

УДК [551.467.3.03+551.588.7](98)
DOI: 10.24412/2658-4255-2022-1-08-23

Для цитирования:

В.Н. Малинин, П.А. Вайновский
К оценке сроков полного
очистения морей Российской
Арктики от льда в летний
период // Российская Арктика.
2022. № 16. С. 08–23

Получена: 03.11.2021

Принята: 19.01.2022

Опубликована: 26.01.2022



Статья распространяется
в полнотекстовом формате на
условиях лицензии Creative
Commons Attribution 4.0

К ОЦЕНКЕ СРОКОВ ПОЛНОГО ОЧИЩЕНИЯ МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ ОТ ЛЬДА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

В.Н. Малинин¹, П.А. Вайновский²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет,
г. Санкт-Петербург; malinin@rshu.ru

² ООО «Прогноз», г. Санкт-Петербург; pv974@yandex.ru

Аннотация: В статье рассматривается статистический метод прогноза полного очищения от льда в сентябре морей Российской Арктики, информационной основой которого послужили данные по площади распространения морского льда (ПРМЛ) за период 1979–2021 гг., заимствованные из архивов ААНИИ и NSIDC. Физической основой метода является предположение о стационарности (неизменности) климатических изменений в системе «океан-морской лёд-атмосфера», т. е. сохранение их на весь период прогнозирования. Статистической основой служит расчёт линейных трендов и значимых циклических колебаний. Показано, что вклад линейных трендов в дисперсию годовых значений ПРМЛ значителен для всех морей, причём по мере продвижения с запада на восток он повышается и достигает максимума в Чукотском море. Самое раннее очищение от льда в сентябре по обоим архивам происходит в Чукотском море и связано с его малой площадью и непосредственным влиянием притока тёплых вод из Тихого океана через Берингов пролив. По данным NSIDC выход на безледный режим происходит заметно позже, чем по данным ААНИИ.

Ошибки (неопределенности) прогноза ПРМЛ зависят от степени устойчивости линейных трендов во времени. Поэтому выполнялся расчет 10 трендов за предыдущие годы и для каждого моря выбирались максимальный и минимальный тренды. Разность в годах выхода на безледный режим по этим трендам показывает область неопределенности прогностических оценок. По данным NSIDC даже минимальный разброс (Чукотское море, 11 лет) больше максимального по данным ААНИИ (Восточно-Сибирское море). Малый диапазон неопределенностей для ПРМЛ морей данных ААНИИ связан с особенностями частотной структуры их временных рядов после 2005 года. Однако даже неопределенности по данным NSIDC невелики и существенно меньше неопределенностей, возникающих при прогнозе ПРМЛ на основе климатических моделей.

Ключевые слова: площадь морского льда, моря Российской Арктики, тренды, прогноз

ESTIMATING THE TIMING OF THE COMPLETE CLEARANCE FROM ICE OF THE RUSSIAN ARCTIC SEAS IN SUMMER PERIOD

V. N. Malinin¹, P. A. Vainovsky²

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

² LLC “Prognoz”, Saint Petersburg

Abstract: The article discusses a statistical method for forecasting the complete ice clearance in September of the seas of the Russian Arctic, the information basis of which was the data on the area of

sea ice extent (SIE) for the period 1979-2021, borrowed from the archives of the AARI and NSIDC. The physical basis of the method is the assumption of stationarity (invariability) of climatic changes in the "ocean-sea ice-atmosphere" system, that is, their preservation for the entire forecasting period. The statistical basis is the calculation of linear trends and significant cyclical fluctuations. It is shown that the contribution of linear trends to the variance of the annual SIE values is significant for all seas; moreover, as it moves from west to east, it increases and reaches a maximum in the Chukchi Sea. According to both archives, the earliest clearing of ice in September occurs in the Chukchi Sea and is associated with its small area and the direct influence of the influx of warm waters from the Pacific Ocean through the Bering Strait. According to NSIDC data, reaching the ice-free regime occurs much later than according to the AARI data.

Errors (uncertainties) in the SIE forecast depend on the degree of stability of linear trends over time. Therefore, 10 trends were calculated for previous years, and the maximum and minimum trends were selected for each sea. The difference in the years when the ice-free regime was reached according to these trends shows the area of uncertainty in the prognostic estimates. According to NSIDC data, even the minimum spread (Chukchi Sea, 11 years) is greater than the maximum according to the AARI data (East Siberian Sea). A small range of uncertainties for the SIE of the seas AARI data is associated with the peculiarities of the frequency structure of their time series after 2005. However, even the uncertainties according to the NSIDC data are small and significantly less than the uncertainties arising in the forecast of SIE based on climate models.

Keywords: sea ice extent, seas of the Russian Arctic, trends, forecast

Введение

Поскольку Арктика является богатейшей кладовой природных ресурсов, то для их освоения возникает острая необходимость в разработке долговременных (на длительную перспективу) прогнозов климатических характеристик. Для освоения Северного морского пути [1, 2, 3] особенно актуальны оценки сроков полного очищения акватории морей от льда. Раньше всего это будет происходить в сентябре, когда площадь морского льда имеет наименьшие размеры. Впрочем, в последние годы из-за высоких темпов потепления ряд морей и их отдельных районов может очищаться уже в августе, что повышает длительность навигации. Кроме того, сроки выхода на безледный режим принципиально важны с точки зрения изучения изменений климата, поскольку это будет повышать рост температуры воздуха в Арктике, прежде всего, за счет изменения альбедо подстилающей поверхности, повышения теплонакопления поверхностных слоев моря, а также ряда других положительных обратных связей в системе «океан-морской лед-атмосфера» [4]. В результате полярное усиление будет еще более усиливаться.

Наиболее распространенным способом построения прогнозных оценок площади морского льда (ПМЛ) на удаленную перспективу являются модели общей циркуляции атмосферы и океана, которые позволяют рассчитывать параметры климата на очень длительный период времени. Обычно для этого используются климатические сценарии, на осно-

ве которых рассчитываются оценки изменений глобального климата до 2100 года. Наиболее широкое распространение они получили в рамках проектов CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3), CMIP5 и CMIP6, результаты которых использовались соответственно в Четвёртом [5], Пятом [6] и Шестом [7] оценочных докладах Межправительственной группы экспертов по изучению климата (МГЭИК). При этом прогностические оценки, рассчитанные по отдельным моделям, характеризуются значительными расхождениями, а разброс прогностических оценок на год полного очищения Арктики в летний период от льда, составляет более 70 лет [8, 9].

В работе [10] приводятся оценки прогноза площади распространения морского льда (ПМЛ или sea ice extent) в сентябре по комплексу из 13 климатических (IPCC AR4) моделей в рамках проекта CMIP3 на 2100 год, которые свидетельствуют об огромном разбросе как диагностических, так и прогностических оценок ледовитости. В Пятом отчете МГЭИК [6] представлены результаты моделирования сентябрьской ледовитости в рамках CMIP5 с использованием более 40 моделей для четырех климатических сценариев, которые также показывают огромные расхождения в прогностических оценках площади морского льда на 2100 год. Если по наиболее жесткому сценарию RCP8.5 выход на безледный режим может произойти в 2100 г., то по самому мягкому сценарию RCP2.6, близкому к современному климату, после 2040 г. происходит стабилизация ПМЛ на уровне около 4 млн. кв. км.

Подробное сравнение результатов моделирования ПМЛ в рамках проектов CMIP3 и CMIP5 для сентября выполнено в работе [8]. Показано, что модели пятого поколения CMIP5 «агрессивного» сценария RCP8.5 гораздо лучше по сравнению с моделями третьего поколения CMIP3 воспроизводят средние значения и тренд ПМЛ в Арктике. К концу XXI в., согласно CMIP3, ПМЛ может составить 2 млн км², в то время как согласно CMIP5 Арктика выходит уже на безледный режим. Однако неопределенность средней оценки площади морских льдов, характеризуемой среднеквадратической ошибкой $\pm\sigma$, достигает для CMIP3 ± 4 млн км² и для CMIP5 ± 2 млн км². При этом 90 %-й доверительный интервал для среднего значения ПМЛ по ансамблю CMIP5 составляет ± 75 лет. Такой разброс сводит на нет результаты прогноза ПМЛ по климатическим моделям.

Результаты использования 44 моделей в рамках проекта CMIP6 обсуждаются в работах [11 – 13]. Показано, что модели CMIP6 по-прежнему дают большой разброс прогностических оценок ПМЛ, хотя и несколько меньший по сравнению с проектом CMIP5. При этом сроки выхода на безледный режим заметно уменьшаются. В большинстве моделей Северный Ледовитый океан (СЛО) становится практически свободным в сентябре от морского льда (ПМЛ < 1 млн. км²) до 2050 г.

Итак, становится очевидным, что необходима разработка альтернативных способов долговременного прогноза ледовитости, в качестве которых могут быть использованы статистические методы. Например, если линейные тренды описывают значительную часть дисперсии исходных рядов, то в предположении стационарности (неизменности) климатических изменений в системе «океан-морской лед-атмосфера», т. е. сохранении их на весь период прогнозирования, нетрудно получить прогнозные оценки климатической характеристики практически на любой заданный год. Линейные тренды учитывают современное полярное (арктическое) усиление, которое представляет собой более высокую скорость измене-

ния приземной температуры воздуха в Арктическом регионе по сравнению с ее глобальной величиной [14]. Кроме того, поскольку во временных рядах могут присутствовать циклические колебания, которые дают определенный вклад в изменчивость ПРМЛ, то требуется дополнительно их рассчитывать и учитывать в прогнозировании. Отметим, что подобным образом в работах [15, 16] получены оценки выхода на безледный режим некоторых морей Арктики и всего СЛО. Трендовый подход к прогнозу полного очищения от льда СЛО использован также в работах [17, 18].

Цель данной работы состоит в оценке сроков полного очищения от льда в сентябре акватории морей Российской Арктики (Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского) на основе комбинированного статистического метода с использованием трендов и циклических составляющих площади распространения морского льда по данным двух архивов: NSIDC и ААНИИ.

Материалы и методы

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. Микроволновое зондирование позволяет получать спутниковые данные общей сплоченности морского льда в процентах по ячейкам сетки полярной стереографической проекции размерностью 25×25 км с дискретностью 1–2 суток. По значениям сплоченности определяется площадь морского льда (ПМЛ, sea ice area) и площадь распространения (протяженности) морского льда (ПРМЛ, sea ice extent), под которой понимают площадь, занятую льдом всех возрастов с концентрацией более 0,15.

К числу наиболее известных центров, распространяющих спутниковые продукты по сплоченности морского льда, относится американский центр по снегу и льду National Snow and Ice Data Center (NSIDC), данные которого даются в свободном доступе на сайте <http://nsidc.org/>. Подробная документация спутниковой обработки данных представлена в ряде работ, в том числе [19].

Для оценки сплоченности морского льда используется алгоритм NASA Team (NT), достоинства и недостатки которого достаточно хорошо известны [20, 21, 22]. Детальное сравнение NT алгоритма с данными оперативных ледовых карт, выполненное авторами работы [23], показало значительное расхождение (до 44 %) в оценках сплоченности морского льда в летнее время, в то время как зимние погрешности при оценке сплоченности сплошных льдов составили ~ 10%. Тем не менее такая точность считается приемлемой. С учетом общедоступности непрерывно пополняемых спутниковых данных это делает их важнейшим источником фактической информации о современных тенденциях в состоянии ледяного покрова [24–28]. По мнению В.А. Семенова [8], оценки изменчивости и статистических трендов параметров ледяного покрова являются самыми точными и достоверными по сравнению с другими климатическими характеристиками. В данной работе использованы среднемесячные данные sea ice extent, взятые с сайта <http://nsidc.org/> за период 1979–2021 гг. для морей Российской Арктики (Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское).

В России главным центром, распространяющим спутниковые продукты по сплоченности морского льда, является ААНИИ. В настоящее время данные по ледовитости доступны потребителям с сайта <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/>. К сожалению, документация спутниковой обработки данных нам неизвестна. Известно только, что «оценки общей сплоченности в оперативном режиме копируются в ААНИИ с сервера NSIDC, причем вся последующая обработка данных выполняется в рамках авторского программного обеспечения ААНИИ» [29].

Основой для прогнозирования ПМЛ служит аддитивная модель межгодовых изменений временного ряда в следующем виде:

$$X(t) = Tr(t) + C(t) + P(t) \quad (1)$$

где $Tr(t)$ – трендовая составляющая;

$C(t)$ – циклическая компонента, характеризующая регулярные (циклические) межгодовые колебания;

$P(t)$ – остаточная часть, характеризующая нерегулярные (случайные) межгодовые колебания.

Сумма трендовой и циклической компонент означает детерминированную часть разложения (1), которая поддается интерпретации и строго описывается статистическими методами. Если сумма компонент $Tr(t) + C(t)$ описывает значительную часть дисперсии исходного ряда, то можно выполнять аппроксимацию этих компонент для прогноза. Методы расчета и оценивания указанных компонент приводятся в работе [30]. Помимо классического коэффициента тренда Tr , величина которого зависит от площади морского льда, выполнялся расчет безразмерного индекса тренда [31], поскольку это очень удобно для сравнения характеристик разной размерности и даже одной размерности, но значительно различающихся по абсолютной величине. Индексы тренда $I_{тр}$ имеют четкую интерпретацию. Между $I_{тр}$ и годом выхода на безледный режим ($N_{бр}$) существует простая гиперболическая зависимость

$$N_{бр} = (3,70 - 3480,1 / I_{тр}) + 2000, \quad (2)$$

Из этой формулы следует, что с уменьшением $I_{тр}$ выход на $N_{бр}$ резко увеличивается, причем если $I_{тр} \rightarrow 0$, то $N_{бр} \rightarrow \infty$. Погрешность года выхода на безледный режим мала и составляет ± 4 года [16].

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приводятся статистические характеристики ПРМЛ морей Российской Арктики (РА) в сентябре по данным NSIDC и ААНИИ (в скобках). Прежде всего, отметим, что для восточных морей отмечаются значительные расхождения между NSIDC и ААНИИ в средних многолетних оценках ПРМЛ (S). Для Чукотского моря расхождение более чем в 2 раза. Очень высокой является межгодовая изменчивость ПРМЛ для всех морей, которая близка к их средним значениям, а в Баренцевом море оценка среднеквадратического отклонения (СКО) даже превышает среднюю оценку S . По оценкам СКО заметных расхождений между NSIDC и ААНИИ нет. Также сравнительно близкие оценки отмечаются в угловых коэффициентах тренда. Вклад линейных трендов в дисперсию (R^2) значений ПМЛ, исключая тренд для Баренцева моря, значителен для всех морей.

Максимальный вклад дает Чукотское море (0,67 по NSIDC и 0,58 по ААНИИ). Поскольку индекс тренда не зависит от площади, то его наибольшие оценки наблюдаются в Чукотском море, т.е. здесь уменьшение ПРМЛ идет с максимальной скоростью. При этом морю с самой большой ПРМЛ (Восточно-Сибирское, NSIDC), имеющему наибольший коэффициент тренда, соответствует минимальный индекс тренда.

Таблица 1

Статистические характеристики площади распространения морского льда морей Российской Арктики за период 1979–2021 гг. в сентябре по данным NSIDC и ААНИИ (в скобках)

Море	S , 10^6 км ² /год	СКО, 10^6 км ² /год	Tr , 10^5 км ² /год	R^2	$I_{тр}$
Баренцево	0,03 (0,05)	0,046 (0,058)	-0,001 (-0,002)	0,15 (0,23)	-180,3 (-189,8)
Карское	0,20 (0,15)	0,14 (0,138)	-0,007 (-0,007)	0,41 (0,44)	-154,2 (-210,5)
Лаптевых	0,34 (0,22)	0,20 (0,155)	-0,012 (-0,008)	0,51 (0,46)	-148,0 (-164,4)
Восточно-Сибирское	0,68 (0,36)	0,35 (0,268)	-0,022 (-0,017)	0,44 (0,58)	-137,8 (-198,6)
Чукотское	0,26 (0,11)	0,18 (0,112)	-0,013 (-0,007)	0,67 (0,58)	-211,4 (-272,9)

Аппроксимация трендов, представленных в табл. 1, до нулевых значений ПРМЛ не представляет сложности. Однако при этом следует учитывать неустойчивость трендов во времени. При изменении длины временного ряда тренд может появляться, исчезать, менять свою интенсивность и даже знак [30]. В связи с этим необходимым условием является проверка степени устойчивости линейного тренда во времени. В данной работе она осуществлялась следующим образом. Помимо основного тренда за 1979–2021 гг. рассчитывались последовательно тренды за предшествующий десятилетний период, т.е. начиная с 1979–2011 гг. и заканчивая 1979–2020 гг. В результате для каждого моря за сентябрь был получен набор из 10 трендов, из которого выбирались оценки максимального и минимального трендов. Понятно, устойчивость основного тренда тем выше, чем меньше от него отличаются эти тренды.

В табл. 2 приводятся оценки выхода на безледный режим морей Российской Арктики на основе аппроксимации линейных трендов по данным NSIDC и ААНИИ. Следует отметить исключительно высокую устойчивость трендов ПРМЛ ААНИИ. Максимальное расхождение в оценках выхода на безледный режим по минимальному и максимальному трендам составляет всего 4 года. Самое раннее очищение от льда в сентябре происходит в Чукотском море (2016 г.), самое позднее в море Лаптевых (2026 г.) Явное лидерство Чукотского моря связано с его малой площадью и непосредственным влиянием притока теплых вод из Тихого океана через Берингов пролив [32]. Согласно архиву NSIDC, полное очищение от льда, исключая Баренцево море, по основному тренду, характеризующему средние климатические условия, происходит заметно позже, чем по данным ААНИИ. В Восточно-Сибирском море запаздывание составляет 9 лет. Очевидно, причины этого связаны с корректировкой данных ПРМЛ в ААНИИ. Можно также отметить, что по данным архива NSIDC устойчивость трендов заметно меньше, при этом максимальный размах их наблюдается в Карском море (20 лет).

Таблица 2

Оценки выхода на начальный год безледного режима в сентябре морей Российской Арктики на основе аппроксимации линейного тренда по данным NSIDC и ААНИИ

Море	NSIDC			ААНИИ		
	Max. тренд	Основной тренд	Min. тренд	Max. тренд	Основной тренд	Min. тренд
Баренцево	2019	2024	2031	2022	2023	2026
Карское	2021	2028	2041	2019	2020	2020
Лаптевых	2024	2029	2040	2026	2026	2027
Восточно-Сибирское	2026	2031	2043	2020	2022	2024
Чукотское	2016	2020	2027	2012	2016	2016

Очевидно, высокая устойчивость трендов не является случайной. Так, в работе [4] предложено рассматривать период спутниковых наблюдений с 1979 г. за минимальной (сентябрьской) площадью морского льда в СЛО в виде 2 промежутков времени с существенно различной ледовитостью. Период 1979–2000 гг. характеризуется повышенной ПМЛ, период с 2007 г. по настоящее время – пониженной ледовитостью. Наконец, промежуток 2001–2006 гг. – переходный период. Такое разделение объяснено особенностями климатического режима и циркуляции СЛО в указанные периоды времени.

Анализ межгодовой изменчивости сентябрьской ПРМЛ в морях РА показал, что довольно четкое разделение на периоды повышенной и пониженной ледовитости можно провести в 2005 г. Поэтому были рассчитаны оценки средних значений и стандартных отклонений ПРМЛ морей за периоды 1979–2004 и 2005–2012 гг. по обоим архивам, которые представлены в табл. 3. Нетрудно видеть, что согласно архиву ААНИИ расхождение в оценках как средних значений, так и СКО, огромное. Так, для Чукотского моря ледовитость в 2005–2021 гг. уменьшилась на порядок, в Карском море – в 7,1 раз. Наименьшее уменьшение произошло в море Лаптевых (3,4 раза). Изменчивость временных рядов также сильно уменьшилась. Наибольшее уменьшение отмечается в Чукотском море (4,2 раза), наименьшее – в море Лаптевых (1,6 раза). Расхождения в оценках средних и СКО по данным NSIDC также имеют место, но они значительно меньше.

Таблица 3

Оценки первичных статистических характеристик площади распространения морского льда морей Российской Арктики в сентябре по данным NSIDC и ААНИИ (в скобках) для периодов повышенной и пониженной ледовитости в 106 км²

Море	1979–2004		2005–2021	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО
Баренцево	0,049 (0,074)	0,051 (0,062)	0,012 (0,017)	0,024 (0,029)
Карское	0,276 (0,227)	0,127 (0,124)	0,081 (0,032)	0,038 (0,036)
Лаптевых	0,461 (0,306)	0,152 (0,131)	0,156 (0,089)	0,119 (0,080)
Восточно-Сибирское	0,902 (0,521)	0,228 (0,215)	0,347 (0,111)	0,187 (0,104)
Чукотское	0,374 (0,163)	0,132 (0,109)	0,082 (0,017)	0,091 (0,026)

Обратимся к рис. 1, на котором приводится межгодовой ход сентябрьской площади морского льда Чукотского моря по данным обоих архивов. Из рис. 1 видно, что уже в 2004 г. произошло практически полное очищение моря от льда по архиву ААНИИ. В дальнейшем, хотя в 2006 и 2021 г. оценки ПРМЛ несколько отличались от нуля, но они не выходили за пределы СКО рассматриваемого периода времени (см. табл. 1). По сути, полное очищение моря от льда уже свершившийся факт. Однако по данным архива NSIDC выход на безледный режим происходит только в отдельные годы (2007, 2012, 2020 гг.). В остальной промежуток времени (после 2005 г.) отмечается превышение ПРМЛ по сравнению с данными ААНИИ, причем в некоторые годы весьма значительное (2006, 2013, 2021 гг.). Поэтому выход на безледный режим по основному тренду NSIDC должен произойти в 2022 г, а по минимальному – в 2029 г.

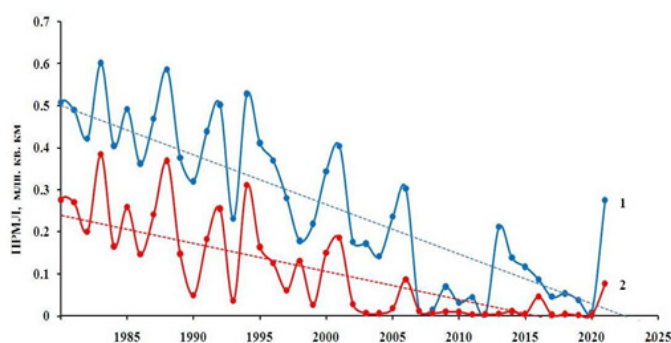


Рисунок 1 – Межгодовой ход площади распространения морского льда в Чукотском море в сентябре по данным NSIDC (1) и ААНИИ (2)

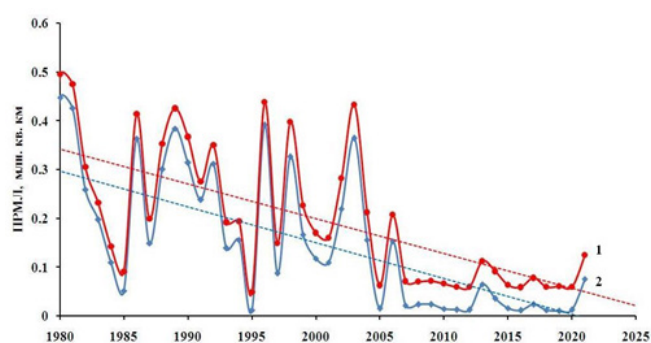


Рисунок 2 – Межгодовой ход площади распространения морского льда в Карском море в сентябре по данным NSIDC (1) и ААНИИ (2)

Наиболее точное соответствие в межгодовой изменчивости ПРМЛ рассматриваемых архивов отмечается для Карского моря (рис. 2). Нетрудно видеть полное совпадение экстремумов. Если оценки ряда ПРМЛ (ААНИИ увеличить на $0,05 \times 10^6$ км²/год, то они почти в точности совпадут со значениями ПРМЛ NSIDC. Корреляция между этими рядами равна $r=0,99$. Для других морей корреляция меньше. Наибольшие расхождения свойственны Чукотскому морю ($r=0,92$).

Согласно формуле (1) в прогнозе ПРМЛ также следует учитывать значимые цикличности временного ряда. Однако как видно из рис. 1 и 2 после 2005 г. цикличности в рядах ПРМЛ ААНИИ практически отсутствуют. Расчет гармоник по данным ААНИИ после исключения трендов показал, что значимые цикличности выявляются для Баренцева и Восточно-Сибирского моря. В первом случае это гармоники с периодами 3,6, 5,7 и 10,8 лет, суммарный вклад которых в дисперсию ПРМЛ достигает 35 %. Для Восточно-Сибирского моря значимыми являются гармоники с периодами 21,5 и 14,3 лет, вклад которых в дисперсию исходного ряда составляет 15 и 6 %.

Результаты аппроксимации ПРМЛ ААНИИ для Баренцева моря до полного очищения от льда с суммарным учетом данных гармоник приводится на рис. 3. Нетрудно видеть, что первое пересечение нулевой отметки суммарной гармонической кривой происходит еще в 2011 г., и затем она несколько раз ее пересекает. Последнее пересечение отмечается в 2032 г. Расхождение с пересечением по минимальному тренду достигает 6 лет. Это означает, что диапазон неопределенности возрастает на 6 лет и будет составлять 10 лет. Для Восточно-Сибирского моря пересечение нулевой отметки суммарной гармонической кривой происходит в 2020 г. и больше она из отрицательной области не выходит, т.е. никакого влияния на оценку неопределенности выхода на безледный режим моря она не оказывает.

В отличие от данных ААНИИ во временных рядах ПРМЛ NSIDC значимые цикличности выражены более отчетливо. Поэтому был выполнен гармонический анализ рядов ПРМЛ всех морей и отобраны значимые цикличности, оценки вкладов которых в дисперсию исходных рядов представлены на рис. 4. Нетрудно видеть отчетливую тенденцию увеличения роли трендов в описании дисперсии временных рядов по направлению с запада на восток и обратную тенденцию для суммарного вклада гармоник. При этом суммарный вклад гармоник в дисперсию ПРМЛ существенно меньше вклада трендов для всех морей, исключая Баренцево, где он достигает 59 %, в то время как на долю тренда приходится 17 %. На противоположной стороне Арктики, в Чукотском море, наоборот, отмечается максимальный тренд (67 %) и минимальный вклад гармоник (8 %). Что касается случайных колебаний, то их вклад в дисперсию максимален море Лаптевых (31 %) и минимален в Восточно-Сибирском море (16 %).

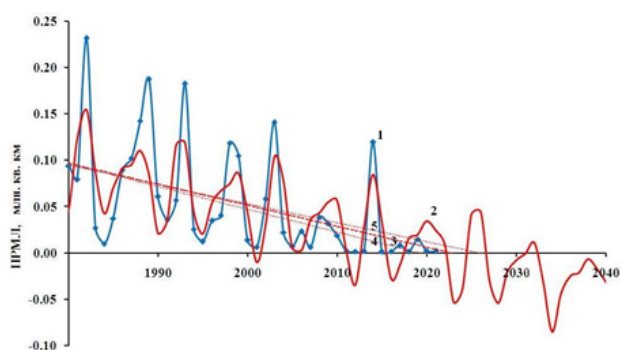


Рисунок 3 – Результаты экстраполяции сентябрьской площади морского льда Баренцева моря по данным ААНИИ.

1 – фактические значения ПРМЛ,
2 – расчетные значения ПРМЛ
(тренд плюс гармоники),
3 – линия основного тренда,
4 и 5 – линии максимального
и минимального трендов.

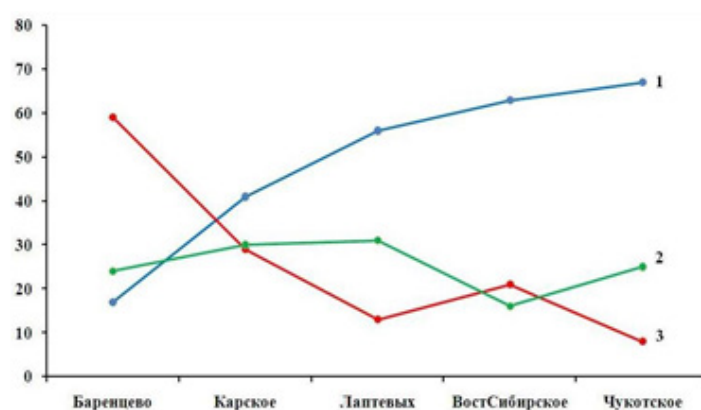


Рисунок 4 – Оценки вклада компонент уравнения (1) в дисперсию сентябрьских значений ПРМЛ NSIDC морей Российской Арктики, %.

1 – трендовая компонента,
2 – случайная компонента,
3 – циклическая компонента.

Оценки полного очищения от морского льда по суммарной гармонической кривой ПРМЛ NSIDC показали, что для всех морей, исключая Баренцево море, они не выходят за диапазон неопределенностей, обусловленных размахом выхода на безледный режим за счет максимального и минимального трендов. В Баренцевом море первый переход через нулевую отметку произошел в 2020 г., а последний ожидается в 2038 г. Таким образом, диапазон неопределенностей возрастает на 7 лет. В формировании такой сложной гармонической кривой приняли участие гармоники с периодами 3,6, 5,7 и 10,8 лет, причем вклад гармоник с периодом 5,7 лет составил 29 %.

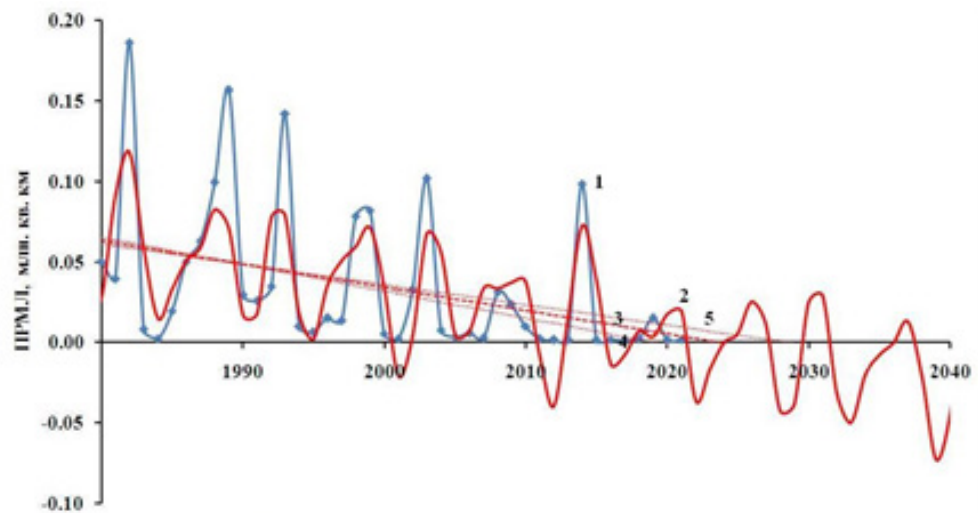


Рисунок 5 – Результаты экстраполяции сентябрьской площади морского льда Баренцева моря по данным NSIDC. 1 – фактические значения ПРМЛ, 2 – расчетные значения ПРМЛ (тренд плюс гармоники), 3 – линия основного тренда, 4 и 5 – линии максимального и минимального трендов.

Полученные результаты позволяют построить диаграмму полного очищения от льда в сентябре морей РА по данным ААНИИ и NSIDC (рис. 6). Из рис. 6 отчетливо видно, что полное очищение от льда по данным NSIDC происходит существенно позже, чем по данным ААНИИ, при этом значительно возрастает диапазон неопределенностей. Максимальное расхождение отмечается для Восточно-Сибирского моря. Впрочем, малый диапазон неопределенностей для ПРМЛ морей ААНИИ не означает более высокую точность прогностических оценок. Это связано с заметным искажением частотной структуры временных рядов после 2005 года. Однако уверенно можно утверждать, что все неопределенности оценок выхода на безледный режим невелики и существенно меньше неопределенностей, возникающих при прогнозе ПРМЛ с помощью климатических моделей.

Заключение

Предложен альтернативный климатическим моделям комбинированный статистический метод прогноза полного очищения от льда в сентябре морей РА. Его физической основой является предположение о стационарности (неизменности) климатических изменений в системе «океан-морской лед-атмосфера», т. е. сохранение их в будущем. Другими словами, все тенденции изменений климатических характеристик, про-

являющиеся в течение 1979–2021 гг., сохраняются на период прогнозирования, максимальная длина которого составляет менее двух десятков лет. В этом случае наиболее естественным является использование линейных трендов, особенно если они описывают значительную часть дисперсии временных рядов. Поскольку во временных рядах могут присутствовать циклические колебания, то дополнительно требуется их рассчитывать и учитывать значимые циклическости в прогнозировании. Такой подход был использован в данной работе по оценке сроков полного очищения от льда акватории морей РА в сентябре, когда площадь морского льда в сезонном ходе является минимальной.

Для 5 морей (Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) по данным архивов NSIDC и ААНИИ рассчитаны основные статистические характеристики сентябрьской площади морского льда за 43-летний период (1979–2021 гг.). Показано, что вклад линейных трендов в дисперсию годовых значений ПРМЛ значителен для всех морей, причем по мере продвижения с запада на восток он повышается и достигает максимума в Чукотском море. Для оценки устойчивости линейных трендов во времени последовательно рассчитывались тренды за предшествующий десятилетний период, т.е. начиная с 1979–2011 гг. и заканчивая 1979–2020 гг. Для каждого моря был получен набор из 10 трендов, из которого выбирались оценки максимального и минимального трендов.

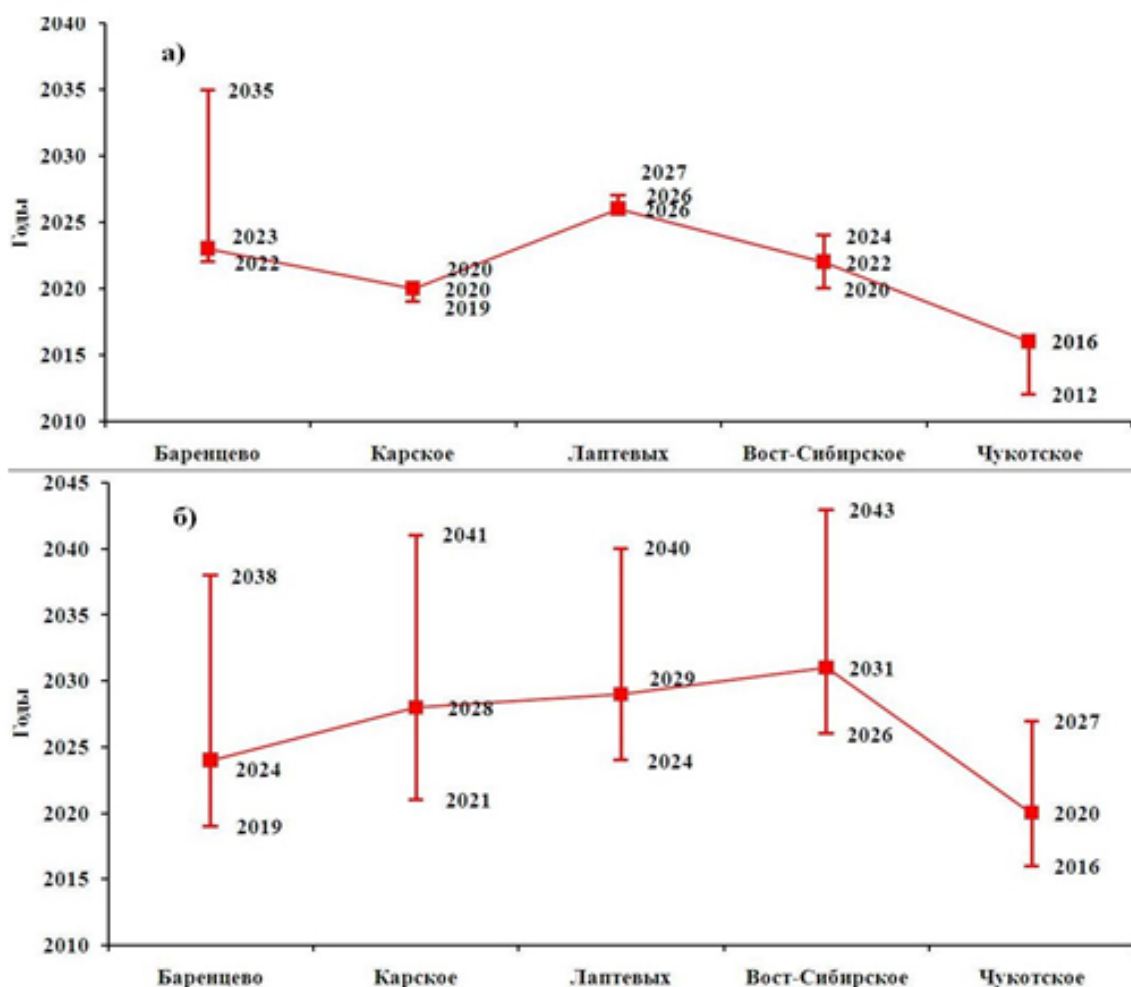


Рисунок 6 – Диаграмма сроков полного очищения от льда в сентябре морей Российской Арктики по данным ААНИИ (а) и NSIDC (б). Горизонтальные черточки – границы неопределенности, квадратики – оценки выхода на безледный режим по основному тренду.

Разность в годах выхода на безледный режим по этим трендам показывает область неопределенности прогностических оценок. По данным ААНИИ наибольшей она оказалась для Восточно- Сибирского моря (9 лет), наименьшей – для моря Лаптевых и Карского. По данным NSIDC даже минимальный разброс (Чукотское море, 11 лет) больше максимального по данным ААНИИ. Малый диапазон неопределенностей для ПРМЛ морей ААНИИ связан с особенностями частотной структуры их временных рядов и не означает более высокую точность прогностических оценок. Это связано с заметным искажением частотной структуры временных рядов после 2005 года. Однако все неопределенности оценок выхода на безледный режим невелики и существенно меньше неопределенностей, возникающих при прогнозе ПРМЛ на основе климатических моделей.

Самое раннее очищение от льда в сентябре по обоим архивам происходит в Чукотском море и связано с его малой площадью и непосредственным влиянием притока теплых вод из Тихого океана через Берингов пролив. С помощью гармонического анализа выявлены значимые цикличности для Баренцева и Восточно-Сибирского моря по данным ААНИИ и для всех 5 морей по данным NSIDC. Выявлено, что за диапазон неопределенностей по обоим архивам выходит суммарная гармоническая кривая для Баренцева моря, расхождение которой с пересечением по минимальному тренду достигает 7 лет.

По данным NSIDC показана отчетливая тенденция увеличения роли трендов в описании дисперсии временных рядов по направлению с запада на восток и обратная тенденция для суммарного вклада гармоник. При этом суммарный вклад гармоник в дисперсию ПРМЛ существенно меньше вклада трендов для всех морей, исключая Баренцево, где он достигает 59 %, в то время как на долю тренда приходится 17 %. Вклад случайных колебаний в дисперсию исходных рядов максимален в море Лаптевых (31 %) и минимален в Восточно-Сибирском море (16 %). Условно прогностические оценки ААНИИ можно назвать оптимистическими. Более реалистическими представляются оценки NSIDC. Однако какие из них оправдаются – покажет время, причем уже в ближайшие годы. Но в любом случае можно уверенно утверждать, что полярное усиление будет прогрессировать и соответственно температура воздуха в Арктике станет повышаться более быстрыми темпами, чем в настоящее время.

Список литературы:

1. Захаров В.Ф., Малинин В.Н. Морские льды и климат. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. 91 с.
2. Зворыкина Ю., Тетерятников К. Северный морской путь как инструмент развития Арктики // Российский экономический журнал. 2019. № 4. С. 21–44.
3. Липунов Н.С. Международное измерение Северного морского пути // Российская Арктика, 2021. №12. С.78–84.
4. Иванов В.В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 407–434. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407-434
5. 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.
6. 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.
7. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
 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. 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.
 10. Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophys. Research Letters, 2007. VOL. 34, L09501, doi:10.1029/2007GL029703
 11. Årthun M., Onarheim I. H., Dörr J., Eldevik T. The seasonal and regional transition to an ice — free Arctic // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48, e2020GL090825. doi: 10.1029/2020GL090825.
 12. Notz D., SMIP Community. Arctic sea ice in CMIP6 // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47, e2019GL086749. doi:10.1029/2019GL086749.
 13. Shu, Q., Wang, Q., Song, Z., Qiao, F., Zhao, J., Chu, M., & Li, X. (2020). Assessment of sea ice extent in CMIP6 with comparison to observations and CMIP5. Geophysical Research Letters, 47, e2020GL087965. <https://doi.org/10.1029/2020GL087965>.
 14. Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P. The Arctic Amplification Phenomenon and Its Driving Mechanisms. Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2020, 13, 3, 3–19. doi: 10.7868/S2073667320030016.
 15. 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.
 16. Малинин В.Н. Вайновский П.А. Когда наступит безледный режим регионов Арктики? // Ученые записки РГГМУ. 2019. №56, С. 98—109.
 17. Diebold, Francis X., Glenn D. Rudebusch. 2020. Probability Assessments of an Ice-Free Arctic: Comparing Statistical and Climate Model Projections, Federal Reserve Bank of San Francisco Working Paper 2020-02. <https://doi.org/10.24148/wp2020-02>
 18. Peng, G., J.L. Matthews, and J.T. Yu (2018), Sensitivity Analysis of Arctic Sea Ice Extent Trends and Statistical Projections Using Satellite Data // Remote Sens. 2018, 10, 230; doi:10.3390/rs10020230.
 19. Fetterer F., Knowles K., Meier W., Savoie M., Windnagel A.K. (2017), Sea Ice Index, Version 3, Dataset ID G02135," Boulder, Colorado, USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>, updated daily, accessed October 2019.
 20. Тихонов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Репина И. А., Комарова Н. Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов: Обзор // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 65–84.
 21. Заболотских Е.В. Обзор методов восстановления параметров ледяного покрова по данным спутниковых микроволновых радиометров // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 128–151.
 22. Meier W. N. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic peripheral seas // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2005. V. 43. № 6. P. 1324–1337.
 23. Agnew T., Howell S. The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data // Atmosphere-Ocean. 2003. V. 41. № 4. P. 317–331.
 24. 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.
 25. 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.
 26. Юлин А.В., Вязигина Н.А., Егорова Е.С. Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // Российская Арктика, 2020, №7, С.28-40.

27. Малинин В.Н., Вайновский П.А. Межгодовая изменчивость площади морского льда регионов Антарктики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 187–201.
28. Малинин В. Н., Вайновский П. А. К сравнению характеристик межгодовой изменчивости площади морского льда Северного и Южного полушарий // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 57. С. 77–90.
29. Информационные материалы по мониторингу морского ледяного покрова Арктики и Южного Океана // Бюллетень ААНИИ. № 47(532).СПб, 2021. 42 p.: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0042/>
30. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации // СПб, РГГМУ, 2008, 408 с.
31. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 3–11.
32. Serreze, M.C., Crawford A.D., Stroeve J.C., Barrett A.P., Woodgate R.A. (2016), Variability, trends, and predictability of seasonal sea ice retreat and advance in the Chukchi Sea, J. Geophys. Res. Oceans, 121, doi:10.1002/2016JC011977.

References:

1. Zakharov V.F., Malinin V.N. Morskiye l'dy i klimat. [Sea ice and climate]. St. Petersburg.: Gidrometeoizdat, 2000, 91 p. (In Russian).
2. Zvorykina Yu., Teteryatnikov K. Severnyy morskoy put' kak instrument razvitiya Arktiki [The Northern Sea Route as a Tool for the Development of the Arctic] Rossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal. [Russian Economic Journal]. 2019, No. 4, pp. 21–44. (In Russian).
3. Lipunov N.S. Mezhdunarodnoye izmereniye Severnogo morskogo puti [International dimension of the Northern Sea Route] Rossiyskaya Arktika. [Russian Arctic]. 2021, №12, pp. 78–84. (In Russian).
4. Ivanov V.V. Sovremennyye izmeneniya gidrometeorologicheskikh usloviy v Severnom Ledovitom okeane, svyazannyye s sokrashcheniyem morskogo ledyanogo pokrova [Modern changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with the reduction of sea ice cover] Gidrometeorologiya i ekologiya. [Hydrometeorology and ecology]. 2021, No. 64, pp. 407–434. (In Russian).
5. 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.
6. 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.
7. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
8. Semenov V.A., Martin T., Berens L.K., Latif M., Astafieva E.S. Izmeneniya ploschadi arkticheskikh morskikh l'dov v ansamblyakh klimaticheskikh modeley CMIP3 i CMIP5 [Changes in the area of Arctic sea ice in the ensembles of climate models CMIP3 and CMIP5] Led i Sneg. [Ice and Snow]. 2017, T. 57, No. 1, pp. 77–107. (In Russian).
9. 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.
10. Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophys. Research Letters, 2007. VOL. 34, L09501, doi: 10.1029/2007GL029703
11. Årthun M., Onarheim I. H., Dörr J., Eldevik T. The seasonal and regional transition to an ice — free Arctic // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48, e2020GL090825. doi: 10.1029/2020GL090825.
12. Notz D., SMIP Community. Arctic sea ice in CMIP6 // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47, e2019GL086749. doi:10.1029/2019GL086749.

13. Shu, Q., Wang, Q., Song, Z., Qiao, F., Zhao, J., Chu, M., & Li, X. (2020). Assessment of sea ice extent in CMIP6 with comparison to observations and CMIP5. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087965. <https://doi.org/10.1029/2020GL087965>.
14. Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P. The Arctic Amplification Phenomenon and Its Driving Mechanisms. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 3, 3–19. doi: 10.7868/S2073667320030016.
15. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glock N.I., Ivanov N.E., Smolyanitskiy V.M., Harlanenkova N.E., Yulin A.V. Evolyutsiya ploshchadi morskogo pokrova Arktiki v usloviyakh sovremennykh izmeneniy klimata [Evolution of the Arctic sea cover area under the conditions of modern climate changes] *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. [Earth research from space]. 2015, No. 2, pp. 5-19. (In Russian).
16. Malinin V.N., Vainovsky P.A. Kogda nastupit bezlednyy rezhim regionov Arktiki? [When will the ice-free regime of the Arctic regions come?] *Uchenyye zapiski RGGMU*. [Scientific notes of the RSHU]. 2019, No. 56, pp. 98-109. (In Russian).
17. Diebold, Francis X., Glenn D. Rudebusch. 2020. Probability Assessments of an Ice-Free Arctic: Comparing Statistical and Climate Model Projections, Federal Reserve Bank of San Francisco Working Paper 2020-02. <https://doi.org/10.24148/wp2020-02>
18. Peng, G., J.L. Matthews, and J.T. Yu (2018), Sensitivity Analysis of Arctic Sea Ice Extent Trends and Statistical Projections Using Satellite Data // *Remote Sens*. 2018, 10, 230; doi:10.3390/rs10020230.
19. Fetterer F., Knowles K., Meier W., Savoie M., Windnagel A.K. (2017), Sea Ice Index, Version 3, Dataset ID G02135," Boulder, Colorado, USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>, updated daily, accessed October 2019.
20. Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarsky D.A., Repina I.A., Komarova N.Yu. Sputnikovaya mikrovolnovaya radiometriya morskogo l'da polyarnykh regionov: Obzor [Satellite microwave radiometry of sea ice in polar regions: Review] *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. [Earth Research from Space]. 2016, No. 4, pp. 65–84. (In Russian).
21. Zabolotskikh E.V. Obzor metodov vosstanovleniya parametrov ledyanogo pokrova po dannym sputnikovoykh mikrovolnovykh radiometrov [Review of methods for reconstructing the parameters of the ice cover from the data of satellite microwave radiometers]. *Izvestiya RAN. Physics of the atmosphere and ocean*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 128–151. (In Russian).
22. Meier W. N. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic peripheral seas // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 2005. V. 43. № 6. P. 1324–1337.
23. Agnew T., Howell S. The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data // *Atmosphere-Ocean*. 2003. V. 41. № 4. P. 317–331.
24. Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Arkticheskiy ledyanoy pokrov stanovitsya sezonnyy? [Is Arctic ice cover becoming seasonal?] *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. [Research of the Earth from space]. 2013, No. 4, pp. 50-65. (In Russian).
25. Shalina E.V., Bobylev L.P. Izmeneniye ledovykh usloviy v Arktike soglasno sputnikovym nablyudeniyam [Changes in ice conditions in the Arctic according to satellite observations] *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]. 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 28-41. (In Russian).
26. Yulin A.V., Vyazigina N.A., Egorova E.S. Mezhhodovaya i sezonnaya izmenchivost' ploshchadi l'dov v Severnom Ledovitom okeane po dannym sputnikovoykh nablyudeniya [Interannual and seasonal variability of the ice area in the Arctic Ocean according to satellite observations] *Rossiyskaya Arktika*. [Russian Arctic]. 2020, No. 7, pp. 28-40. (In Russian).
27. Malinin V.N., Vainovsky P.A. Mezhhodovaya izmenchivost' ploshchadi morskogo l'da regionov Antarktiki [Interannual variability of sea ice area in Antarctic regions] *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]. 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 187–201. (In Russian).
28. Malinin V.N., Vainovskiy P.A. K sravneniyu kharakteristik mezhhodovoy izmenchivosti ploshchadi morskogo l'da Severnogo i Yuzhnogo polushariy [To the comparison of characteristics of interannual variability of the sea ice area of the Northern and Southern hemispheres] *Uchenyye zapiski RGGMU*. [Uchenyye zapiski RGGMU]. 2019, No. 57, pp. 77–90. (In Russian).
29. Informatsionnyye materialy po monitoringu morskogo ledyanogo pokrova Arktiki i Yuzhnogo Okeana [Information materials on monitoring the sea ice cover of the Arctic

- and Southern Ocean]. Bulletin of the AARI. No. 47 (532), St. Petersburg, 2021, 42 p.: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0042/> (In Russian).
30. Malinin V.N. Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii [Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information] St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University, 2008, 408 p. (In Russian).
 31. Malinin V.N., Gordeeva S.M. Izmenchivost' vlagosoderzhaniya atmosfery nad okeanom po sputnikovym dannym [Variability of the moisture content of the atmosphere over the ocean according to satellite data] Issledovaniye Zemli iz kosmosa. [Earth Research from Space]. 2015, No.1, pp. 3–11. (In Russian).
 32. Serreze, M.C., Crawford A.D., Stroeve J.C., Barrett A.P., Woodgate R.A. (2016), Variability, trends, and predictability of seasonal sea ice retreat and advance in the Chukchi Sea, J. Geophys. Res. Oceans, 121, doi:10.1002/2016JC011977.