

ПЛОЩАДЬ МОРСКОГО ЛЬДА РАЗНЫХ РЕГИОНОВ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В 21-М ВЕКЕ

Малинин В.Н.¹, Вайновский П.А.² Митина Ю.В.¹, Кудряшов В.А.³

¹ – Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, malinin@rshu.ru

² – ООО «Прогноз», Санкт-Петербург, Россия

³ – Государственный университет морского и речного флота, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматривается межгодовая изменчивость максимальной (март) и минимальной (сентябрь) площади морского льда регионов северного полушария за период 1989-2017 гг. Главное внимание уделено анализу линейного и нелинейного тренда ледовитости всех регионов.

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

В данной работе использованы спутниковые среднемесячные данные о площади распространения морского льда (ПРМЛ) для 10 регионов северного полушария, которые находятся в свободном доступе на сайте NASA [<https://neptune.gsfc.nasa.gov/csb/index.php?section=59>] с октября 1978 года по настоящее время. В результате этого стало возможным получать самые точные и достоверные по сравнению с другими климатическими характеристиками оценки изменчивости и статистических трендов параметров ледового покрова [1]. Общее состояние изученности морских льдов в Арктике в XX столетии дается в работе [2]. Учитывая общедоступность непрерывно пополняемых спутниковых данных - это делает их важнейшим источником фактической информации о современных тенденциях в состоянии арктического ледяного покрова.

Из-за сравнительно короткой длины временных рядов ледовитости и того, что в них имеют место лишь неустойчивые короткопериодные колебания разных периодов, ограничимся только анализом трендов. В данной работе это выполнено на основе введения индекса тренда, который представляет собой отношение размаха тренда (a_1n) к его среднему значению ($X_{ср}$) и выражается в условных единицах [3], т.е. $I_{тр} = 100 a_1n / X_{ср}$, где a_1 – угловой коэффициент, 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.

Отметим, что индексы тренда имеют четкое физическое толкование. С этой целью выполнен расчет годов выхода на безледный режим ($N_{бр}$) в сентябре и марте ПРМЛ разных регионов в зависимости от значимых индексов тренда $I_{тр}$. Выявлено, чем больше индекс тренда, тем быстрее наступает безледный режим и, наоборот, с уменьшением $I_{тр}$ выход на $N_{бр}$ резко увеличивается, причем при $I_{тр} \rightarrow 0$ $N_{бр} \rightarrow \infty$. Важно, что сентябрьские и мартовские значения $I_{тр}$ полностью ложатся на одну кривую, что свидетельствует об ее универсальном характере. В результате аппроксимации данной зависимости получена простая гиперболическая формула $N_{бр}(t) = -3481,1/I_{тр} - 3,41$. Здесь $N_{бр}(t) = N_{бр} - 2000$. Данная формула очень точно аппроксимирует зависимость между $N_{бр}$ и $I_{тр}$ ($R^2 = 0,99$), поэтому средняя квадратическая ошибка мала ($\sigma_N = 4,1$ лет). Если, например, $I_{тр} = -50$, то $N_{бр} = 65 + 2000 = 2065 \pm 4$ г.

Максимальные оценки индекса тренда отмечаются для сентябрьских значений ледовитости Берингова моря ($I_{тр} = -151,6$) и Баренцева, Карского морей ($I_{тр} = -135,5$). В марте максимальная оценка индекса тренда наблюдается для Гренландского моря ($I_{тр} = -42,1$). Для Арктического бассейна и северного полушария в целом индексы тренда в

сентябре близки (48,4 и 51,8), а вот в марте $I_{тр}$ для Арктического бассейна практически равен нулю. В работе сделаны оценки выхода на безледный режим в Арктике в сентябре на основе трендового подхода (табл. 1). Поскольку величина тренда – весьма изменчивая характеристика, которая полностью зависит от длины ряда, то для проверки степени устойчивости линейного тренда был выполнен следующий эксперимент. В качестве начального периода взят промежуток времени 1979-2010 гг., для которого рассчитан линейный тренд. Затем, прибавляя каждый раз по одному году, были рассчитаны тренды вплоть до 2017 года. Итак, имеем набор из 8 трендов. Из него выбрана максимальная и минимальная оценка тренда, для которых дополнительно рассчитывался выход на безледный режим ПРМЛ. Как видно из табл. 1 минимальное расхождение в оценках выхода на безледный режим наблюдается для Баренцева, Карского и Берингова морей (8 лет), а максимальное расхождение – для Канадского архипелага и Гренландского моря (20 и 19 лет). Это свидетельствует об устойчивости оценок линейного тренда за период 39 лет. Для северного полушария выход на безледный режим ожидается в 2074 г., для максимального тренда выход на ноль происходит в 2066 г., для минимального тренда – в 2081 г., т.е. расхождение составляет всего 15 лет.

Таблица 1 – Оценки выхода на начальный год безледного режима ледовитости различных регионов северного полушария на основе аппроксимации линейного и нелинейного тренда

Водная поверхность	Линейный тренд			Нелинейный тренд
	По минимальному тренду	1979-2017 гг.	По максимальному тренду	
Баренцево, Карское моря	2032	2026	2024	2018
Берингово море	2027	2022	2019	2027
Канадский архипелаг	2094	2107	2114	2060
Лабрадорское море, зал. 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

Выход на безледный режим по нелинейному тренду за исключением Берингова моря происходит раньше. Наибольшее ускорение (47 лет) отмечается для Канадского архипелага, наименьшее – для Баренцева и Карского морей (8 лет). Нет выхода на безледный режим в Гудзоновом заливе. Дело в том, что после 2000 года произошла определенная стабилизация в ледяном покрове залива, в результате чего полиномиальная кривая получила тенденцию вверх. Ближайшие годы покажут, насколько устойчивой является такая стабилизация. Заметим, близкая оценка выхода на безледный режим ПРМЛ северного полушария по нелинейному тренду за период 1979-2014 гг., получена в работе [4], которая оказалась равной 2035 году. На качественном уровне можно говорить о том, что ускорение за счет нелинейного тренда может приближенно показывать, как будет вести себя ледовый покров при ускорении потепления в Арктике.

Литература

1. Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Л.К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей СМIP3 и СМIP5 //Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С.77-107.
2. Захаров В.П., Малинин В.Н. Морские льды и климат. СПб: Гидрометеоиздат, 2000. 91 с.
3. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 3-11.
4. 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.

**SEA ICE EXTENT OF DIFFERENT REGIONS
OF THE NORTHERN HEMISPHERE IN THE PRESENT CENTURY****Malinin V.N.¹, Vainovskii P.A.², Mitina J.V.¹, Kudraishov V.A.³**¹ – *Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, malinin@rshu.ru*² – *Prognoz LLC, St. Petersburg, Russia*³ – *State University of Maritime and River Fleet, St. Petersburg, Russia*

Abstract. We consider interannual variability and possible changes of the maximum (in March) and the minimum (in September) sea ice extent in the northern hemisphere in for 1989-2017 period. The main attention is paid to the analysis of linear and nonlinear trend sea ice extent of all regions.

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