был получен набор из восьми трендов. Из него была выбрана его максимальная и минимальная оценки. Например, если для S_{NH} максимальный тренд отмечался за период 1979—2012 гг. ($a_1 = -0,890$), то минимальный тренд в период 1979—2011 гг. ($a_1 = -0,815$). Расхождение между ними составляет 9 %. Именно для этих трендов дополнительно рассчитывался выход на безледный режим ПРМЛ, оценки которого даны в табл. 2. При условии максимального тренда выход на ноль в Северном полушарии происходит в 2066 г., в случае минимального тренда — в 2081 г., т. е. расхождение составляет всего 15 лет.

Таблица 2

Оценки выхода на начальный год безледного режима ледовитости различных регионов Северного полушария на основе аппроксимации линейного и нелинейного тренда

Акватория	Линейный тренд			Нелинейный тренд
	По минимальному тренду	1979—2017 гг.	По максимальному тренду	
Баренцево и Карское моря	2032	2026	2024	2018
Берингово море	2027	2022	2019	2027
Канадский Арктический архипелаг	2094	2107	2114	2060
Моря Лабрадор и Баффина	2064	2062	2053	2050
Гренландское море	2089	2080	2070	2046
Гудзонов залив	2032	2029	2019	----
Арктический бассейн	2088	2076	2073	2042
Северное полушарие	2081	2074	2066	2040

Аналогичный расчет был выполнен и для регионов Арктики. Из табл. 2 видно, что минимальное расхождение в оценках выхода на безледный режим

наблюдается для Баренцева, Карского и Берингова морей (восемь лет), а максимальное расхождение — для Канадского Арктического архипелага и Гренландского моря (20 и 19 лет). Это свидетельствует о достаточной устойчивости оценок линейного тренда за период 39 лет. Однако неопределенность во втором случае заметно выше, так как экстраполяция тренда выполняется на более длительный период времени.

Одновременно оценки выхода на безледный режим были рассчитаны по формуле (2). Сравнение их с оценками, приведенными в табл. 3, показало, что среднее расхождение равно нулю, а максимальное расхождение составляет 4 года, т. е. формула (2) может быть использована непосредственно для долговременного прогноза ПРМЛ.

Следует отметить, что распределение трендов опосредованно учитывает физико-географические особенности регионов и особенности воздействия на ПРМЛ различных гидрометеорологических факторов, которые к настоящему времени довольно хорошо изучены ([3, 4, 7, 9] и др.). Если бы они были одинаковыми, то тренды для всех регионов совпадали бы и выход на безледный режим стал бы одновременным.

Выход на безледный режим по нелинейному тренду повсюду за исключением Берингова моря происходит раньше. Наибольшее ускорение (47 лет) отмечается для Канадского Арктического архипелага, наименьшее — для Баренцева и Карского морей (восемь лет). Нет выхода на безледный режим в Гудзоновом заливе. Дело в том, что после 2000 г. произошла определенная стабилизация ледяного покрова залива, в результате чего полиномиальная кривая получила тенденцию вверх. Ближайшие годы покажут, насколько устойчивой является такая стабилизация. Заметим, что близкая оценка выхода на безледный режим S_{NH} по нелинейному тренду за период 1979—2014 гг. получена в работе (2035 г.) [1]. На качественном уровне можно говорить о том, что ускорение за счет нелинейного тренда может приближенно показывать, как будет вести себя ледяной покров при увеличении темпов потепления в Арктике.

При использовании трендового подхода к прогнозу года выхода на безледный режим ПРМЛ регионов Арктики есть ряд неопределенностей. Помимо сохранения в будущем текущего климатического режима, прогностические оценки зависят от того, насколько точно тренд описывает дисперсию исходного ряда. Очевидно, что чем больше коэффициент детерминации тренда, тем выше должна быть точность прогностических оценок ПРМЛ. Если для ПРМЛ Северного полушария и Арктического бассейна точность описания дисперсии трендами в сентябре можно считать вполне удовлетворительной, то для некоторых регионов (Гренландское море, море Лабрадор и др.) коэффициенты детерминации невелики. Возникает вопрос, являются ли для таких регионов полученные прогностические оценки выхода на безледный режим случайными?

Рассмотрим данный вопрос на примере наиболее интересных морей — Гренландского и Баренцева с Карским, для которых коэффициент детерминации тренда в сентябре равен 0,18 и 0,37 соответственно. Как известно, межгодовая изменчивость временного ряда может быть выражена суммой трех компонентов: трендом,

циклическим и случайным компонентами. Случайный компонент поддается прогнозированию на один-два шага, что нас не устраивает. Если циклический компонент представить суммой значимых гармоник, то их несложно рассчитать на более длительный срок.

Было выявлено, что в сентябрьской ледовитости Баренцева и Карского морей присутствуют четыре значимые гармоники (9,5; 6,3; 4,75; 3,2 года), суммарный вклад которых в дисперсию временного ряда составляет 33,3 % (табл. 3). При этом максимальный вклад (9,4 %) дают гармоники с периодом 9,5 и 4,75 года. Если гармоники не являются случайными, то они должны повторяться с тем же периодом и в другие месяцы. В ледовитости Карского и Баренцева морей за март отмечаются три значимые гармоники, вклад которых в дисперсию равен 23 %, причем две из них (6,3 и 4,75 года) повторяются и в сентябре. В предположении постоянства данных гармоник во времени выполнен модельный расчет (рис. 3), согласно которому выявлено, что с их учетом выход на безледный режим БКМ происходит в 2021 г., т. е. отклонение от тренда составляет пять лет и, по существу, не выходит за рамки ошибки тренда.

Таблица 3

Оценки вклада в дисперсию временного ряда
сентябрьских значений гармоник и тренда для ПРМЛ
Баренцева и Карского морей и Гренландского моря за период 1980—2017 гг.

Баренцево и Карское моря				Гренландское море			
Сентябрь		Март		Сентябрь		Март	
τ	$B, \%$	τ	$B, \%$	τ	$B, \%$	τ	$B, \%$
9,50	9,4	19,0	8,2	12,67	9,7	6,33	8,7
6,33	7,3	6,33	7,6	9,50	9,0	—	—
4,75	9,4	4,75	7,2	5,43	16,2	—	—
3,17	7,2	—	—	4,75	13,0	—	—
Тренд	37,3	—	54,8	—	18,4	—	65,0
Сумма	70,6	—	77,8	—	66,3	—	73,7

Примечание. τ — период гармоники (число лет), B — вклад гармоники в дисперсию исходного ряда (%).

Что касается Гренландского моря, то, как и следовало ожидать, там в межгодовой изменчивости ПРМЛ в сентябре основные гармоники играют значительную роль, описывая около 50 % дисперсии временного ряда (см. табл. 3). При этом наибольшая гармоника (4,75 года) лишь незначительно по своему вкладу уступает тренду. Для Гренландского моря также выполнен модельный расчет выхода на безледный режим с различными вариантами учета гармоник. Было выявлено, что за счет большого «веса» короткопериодных гармоник (5,4 и 4,7 года) отмечаются большие отклонения прогнозистической кривой ПРМЛ от линии тренда. При этом до 2080 г., когда линия тренда пересекает нулевую отметку, происходит пять переходов через эту отметку — самый ранний в 2055 г. Естественно, такой прогноз не имеет смысла. Однако если использовать только «длиннопериодные» гармоники (12,7 и 9,5 года), то результаты заметно улучшаются (рис. 4). В этом случае выход

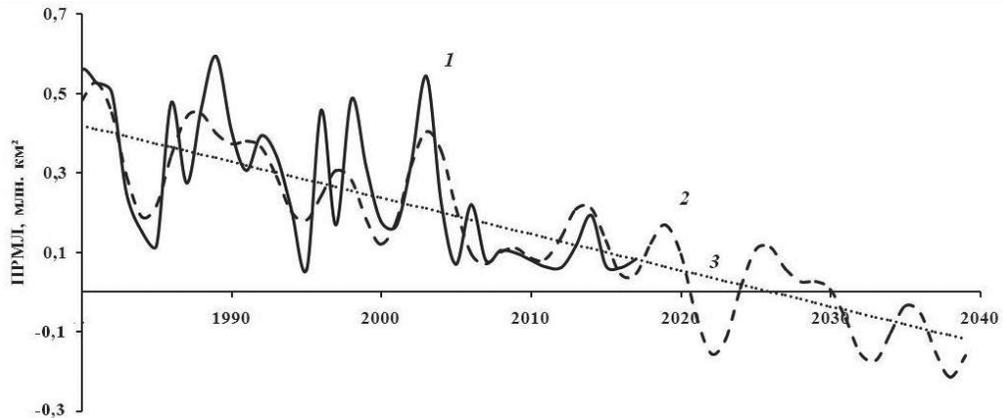


Рис. 3. Результаты экстраполяции сентябрьской ПРМЛ для акваторий Баренцева и Карского морей.

1 — фактические значения ПРМЛ,
2 — расчетные значения ПРМЛ (тренд плюс гармоники 9,5; 6,3 и 4,7 года), 3 — линия тренда.

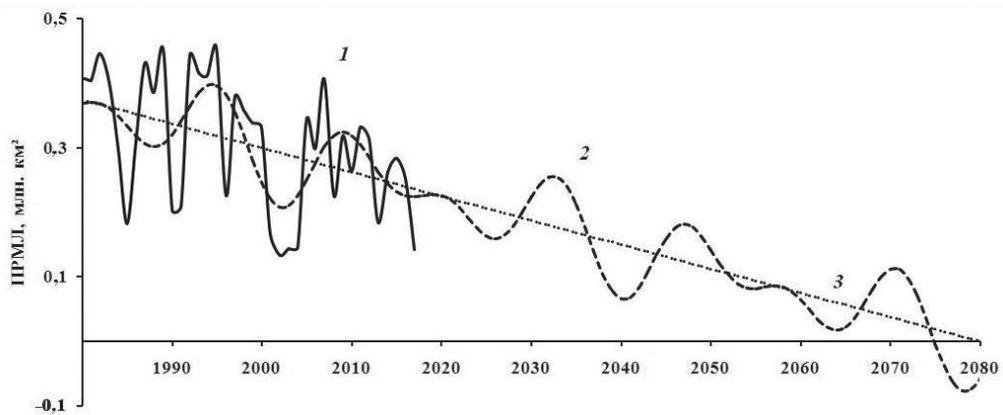


Рис. 4. Результаты экстраполяции сентябрьской ПРМЛ для акватории Гренландского моря.

1 — фактические значения ПРМЛ,
2 — расчетные значения ПРМЛ (тренд плюс гармоники 12,7 и 9,5 года), 3 — линия тренда.

на безледный режим происходит в 2075 г., т. е. отклонение от тренда (пять лет) не выходит за рамки ошибки тренда.

Итак, оценки неопределенности, связанные с малыми коэффициентами детерминации тренда ПРМЛ в некоторых регионах Арктики, показывают, что учет гармоник в расчетах выхода на безледный режим в сентябре не выходит за рамки среднеквадратической ошибки тренда.

Заключение

В настоящей статье рассмотрены особенности возможных изменений в текущем столетии максимальной (март) и минимальной (сентябрь) ПРМЛ в различных регионах Арктики и Северного полушария ($n = 10$) по спутниковым данным за период 1989—2017 гг. Впервые выполнен сравнительный анализ трендов на основе введения безразмерного индекса тренда $I_{\text{тр}}$. Необходимость введения $I_{\text{тр}}$ связана с тем, что оценки ПРМЛ значительно различаются по абсолютной величине не только для разных регионов, но даже в сезонном ходе для одного и того же региона. Показано, что индексы тренда имеют четкую интерпретацию. Чем больше индекс тренда, тем быстрее наступает безледный режим, и, наоборот, с его уменьшением время выхода на безледный режим резко увеличивается, причем $N_{\text{бр}} \rightarrow \infty$ при $I_{\text{тр}} \rightarrow 0$.

Выполнена с высокой точностью ($R^2 = 0,99$) аппроксимация зависимости $I_{\text{тр}}$ от $N_{\text{бр}}$ гиперболической формулой. Показано, что максимальные оценки индекса тренда отмечаются для сентябрьских значений ледовитости Берингова моря ($I_{\text{тр}} = -151,6$) и Баренцева, Карского морей ($I_{\text{тр}} = -138,5$). В марте максимальная оценка индекса тренда наблюдается для Гренландского моря ($I_{\text{тр}} = -42,1$).

Представлены оценки выхода на безледный режим в сентябре на основе экстраполяции линейных и нелинейных трендов за период 1979—2017 гг. С учетом того что величина тренда сильно зависит от длины ряда, была выполнена проверка устойчивости линейного тренда. Для этого выбирались оценки максимального и минимального тренда за последние восемь лет (с 2010 по 2017 г.) и для них определялся выход на безледный режим. Показано, что для всех регионов расхождения в оценках выхода на безледный режим являются малыми и составляют от восьми до 20 лет, что свидетельствует о достаточной устойчивости оценок линейного тренда за период 39 лет.

Быстрее всего очищение от морского льда по линейному тренду может произойти в Беринговом море (2022 г.), затем в Баренцевом и Карском морях (2026 г.), а наиболее длительно — на акватории Канадского Арктического архипелага (2107 г.). В целом для всего полушария выход на безледный режим ожидается в 2074 г., в Арктическом бассейне — в 2076 г. Это может произойти при повышении глобальной температуры воздуха на $1,85$ °С по сравнению со значением за 1979 г. При этом даже для регионов, где коэффициент детерминации тренда ПРМЛ мал, трендовый подход к оценке выхода на безледный режим в сентябре оказывается достаточно успешным, поскольку учет гармоник не выходит за рамки среднеквадратической ошибки тренда.

Прогностические оценки ПРМЛ получены в предположении постоянства во времени тренда ледовитости Арктики, т. е., по сути, при сохранении настоящего климатического режима в будущем. Однако в случае повышения темпов потепления, что, вообще говоря, вполне реально, выход на безледный режим Арктики летом может произойти раньше.

Список литературы

1. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Смоляницкий В.М., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5—19.
2. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Ретина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50—65.
3. Гудкович З.М., Карклин В.П., Фролов И.Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 5—14.
4. Захаров В.Ф., Малинин В.Н. Морские льды и климат. СПб: Гидрометеоздат, 2000. 91 с.
5. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб: изд-во РГГМУ, 2008. 407 с.
6. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 3—11.
7. Семенов В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера — арктические льды — океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 231—248.
8. Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Л.К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP3 и CMIP5 // Лед и Снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 77—107.
9. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб: Наука, 2007. 136 с.
10. Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 28—41.
11. Cavalieri, D. J., Parkinson, C. L., Gloersen, P., Comiso, J. C., and Zwally, H. J. Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multisensor data sets // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 15 803 —15 814.
12. Cavalieri, D. J., Parkinson, C. L., DiGirolamo, N., and Ivanoff, A. Intersensor calibration between F13 SSMI and F17 SSMIS for global sea ice data records // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 9. P. 233—236, doi:10.1109/LGRS.2011.2166754, 2012.
13. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
14. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
15. Kinnard C., Zdanowicz C.M., Fisher D.A., Isaksson E., de Vernal A., Thompson L.G. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years // Nature. 2011. V. 479. P. 509—512.
16. Parkinson C.L. Global Sea Ice Coverage from Satellite Data: Annual Cycle and 35-Yr Trends // J. Climate. 2014. V. 27. P. 9377—9382.
17. Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophys. Research Letters, VOL. 34, L09501, doi: 10.1029/2007GL029703, 2007.
18. Stroeve J.C., Kattsov V., Barrett A., Serreze M., Pavlova T., Holland M., Meier W.N. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. doi:10.1029/2012GL052676.
19. Serreze M. C., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2015. V. 373. P. 20140159.