

К СРАВНЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПЛОЩАДИ МОРСКОГО ЛЬДА СЕВЕРНОГО И ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ

В.Н. Малинин¹, П.А. Вайновский²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru

² ООО «Прогноз»

Представлены результаты сравнительного анализа характеристик межгодовой изменчивости, в том числе трендов площади распространения морского льда (ПРМЛ) в Северном и Южном полушарии за период 1979—2017 гг. по спутниковым данным. Отмечаются принципиальные отличия в «поведении» трендов. Если в Арктике в течение всего рассматриваемого периода происходило постоянное уменьшение ледовитости, то в Антарктике до 2014 г. наблюдалось увеличение площади морского льда, а затем началась его стремительная деградация. За три года (2015—2017 гг.) она уменьшилась на 2 млн км², что превышает уменьшение площади морского льда в Северном полушарии за 40 лет на 0,1 млн км². Причины как увеличения площади морского льда, так и его стремительной деградации весьма неопределенны и носят дискуссионный характер. Показано усиление межгодовой изменчивости ПРМЛ, которое является следствием общего повышения изменчивости климата. Частотная структура временных рядов ПРМЛ в Северном и Южном полушарии после исключения тренда соответствует модели случайного стационарного процесса в виде «белого шума». Поскольку на «белый шум» приходится порядка 90 % дисперсии временных рядов ПРМЛ в Южном полушарии, это является причиной неудовлетворительного описания морского льда математическими моделями.

Ключевые слова: морской лед, климат, Арктика, Антарктика, тренд, межгодовая изменчивость.

COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF THE ANNUAL VARIABILITY OF THE AREA OF SEA ICE OF THE NORTH AND SOUTH

V.N. Malinin¹, P.A. Vainovskii²

¹ Russian State Hydrometeorological University

² LLC "Prognoz"

The results of comparative analysis of the characteristics of interannual variability, including trends in sea ice extent area (SIEA) of the Northern and Southern Hemispheres for 1979—2017 period are presented according to the satellite data. Fundamental differences in the "behavior" of trends have been noted. While there was a constant decrease in ice cover in the Arctic throughout the period under consideration, in the Antarctic there was an increase in the area of sea ice cover until 2014, which was followed by its rapid reduction. During 3 years (2015-2017), it decreased by 2 million square km, which exceeds the decrease in sea ice in the Northern Hemisphere by 0.1 million square km during 40 years. The causes for both the increase in the sea ice area and its rapid reduction are plagued by uncertainty and are debatable in nature. The intensification of interannual variability of SIEA, which is a consequence of a general increase in climate variability, is shown. The trend being excluded, the frequency structure of the time series of the PRML of the northern and southern hemispheres corresponds to the model of a random stationary process in the form of "white noise". Since the "white noise" accounts for about 90% of the variance of the time series of the SIEA of the southern hemisphere, this is the reason for the unsatisfactory description of sea ice by mathematical models.

Keywords: sea ice, climate, Arctic, Antarctic, trends, annual variability.

Введение

В современных условиях температура воздуха, теплосодержание океана, испарение, влагосодержание атмосферы, ледовитость полярных районов, изменения альbedo, уровень Мирового океана изменяются согласованно, причем изменения одного из этих компонентов через обратные связи в системе океан — атмосфера вызывают изменения других. Поэтому формирование глобального потепления обусловлено, прежде всего, процессами крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей, причем положительные связи преобладают [6]. Естественно, глобальное потепление непосредственно сказывается на состоянии ледяного покрова в полярных областях Земли, который представляет собой наиболее чувствительный компонент глобальной климатической системы.

На рис. 1 приводится межгодовой ход аномалий средней годовой температуры воздуха (ТВ) для Северной (90—64° с.ш.) и Южной (90—64° ю.ш.) полярной области за период 1978—2018 гг. по данным архива реанализа http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v3/GLB.Ts+dSST.txt. Как видно из рис. 1, процесс потепления наблюдается одновременно и в Северной, и в Южной полярной области. Правда, темпы его существенно различаются. За 40 лет ТВ в Северной полярной области (СПО) повысилась на 2,6 °С, в то время как в Южной полярной области (ЮПО) — на 0,5 °С, т. е. в СПО температура воздуха повышается в пять раз быстрее. Средняя глобальная ТВ за это же время повысилась на 0,7 °С, что лишь немного больше повышения ТВ в ЮПО. Несмотря на столь значительное повышение ТВ в СПО, коэффициент тренда (0,067 °С/год) практически не выше коэффициента тренда первого потепления за 1920—1940 гг. (0,065 °С/год) [8].

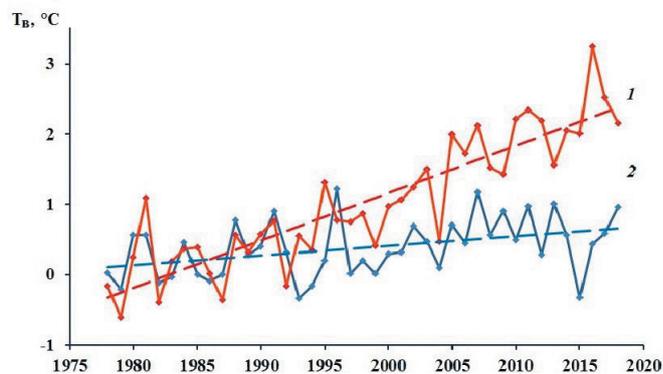


Рис. 1. Межгодовой ход аномалий средней годовой температуры воздуха (ТВ) для Северной (1) и Южной (2) полярной области за период 1978—2018 гг. по данным http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v3/GLB.Ts+dSST.txt.

Fig. 1. The interannual variations in the anomalies of mean annual air temperature (TB) for the Northern (1) and Southern (2) polar regions for the period 1978—2018 according http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v3/GLB.Ts+dSST.txt.

Причины значительно более слабого повышения ТВ в Антарктике по сравнению с Арктикой связаны с мощным охлаждающим воздействием материка, существованием сильного антарктического полярного фронта, который служит барьером для проникновения теплых вод с севера на юг, значительным ростом числа откалывающихся от ледников айсбергов и донным (подводным) таянием шельфовых ледников.

Столь быстрое повышение ТВ в СПО вызывает резкое сокращение площади арктического морского льда. Коэффициент детерминации линейной модели представленных на рис. 1 значений ТВ со среднегодовой площадью распространения морского льда (ПРМЛ) составляет 0,71. Совершенно иная ситуация отмечается в Южной полярной области. При потеплении климата одновременно происходит некоторое повышение ПРМЛ. Однако четко выраженной связи между ними нет, коэффициент детерминации всего 0,12.

В настоящее время оценки межгодовой изменчивости площади морских льдов для полярных регионов за различные периоды времени носят массовый характер и представлены во многих десятках публикаций. При этом особенно большое значение придается анализу линейных трендов, оценки которых считаются одной из важных характеристик изменений климата. При этом для анализа используется коэффициент линейного тренда α_1 , который зависит от площади морского льда. Поскольку площадь сильно варьирует не только для разных регионов, но в сезонном ходе даже для одного и того же региона, то количественное сравнение трендов ледовитости практически невозможно. Цель работы состоит в сравнительном анализе характеристик межгодовой изменчивости площади морского льда в Северном и Южном полушарии, в том числе линейных трендов, и выявлении особенностей их частотной структуры.

Исходные материалы

В настоящее время дистанционные методы измерений считаются главным источником информации по морскому льду в полярных регионах. При этом наибольшее распространение получили данные спутниковой микроволновой радиометрии. Измерения в микроволновом диапазоне по сравнению с видимым и инфракрасным диапазонами спектра обладают тем важным преимуществом, что позволяют исследовать распределение морского льда полярных регионов при наличии облачности и любой освещенности, в том числе в течение полярной ночи. Содержательные обзоры источников погрешностей в работе алгоритмов и развития методов восстановления параметров ледяного покрова по данным спутниковых микроволновых радиометров представлены в работах [3, 11, 23].

В настоящей работе для оценки площади морского льда в Антарктике применялся продукт NASA, использующий алгоритм NASA Team (NT), достоинства и недостатки которого, включая возможные ошибки, достаточно хорошо известны ([2, 3, 12, 20, 25, 27] и др.). Детальное сравнение NT алгоритма с данными оперативных ледовых карт, выполненное авторами работы [15], показало значительное расхождение (до 44 %) в оценках сплоченности морского льда в летнее время.

Зимние погрешности при оценке сплоченности сплошных льдов составили примерно 10 %.

В работе [24] сплоченность ледяного покрова, определенная с помощью алгоритма NASA Team, сравнивалась с данными наблюдений, полученными в ходе трех экспедиций в море Росса в Южном океане. Полученные результаты свидетельствуют о том, что алгоритм переоценивает сплоченность в редких льдах (1—3 балла), показывает большие ошибки (как положительные, так и отрицательные) в разреженных льдах (4—6 баллов) и недооценивает общую сплоченность в сплоченных (7—8 баллов), очень сплоченных и сплошных льдах (9—10, 10 баллов).

Однако, несмотря на наличие заметных погрешностей, именно пассивная спутниковая радиометрия позволяет получать самые точные и достоверные по сравнению с другими климатическими характеристиками оценки изменчивости и статистических трендов параметров ледяного покрова [10]. Общедоступность непрерывно пополняемых спутниковых данных делает их важным источником информации об изменениях в состоянии морского льда [4, 14], получившим широкое распространение в исследованиях климата полярных регионов.

Основными параметрами, получаемыми со спутников, являются площадь морского льда (ПМЛ) и площадь распространения (протяженность) морского льда (ПРМЛ). ПМЛ представляет собой интегральную площадь океана, покрытую морскими льдами, а ПРМЛ — это площадь внутри границы 15 %-ной сплоченности (концентрации) морских льдов [10]. Величину ПРМЛ, отнесенную к общей рассматриваемой площади (моря, региона, океана) и выраженную в процентах, называют ледовитостью. Суточные и среднемесячные данные о ПМЛ (sea ice area) и ПРМЛ (sea ice extent) с октября 1978 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте NASA <https://neptune.gsfc.nasa.gov/csb/index.php?section=59> для девяти различных районов Северного полушария и пяти секторов Южного полушария. В настоящей работе использовались оценки максимальной (март) и минимальной (сентябрь) ПРМЛ за период 1979—2017 гг. для ПМРЛ Северного и Южного полушария.

Оценки межгодовой изменчивости ПМРЛ

Как известно, для ПМРЛ характерен ярко выраженный годовой ход, амплитуда которого обычно существенно превышает ее среднегодовые значения. При этом максимум ПРМЛ в Арктике практически везде отмечается в марте, минимум — в сентябре, а в Антарктике, наоборот, максимум — в сентябре, минимум — в феврале — марте ([19, 29, 31, 32] и др.). Внутригодовая амплитуда колебаний ПРМЛ в Южном полушарии (ЮП) по сравнению с Северным полушарием (СП) почти в два раза выше, хотя полученные средние многолетние годовые значения ПМРЛ почти совпадают (табл. 1).

Отметим, что в табл. 1 в качестве амплитуды для земного шара принята разность значений за ноябрь и февраль. Из таблицы видно, что изменчивость ледовитости в марте и сентябре существенно различается. Так, межгодовая изменчивость

максимальных значений ПРМЛ значительно меньше, чем минимальных. Максимальные коэффициенты вариации отмечаются в сентябре в СП, что, очевидно, связано с резким уменьшением ледовитости. В среднем за год изменчивость ПРМЛ в Арктическом бассейне очень мала и полностью отсутствует в марте, так как к концу зимы он практически полностью покрыт морским льдом.

Таблица 1

Первичные статистические характеристики ПРМЛ (среднее $X_{\text{ср}}$, коэффициент вариации C) в Северном и Южном полушарии за 1979—2017 гг. ($10^6 \text{ км}^2/\text{год}$)

Primary statistical characteristics of sea ice extent area (mean $X_{\text{ср}}$, coefficient of variation C) of the Northern and Southern hemispheres for 1979—2017 in $10^6 \text{ km}^2 / \text{year}$

	Сентябрь		Март		Год		Амплитуда
	$X_{\text{ср}}$	C	$X_{\text{ср}}$	C	$X_{\text{ср}}$	C	
Северное полушарие	6,20	0,18	15,10	0,03	11,45	0,06	8,90
Южное полушарие	18,54	0,02	4,04	0,13	11,62	0,03	14,50
Земной шар	24,7	0,04	19,18	0,04	23,08	0,03	5,52

Анализ межгодовой изменчивости ПРМЛ для отдельных месяцев показал, что проявляется четко выраженный годовой ход. Минимальная изменчивость ПРМЛ отмечается в конце зимы, когда ПРМЛ достигает максимальных значений, а максимальная межгодовая изменчивость — в конце теплого периода для минимальных значений ПРМЛ. Другой важной особенностью межгодовой изменчивости ПРМЛ является увеличение амплитуды колебаний во времени. На рис. 2 *a* приводится распределение значений коэффициента вариации для сентябрьских значений ПРМЛ СП и мартовских значений ПРМЛ ЮП. Первое значение C

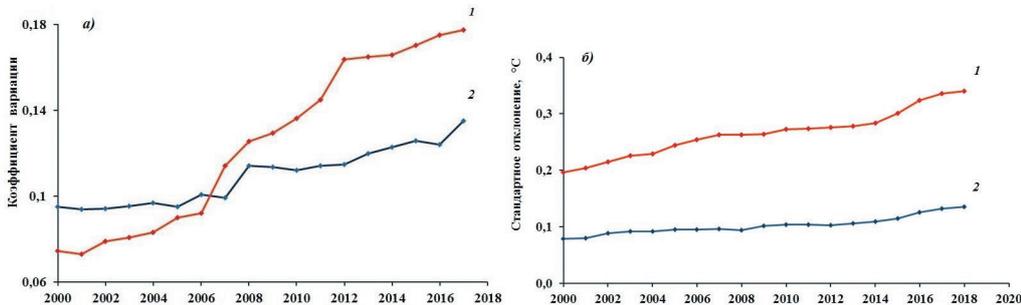


Рис. 2. Распределение коэффициента вариации для сентябрьских значений ПРМЛ СП (1) и мартовских значений ПРМЛ ЮП (2) начиная с периода 1979—2000 гг. до 1979—2017 гг. (а) и стандартных отклонений среднегодовых значений температуры воздуха для СП (1) и ЮП (2) начиная с периода 1979—2000 гг. до 1979—2018 гг. (б).

Fig. 2. Distribution of variation coefficients for the September values of sea ice extent area of NH (1) and the March values of sea ice extent area of SH (2) from 1979—2000 until 1979—2017 (a) and distribution of standard deviations of average annual air temperatures for the northern (1) and southern (2) hemispheres from 1979—2000 until 1979—2018 (b).

соответствует промежутку 1979—2000 гг., последнее — 1979—2017 гг. Нетрудно видеть практически монотонное повышение значений коэффициента вариации, причем в СП он увеличился более чем в два раза и составил 0,10 %. В ЮП коэффициент вариации возрос на 0,04 %.

Естественно, возникает вопрос о причинах увеличения межгодовой изменчивости ПРМЛ. По мнению авторов, в условиях глобального потепления происходит разбалансировка климатической системы, сопровождающаяся быстрым увеличением повторяемости опасных гидрометеорологических явлений [6]. Со статистической точки зрения это означает возрастание дисперсии межгодовых колебаний характеристик климата. На рис. 2 б приводится распределение стандартного отклонения среднегодовых значений температуры воздуха для Северного и Южного полушария. Для обоих полушарий фиксируется увеличение межгодовой изменчивости температуры воздуха, причем темпы его в СП существенно выше. В СП возрастание σ составляет 0,14 °С, в ЮП — 0,06 °С. Очевидно, увеличение изменчивости ПРМЛ в обоих полушариях является следствием общего увеличения изменчивости климата.

На рис. 3 представлен межгодовой ход годовых значений ПРМЛ для СП и ЮП за период 1979—2017 гг. Нетрудно видеть, что в 1980-е годы ледовитость СП была существенно выше ледовитости ЮП. В середине 1990-х оценки ПРМЛ сравнялись, а в текущем столетии ледовитость в ЮП стала уже заметно больше, чем в СП. Такой характер межгодовых изменений ледовитости вызван значительным отрицательным трендом в ПРМЛ СП и более слабым положительным трендом в ПРМЛ ЮП, поскольку первый больше второго практически в пять раз.

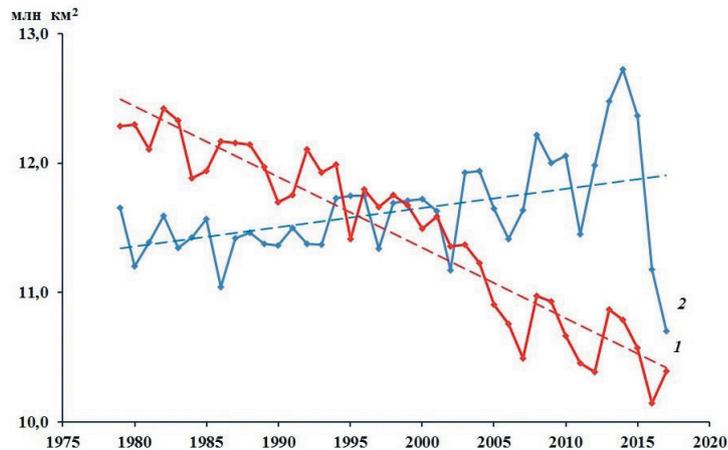


Рис. 3. Межгодовой ход годовых значений площади распространения морского льда (млн км²) для Северного (1) и Южного (2) полушария по спутниковым данным за период 1979—2017 гг.

Fig. 3. The interannual variation in annual values of the sea ice extent area for the northern (1) and southern (2) hemispheres according to satellite data for the period 1979—2017 in million square meters km.

Коэффициент детерминации ПРМЛ СП (R^2) больше аналогичного коэффициента детерминации ПРМЛ СП также в пять раз, что в значительной степени обусловлено усилением колебаний ПРМЛ в 21-м столетии. Корреляция между этими временными рядами как при наличии тренда, так и при его отсутствии незначима.

Обращает на себя внимание беспрецедентный спад ледовитости в ЮП начиная с 2014 г. Если в 2014 г. она была максимально высокой (12,72 млн км²), то уже в 2017 г. ПРМЛ составила 10,70 млн км², т. е. за три года уменьшилась на 2,02 млн км², или почти на 16 %. Для сравнения укажем, что в СП за 40 лет ПРМЛ уменьшилась на 1,89 млн км². Очень неравномерно процесс деградации морского льда в ЮП протекал в течение года. Минимальная ледовитость (в марте) в ЮП сократилась почти на 45 %, а максимальная ледовитость — лишь на 9 %. Примечательно, что в 2018 г. годовая ледовитость в ЮП составила 10,8 млн км², т. е. была очень близка к значению за 2017 г.

Причины деградации ледяного покрова в ЮП пока не выявлены. Так, Паркинсон [28] указывает, что в пяти исследованиях высказано пять отличающихся друг от друга предположений относительно уменьшения ПРМЛ в основном атмосферного происхождения. Однако понятно, что это не могло произойти без активного участия океана. Несомненно, столь грандиозное уменьшение ПРМЛ является следствием синхронизации действующего в одну сторону целого комплекса взаимосвязанных между собой гидрометеорологических процессов. При этом открытым остается принципиальный момент: изменения в период 2015—2018 гг. — это новая тенденция развития ледовых условий в Антарктике или далее последует восстановление увеличения ледовитости?

До настоящего времени нет общепризнанной точки зрения на причины роста площади морского льда в Антарктике до 2014 г. Известный ученый в области морского льда Паркинсон вообще утверждает, что «увеличение площади морского льда в Антарктике до сих пор остается загадкой» [28]. Отметим достаточно квалифицированный обзор на тему возможных причин роста ПРМЛ в работе [1]. Если для Арктики климатические модели в рамках проекта CMIP5 позволяют получить сравнительно разумные оценки изменчивости ПРМЛ и даже используются для его прогноза на длительную перспективу, то для Антарктики модели CMIP5 показывают лишь то, что площадь морского льда будет уменьшаться в ответ на увеличение содержания парниковых газов ([30, 33] и др.). Суровые природные условия материка, отсутствие постоянного населения и как следствие практически полное отсутствие стационарных гидрометеорологических наблюдений на побережье и тем более в прибрежных водах являются серьезным препятствием на пути физического осмысления процессов в системе океан — лед — атмосфера и соответственно их качественного описания в климатических моделях. Поэтому взгляды исследователей на один и тот же факт могут значительно расходиться. Как было указано выше, уже высказано пять различных предположений относительно уменьшения ПРМЛ в 2015—2017 гг. Вероятно, этот список не является окончательным. По сути, сплоченность морского льда — это единственный параметр климатической системы Антарктики, надежно определяемый с помощью дистанционного зондирования со спутников. Отсутствие натурных данных заставляет нас также рассуждать в основном лишь в рамках предположений.

Понятно, что ряд факторов, которые могут работать на увеличение ПРМЛ, либо плохо описываются, либо вообще не учитываются в климатических моделях. К таким факторам относятся неравномерное в пространстве распределение верхнего слоя прибрежных вод и хаотическое формирование новых полыней. Заметную роль в повышении распределения играют рост числа откалывающихся айсбергов [5], усиление придонного таяния шельфовых ледников [18, 22] и рост повторяемости твердых осадков [21, 26]. В результате действия этих факторов создаются благоприятные условия усиления термохалинной стратификации, уменьшения вертикального океанического переноса тепла к поверхности, что способствует формированию морского льда. Кроме того, дополнительная роль айсбергов состоит в том, что они непосредственно увеличивают площадь ледяного покрова.

Альтернативная точка зрения на увеличение ПРМЛ представлена в работе [1]. В этой работе выполнен расчет широтного положения Антарктического полярного фронта (АПФ) за период 1979—2016 гг., который определялся по максимальному меридиональному градиенту ТПО на различной долготе в полосе 50—70° ю.ш. Этот фронт можно рассматривать как «границу распространения поверхностной распределенной водной массы на север и соответственно возможного распространения морского льда». Авторами [1] выявлена значимая отрицательная корреляция ($r = -0,70$) между АПФ и ПРМЛ в сентябре, т. е. с увеличением площади морского льда АПФ сдвигается к северу. Кроме того, показано наличие значимой положительной корреляции между аномалиями ТПО Северной Атлантики в области 5—25° с.ш., 60—20° з.д. с аномалиями положения АПФ и отрицательной корреляции с аномалиями ПРМЛ в сентябре с запаздыванием их на 2 года. Авторами [1] высказано предположение о том, что это связано с увеличением переноса теплой воды из СП в результате усиления конвекции во внутритропической зоне конвергенции атмосфере и интенсификации ячейки Хедли к югу от экватора. Однако если можно допустить влияние сравнительно небольшой области Северной Атлантики на формирование АПФ в атлантическом секторе, то вряд ли это возможно в индийском и тихоокеанском секторах Южного океана.

По мнению авторов, принципиальным моментом является выявление причинно-следственной связи между АПФ и ПРМЛ. Для этого необходимо определить изменчивость и наличие трендов ТПО на северной и южной границах АПФ. Если изменчивость АПФ обусловлена в основном изменчивостью ТПО на его южной границе, то именно от ПРМЛ зависит положение АПФ, если же изменчивостью ТПО на северной границе, то положение АПФ является важным фактором изменений ПРМЛ. В этом случае причины межгодовой изменчивости ПРМЛ могут в значительной степени определяться процессами севернее АПФ.

Для анализа линейных трендов будем использовать индекс тренда, который представляет собой отношение размаха тренда ($a_1 n$) к его среднему значению (X_{cp}) и выражается в условных единицах [9]:

$$I_{тр} = 100 a_1 n / X_{cp},$$

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. В табл. 2 приводятся статистические оценки трендов ледовитости для марта, сентября и в среднем за год для регионов Северного и Южного полушария за 1979—2017 гг.

Таблица 2

Характеристики линейного тренда ПРМЛ (a_1 , 10^5 км²/год)
для различных регионов Северного и Южного полушария за период 1979—2017 гг.
Characteristics of the linear sea ice extent area trend (10^5 км² / year)
for various regions of the Northern and Southern hemispheres of for the period 1979—2017

Водная поверхность	Сентябрь			Март			Год		
	R^2	a_1	Индекс тренда	R^2	a_1	Индекс тренда	R^2	a_1	Индекс тренда
Северное полушарие	0,77	-0,845	-51,8	0,75	-0,386	-10,0	0,88	-0,540	-18,33
Южное полушарие	0,13	0,007	0,15	0,10	0,142	13,6	0,18	0,147	4,9
Земной шар	0,61	-0,710	-11,91	0,15	-0,24	-4,9	0,49	-0,391	-6,8

Примечание. Значимые тренды выделены полужирным шрифтом.

Из табл. 2 видно огромное превышение коэффициентов тренда a_1 в СП над a_1 в ЮП. Однако для индекса тренда подобной закономерности не отмечается, а в марте он в ЮП больше, чем в СП. Поскольку к концу зимы морской лед более устойчив к изменениям, чем в конце лета, то зимние оценки индекса тренда значительно меньше, чем летние. В среднем за год сокращение ледяного покрова в СП происходит в 2,7 раза быстрее, чем в целом на земном шаре, и в 3,7 раза быстрее, чем его рост в ЮП. Другой важный результат состоит в том, что в СП линейным трендом описывается не менее 75 % дисперсии временных рядов ПРМЛ, в то время как в ЮП — только чуть более 10 %.

Анализ частотной структуры межгодовой изменчивости ПРМЛ после исключения линейных трендов показал, что для временных рядов, представленных в табл. 2, значимые гармоники отсутствуют, т. е. межгодовые колебания ледовитости носят случайный характер. Подтверждением этого является распределение частных автокорреляционных функций для ПРМЛ СП в сентябре и ПРМЛ ЮП в марте (рис. 4). Нетрудно видеть, что все оценки частных коэффициентов автокорреляции не выходят за пределы доверительных интервалов при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Как известно, для случайного стационарного процесса, развивающегося по типу модели «белый шум», принимается условие, что коэффициенты частной автокорреляции являются незначимыми на всех сдвигах, исключая нулевой. Впрочем, в отдельных регионах СП и ЮП временные ряды ПРМЛ могут иметь значимые гармоники [7, 13]. Однако, поскольку их периоды и фазы, как правило, не совпадают, при осреднении ПРМЛ по акватории СП и ЮП они нивелируются (сглаживаются), вследствие чего их временные ряды начинают соответствовать модели «белый шум». По сути это означает, что в рассматриваемом временном

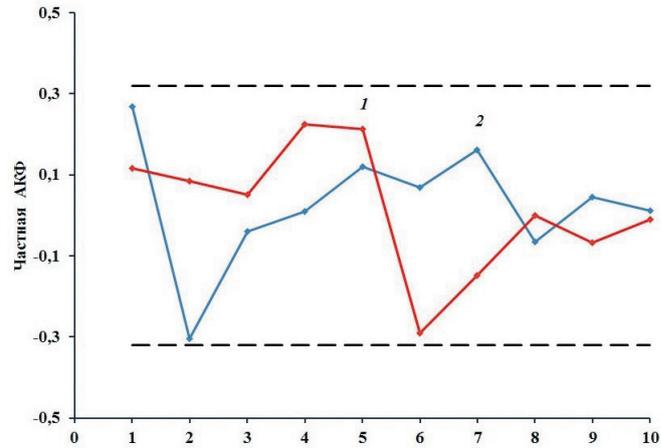


Рис. 4. Распределение частных автокорреляционных функций для ПРМЛ СП в сентябре (1) и ПРМЛ ЮП в марте (2) для временного сдвига $\tau = 10$ лет.

Горизонтальные линии — доверительные интервалы при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Fig. 4. Distribution of partial autocorrelation functions for september sea ice extent area NH (1) and march sea ice extent area SH (2) for a time lag of $\tau = 10$ years.

Horizontal lines — confidence intervals with significance level $\alpha = 0,05$.

диапазоне нет внешних сил, которые бы влияли на морской лед одновременно на всей акватории Северного и Южного полушария.

Полученные результаты проливают свет на то, почему математические модели не могут корректно описать изменчивость морского льда в ЮП. Из табл. 2 видно, что на «белый шум» в марте приходится 90 % дисперсии ПРМЛ ЮП и лишь немногим меньше в октябре. Лучше ситуация в СП, где белый шум описывает менее 25 % дисперсии временных рядов ПРМЛ. Вероятно, поэтому точность описания морского льда в Арктике моделями общей циркуляции атмосферы и океана, особенно в рамках проекта CMIP5, оказывается довольно высокой [10].

Заключение

В статье представлены результаты сравнительного анализа характеристик межгодовой изменчивости максимального, минимального и среднегодового значений ПРМЛ в Северном и Южном полушарии за период 1979—2017 гг.

Показано, что отрицательный тренд ПРМЛ СП больше положительного тренда ПРМЛ ЮП в пять раз. Корреляция между этими временными рядами как при наличии тренда, так и при его отсутствии незначима. Однако если деградация ледяного покрова в Арктике в значительной степени обусловлена глобальным повышением температуры воздуха, то увеличение ПРМЛ в Южном океане до 2014 г. «часто представляется удивительным и загадкой для науки о глобальном изменении климата» [16].

Загадкой является и стремительная деградация ледяного покрова в ЮП в период 2015—2017 гг. За 3 года ледовитость там уменьшилась на 2 млн км², в то время как уменьшение ПРМЛ в СП за 40 лет составило 1,9 млн км². Уже высказано пять отличающихся друг от друга возможных причин уменьшения ПРМЛ в основном атмосферного происхождения. По мнению авторов, деградация морского льда является следствием синхронизации целого комплекса взаимосвязанных между собой процессов в системе океан — лед — атмосфера, действующих в одну сторону, а именно в сторону уменьшения ПРМЛ. Открытым остается принципиальный момент: изменения, которые произошли в период 2015—2018 гг., — это новая тенденция развития ледовых условий в Антарктике или далее последует восстановление тенденции увеличения ледовитости?

Показано, что важной особенностью межгодовой изменчивости ПРМЛ является увеличение амплитуды колебаний во времени, которое наиболее ярко проявляется для минимальных значений ледовитости. Так, коэффициент вариации ПРМЛ СП в октябре за период с 2000 по 2017 г. возрос более чем в два раза. Очевидно, что повышение изменчивости ПРМЛ в обоих полушариях является следствием общего повышения изменчивости климата.

Анализ частотной структуры межгодовой изменчивости ПРМЛ после исключения линейных трендов показал, что для рассматриваемых временных рядов значимые гармоники отсутствуют, т. е. межгодовые колебания ледовитости носят случайный характер. Это подтверждается тем, что коэффициенты частной автокорреляции являются незначимыми на всех сдвигах, исключая нулевой. Вследствие этого временные ряды ПРМЛ для СП и ЮП начинают соответствовать модели «белый шум». Поскольку на «белый шум» приходится порядка 90 % дисперсии временных рядов ПРМЛ ЮП, то это является причиной неудовлетворительного описания морского льда математическими моделями. Такое простое объяснение не пришло в голову исследователям, изучающим «загадочное» поведение морского льда в ЮП.

Список литературы

1. Алексеев Г.В., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е., Смирнов А.В. Влияние температуры поверхности океана в тропиках на антарктический морской лед в период глобального потепления // *Лёд и Снег*. 2019. Т. 59, № 2. С. 213—221.
2. Алексеева Т.А., Тихонов В.В., Фролов С.В., Раев М.Д., Репина И.А., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В., Шарков Е.А., Сероветников С.С. Сравнение сплоченности ледяного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии с данными визуальных судовых наблюдений // *Исследование Земли из космоса*. 2018. № 6. С. 65—76.
3. 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.
4. 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.
5. Малинин В.Н. Уровень океана: настоящее и будущее. СПб: изд-во РГГМУ, 2012. 260 с.
6. Малинин В.Н. Глобальный экологический кризис и климат // *Ученые записки РГГМУ*. 2017. № 48. С. 11—32.

7. *Малинин В.Н., Вайновский П.А.* Когда наступит безледный режим регионов Арктики? // Ученые записки РГГМУ. 2019. Вып. 56. С. 98—109.
8. *Малинин В.Н., Вайновский П.А.* О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Ученые записки РГГМУ, 2018, № 53, С. 34—55.
9. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 3—11.
10. *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 // Лёд и Снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 77—107.
11. *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.
12. *Тихонов В.В., Репина И.А., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю.* Комплексный алгоритм определения ледовых условий в полярных регионах по данным спутниковой микроволновой радиометрии (VASIA2) // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 2. С. 78—93.
13. *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.
14. *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.
15. *Agnew T., Howell S.* The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data // Atmosphere — Ocean. 2003. V. 41, No. 4. P. 317—331.
16. Antarctic Sea Ice Variability in the Southern Ocean—Climate System // Proc. Workshop. Thomas K., Macalady A. Washington, D.C., National Academies Press, 2017. 82 p.
17. *Bintanja R., Van Oldenborgh G.J., Drijfhout S.S., Wouters B. and Katsman C.A.* Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion // Nature Geosci. 2013. V. 6 (5), 376—379. doi: 10.1038/ngeo1767
18. *Cavaliere D.J., Parkinson C.L., Vinnikov K.Y.* 30-year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, No. 18. doi:10.1029/2003GL018031
19. *Comiso J.C., Steffen K.* Studies of Antarctic Sea ice concentrations from satellite data and their applications // J. Geophys. Res. Oceans. 2001. V. 106, No. C12. P. 31361—31385.
20. *Goosse, H., and V. Zunz.* Decadal trends in the Antarctic sea ice extent ultimately controlled by ice—ocean feedback // The Cryosphere. 2014. V. 8(2). P. 453—470. doi: 10.5194/tc—8—453—2014
21. *Hellmer H.H.* Impact of Antarctic ice shelf basal melting on sea ice and deep ocean properties // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31 (10), L10307. doi: 10.1029/2004GL019506
22. *Ivanova N.O., M. Johannessen, L.T. Pedersen, Tonboe R.T.* Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2014. V. 52, No. 11. P. 7233—7246.
23. *Knuth M.A., Ackley S.E.* Summer and early-fall sea ice concentration in the Ross Sea: comparison of in situ ASPeCT observations and satellite passive microwave estimates // Ann. Glaciol. 2006. V. 44. P. 303—309.
24. *Kwok R.* Sea ice concentration estimates from satellite passive microwave radiometry and openings from SAR ice motion // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, No. 9. DOI: 10.1029/2002GL014787.
25. *Liu J., Curry J.A.* Accelerated warming of the Southern Ocean and its impacts on the hydrological cycle and sea ice // PNAS. 2010. 107 (34). P. 14987—14992; <https://doi.org/10.1073/pnas.1003336107>
26. *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, No. 6. P. 1324—1337.
27. *Parkinson C.L.* A 40-year record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic. 2019. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1906556116
28. *Parkinson C.L.* Global Sea Ice Coverage from Satellite Data: Annual Cycle and 35-year Trends // J. Climate. 2014. V. 27. P. 9377—9382.
29. *Polvani L.M., Smith K.L.* () Can natural variability explain observed Antarctic sea ice trends? New modeling evidence from CMIP5. Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40 (12). P. 3195—3199. doi: 10.1002/grl.50578

30. *Simmonds I.* Comparing and contrasting the behaviour of Arctic and Antarctic sea ice over the 35 year period 1979—2013 // *Annals Glaciol.* 2015. 56 (69). doi: 10.3189/2015AoG69A909.
31. *Turner J., Overland J.* Contrasting climate change in the two polar regions. // *Polar Res.* 2009. V. 28 (2). P. 146—164. doi: 10.1111/j.1751—8369.2009.00128.x
32. *Turner J., Bracegirdle T.J., Phillips T., Marshall G.J., Hosking J.S.* An initial assessment of Antarctic sea ice extent in the CMIP5 models // *J. Climate.* 2013. V. 26 (5). P. 1473—1484. doi: 10.1175/JCLI—D—12—00068.1

References

1. *Alekseev G.V., Glock N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Harlanenkova N.E., Smirnov A.V.* The effect of ocean surface temperature in the tropics on Antarctic sea ice during global warming. *Led i sneg. Ice and Snow.* 2019, 2(59): 213—221. [In Russian].
2. *Alekseeva T.A., Tikhonov V.V., Frolov S.V., Raev M.D., Repina I.A., Sokolova Yu.V., Afanasyeva E.V., Sharkov E.A., Serovetnikov S.S.* Comparison of the cohesion of the ice cover according to satellite microwave radiometry with the data of visual ship observations. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa. Earth Observations and Remote Sensing.* 2018, 6: 65—76. [In Russian].
3. *Zabolotskikh E.V.* A review of methods for reconstructing ice cover parameters from satellite microwave radiometers. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. Proceedings of the RAS. Physics of the atmosphere and the ocean.* 2019, 1(55): 128—151. [In Russian].
4. *Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V.* Does Arctic ice cover become seasonal? *Issledovanie Zemli iz kosmosa. Earth Observations and Remote Sensing.* 2013, 4: 50—65 [In Russian].
5. *Malinin V.N. Uroven' okeana: nastoyashcheye i budushcheye.* Ocean level: present and future. SPb, Publ. Russian State Hydrometeorological University, 2012: 260 p. [In Russian].
6. *Malinin V.N.* Global ecological crisis and climate. *Uchenye zapiski RSHU. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University.* 2017, 48: 11—32. [In Russian].
7. *Malinin V.N., Vainovsky P.A.* When will the ice—free regime of the Arctic regions come? *Uchenye zapiski RSHU. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University.* 2019, 56: 98—109. [In Russian].
8. *Malinin V.N., Vainovsky P.A.* On the causes of the first warming of the Arctic in the twentieth century. *Uchenye zapiski RSHU. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University* 2018, 53: 34—55. [In Russian].
9. *Malinin V.N., Gordeeva S.M.* The variability of the atmospheric moisture content over the ocean according to satellite data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa. Earth Observations and Remote Sensing.* 2015, 1: 3—11. [In Russian].
10. *Semenov V.A., T. Martin, L.K. Behrens, M. Latif, E.S. Astafieva.* Arctic sea ice area changes in CMIP3 and CMIP5 climate models' ensembles. *Led i sneg. Ice and Snow,* 2017, 1 (57): 77—107. [In Russian].
11. *Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarsky D.A., Repina I.A., Komarova N.Yu.* Satellite microwave radiometry of sea ice in the polar regions. Overview. *Issledovanie Zemli iz kosmosa. Earth Observations and Remote Sensing.* 2016, 4: 65—84. [In Russian].
12. *Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarsky D.A., Komarova N.Yu.* A comprehensive algorithm for determining ice conditions in the polar regions according to satellite microwave radiometry (VASIA2). *Issledovanie Zemli iz kosmosa. Earth Observations and Remote Sensing.* 2015, 2: 78—93. [In Russian].
13. *Frolov I.E., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E. Smolyanitsky V. Nauchnye issledovaniya v Arktike. T. 2, Klimaticheskie izmeneniya ledjanogo pokrova morej Evrazijskogo shel'fa.* Scientific research in the Arctic. T. 2, Climate Change of ice cover extent in Eurasian Arctic Shelf Seas. Saint-Petersburg: Nauka, 2007: 136 p. [In Russian].
14. *Shalina E.V., Bobylev L.P.* Sea ice transformations in the Arctic from satellite observations, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Modern problems of remote sensing of the Earth from space.* 2017, 6 (14): 28—41. [In Russian].
15. *Agnew T., Howell S.* The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data. *Atmosphere—Ocean.* 2003, 4 (41): 317—331.

16. Antarctic Sea Ice Variability in the Southern Ocean—Climate System: Proceedings of a Workshop Thomas K., Macalady A. Washington, D.C., National Academies Press. 2017: 82 p.
17. *Bintanja R., Van Oldenborgh G.J., Drijfhout S.S., Wouters B. and Katsman C.A.* (2013) Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion// *Nature Geosci.*, 6(5): 376—379 (doi: 10.1038/ngeo1767).
18. *Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Vinnikov K.Y.* 30-year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability. *Geoph. Res. Lett.* 2003, 18 (30): 18—31 doi:10.1029/2003GL018031,
19. *Comiso J.C., Steffen K.* Studies of Antarctic sea ice concentrations from satellite data and their applications/ *J. Geophys. Res. Oceans.* 2001, 12 (106): 31361—31385.
20. *Goosse, H., and V. Zunz.* Decadal trends in the Antarctic sea ice extent ultimately controlled by ice—ocean feedback, *The Cryosphere.* 2014, 8 (2): 453—470, doi: 10.5194/tc—8—453—2014.
21. *Hellmer H.H.* Impact of Antarctic ice shelf basal melting on sea ice and deep ocean properties. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 31(10): L10307 (doi: 10.1029/2004GL019506).
22. *Ivanova N.O., M. Johannessen, L.T. Pedersen, Tonboe R.T.* Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 2014, 11(52): 7233—7246.
23. *Knuth M.A., Ackley S.E.* Summer and early—fall sea ice concentration in the Ross Sea: comparison of in situ ASPeCT observations and satellite passive microwave estimates. *Ann. Glaciol.* 2006, (44): 303—309.
24. *Kwok R.* Sea ice concentration estimates from satellite passive microwave radiometry and openings from SAR ice motion. *Geophys. Res. Lett.* 2002, 9 (29): 47—87. DOI: 10.1029/2002GL014787.
25. *Liu J., Curry J.A.* Accelerated warming of the Southern Ocean and its impacts on the hydrological cycle and sea ice. *PNAS* 2010, 107(34): 14987—14992; <https://doi.org/10.1073/pnas.1003336107>
26. *Meier W.N.* Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic peripheral seas. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2005, 6(43):, 1324—1337.
27. *Parkinson C.L.* (2019). A 40-year record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1906556116
28. *Parkinson C.L.* Global Sea Ice Coverage from Satellite Data: Annual Cycle and 35-year Trends. *J. Climate.* 2014, (27): 9377—9382.
29. *Polvani L.M., Smith K.L.* Can natural variability explain observed Antarctic sea ice trends? New modeling evidence from CMIP5. *Geophys. Res. Lett.* 2013, 40 (12): 3195—3199 (doi: 10.1002/ grl.50578)
30. *Simmonds I.* Comparing and contrasting the behaviour of Arctic and Antarctic sea ice over the 35 year period 1979—2013. *Ann. Glaciology.* 2015. 56 (69). doi: 10.3189/2015AoG69A909.
31. *Turner J., Overland J.* Contrasting climate change in the two polar regions. *Polar Res.* 2009, 28 (2): 146—164 (doi: 10.1111/j.1751—8369.2009.00128.x)
32. *Turner J., Bracegirdle T.J., Phillips T., Marshall G.J., Hosking J.S.* An initial assessment of Antarctic sea ice extent in the CMIP5 models. *J. Climate.* 2013, 26 (5): 1473—1484 (doi: 10.1175/ JC-LI—D—12—00068.1)

Статья поступила 10.10.2019

Принята 30.11.2019

Сведения об авторах

Малинин Валерий Николаевич, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами РГТМУ, malinin@rshu.ru

Вайновский Павел Антонович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, ООО «Прогноз», pv974@yandex.ru

Information about author

Malinin Valery Nikolaevich, doctor of geographical sciences, professor, Russian State Hydrometeorological University

Vainovskii Pavel Antonovich, candidate of geographical sciences, senior researcher, LLC «Prognoz»