

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Фёдоров В.М., Залиханов А.М., Дегтярев К.С. — Особенности межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном полушарии // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.2.41008  
EDN: HGKGDS URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=41008](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=41008)

## Особенности межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном полушарии

**Фёдоров Валерий Михайлович**

ORCID: 0000-0003-2305-7408

кандидат географических наук

ведущий научный сотрудник, Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

119991, Россия, Москва область, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 1904Б

✉ [fedorov.msu@mail.ru](mailto:fedorov.msu@mail.ru)



**Залиханов Алим Михайлович**

ORCID: 0000-0002-2540-6045

кандидат географических наук

старший научный сотрудник, МГУ им. М.В. Ломоносова; географический факультет; НИЛ возобновляемых источников энергии

119991, Россия, Москва область, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 19

✉ [bulungu@yandex.ru](mailto:bulungu@yandex.ru)



**Дегтярев Кирилл Станиславович**

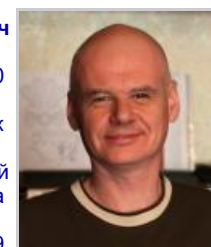
ORCID: 0000-0002-1738-6320

кандидат географических наук

преподаватель, Географический факультет, НИЛ возобновляемых источников энергии, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 19

✉ [kir1111@rambler.ru](mailto:kir1111@rambler.ru)



[Статья из рубрики "Арктические льды"](#)

**DOI:**

10.7256/2453-8922.2023.2.41008

**EDN:**

HGKGDS

**Дата направления статьи в редакцию:**

15-06-2023

**Аннотация:** На основе массива ледовых данных для периодов максимального и минимального сезонного распространения морских льдов в Северном полушарии (марта и сентября) проведены исследования зависимости вероятности знака и среднего для ячейки значения межгодовой изменчивости от знаков (и нуля) предшествующих разностей. Показано, что вероятностный диапазон для появления положительных разностей после групп отрицательных разностей в марте больше, чем в сентябре. И наоборот, вероятностный диапазон появления отрицательных разностей после предшествующих положительных в сентябре больше, чем в марте. В периоды минимальных (март) и максимальных (сентябрь) межгодовых изменений, после положительных разностей с увеличением числа разностей в группе, значения последующих, как положительных, так и отрицательных межгодовых изменений возрастают. Отмечается увеличение вероятности появления межгодовой разности одного знака с увеличением группы предшествующих разностей другого знака. Для вероятности появления нулевых разностей (отсутствия межгодовой изменчивости) для марта и сентября отмечается увеличения вероятности появления нулевых значений с увеличением числа предшествующих нулевых разностей в группе. Полученные результаты указывают на присутствие в стохастической межгодовой изменчивости площади морских льдов механизма стабилизации, что подтверждается увеличением вероятности появления разности одного знака, при увеличении числа предшествующих разностей другого знака в группе. Увеличение вероятности нулевых значений с увеличением числа предшествующих нулевых разностей подтверждает присутствие географических областей, в которых не происходят межгодовые изменения площади морских льдов.

**Ключевые слова:**

морской лед, Северное полушарие, площадь морских льдов, межгодовая изменчивость, стохастические процессы, Марковские цепи, температура океана, солнечная радиация, динамика морских льдов, меридиональный градиент инсоляции

*Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики» (121051100167-1) и «Географические основы устойчивого развития энергетических систем с использованием возобновляемых источников энергии» (121051400082-4)*

**ВВЕДЕНИЕ**

Изучение изменений морских льдов и причин, вызывающих эти изменения составляет одну из актуальных задач морского ледоведения [\[4; 9; 11\]](#). Распространение и динамика морских льдов зависит от многих факторов, определяемых геофизическими процессами. Это, прежде всего, температура и влажность воздуха, температура поверхности океана, циркуляционные процессы в атмосфере, морские течения, наличие и структура галоклина, облачность, сток рек, альбедо и др. Основу отмеченных факторов составляет приходящая к Земле солнечная радиация – основной источник тепла на Земле [\[5;10;16\]](#).

Важнейшим параметром ледяного покрова является его площадь, которая изменяется как в пространстве, так и во времени. Выделяются сезонные (годовой ход), многолетние и межгодовые изменения. Как показали ранее проведенные нами исследования,

годовой ход площади морских льдов определяется годовым ходом инсоляции Земли, но отстает от него по фазе на 2 месяца [12; 13]. Пространственные и временные особенности многолетних изменений площади морских льдов в основном определяются многолетними изменениями инсоляционной контрастности (ИК). Многолетние изменения ИК, обобщенно по областям источника и стока тепла, отражают многолетние изменения меридионального градиента инсоляции [14]. Межгодовая изменчивость определяется колебаниями природной системы и ее компонентов. Эти колебания являются стохастическими, в связи с чем, представляют особую сложность при их моделировании и прогнозе. Однако при этом отмечаются пространственные и временные особенности, указывающие на присутствие регулярностей в межгодовой изменчивости характеристик состояния природной среды [1]. Так, например, для Северного Ледовитого океана найдена тесная связь годового хода среднего модуля межгодовой изменчивости площади морских льдов с годовым ходом облучения Северного полушария, смещенного на 2 месяца в прошлое [14].

Целью данной работы является выявление пространственных и временных особенностей в межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном полушарии, на основе анализа массива ледовых данных.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведено исследование межгодовой изменчивости площади морских льдов для отдельных трапеций размером  $1^\circ \times 1^\circ$  по широте и долготе в масштабах всего Северного полушария. В качестве объекта исследований использовалась база данных Метеорологического центра Хэдли [18]. Представленная в базе данных HadISST1 информация о средней месячной температуре поверхности океана и площади морских льдов в Северном и Южном полушарии получена в результате сведения в единый массив данных реанализа (ERA40), выполненного с использованием эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) и данных инструментальных и визуальных (прежде всего судовых и спутниковых) наблюдений. Реконструкция площади морских льдов в массиве по сетке  $1^\circ \times 1^\circ$  выполнена на основе алгоритмов аппроксимации и экстраполяции доступных данных (оцифрованные карты площади морских льдов, данные судовых и спутниковых наблюдений) с учетом температуры поверхности океана (ТПО) [17]. В массиве представлены данные по средней месячной площади морских льдов в пространственной ячейке  $1^\circ \times 1^\circ$  в процентах от площади ячейки (ледовитость), с 1870 г. по настоящее время. Нами анализировался массив, включающий 7400 ячеек, в каждой из которых представлена информация по площади морского льда с месячными значениями за период с 1901 по 2020 г.

Для исследования межгодовой изменчивости площади морских льдов использовалась методика, основанная на марковских свойствах естественной изменчивости, опробованная ранее при исследовании естественной изменчивости характеристик климата северной полярной области и Северного полушария [1]. Эта методика применялась нами (в данной работе) в исследованиях межгодовой изменчивости площади морских льдов Северного полушария. Площадь морских льдов, прежде всего, зависит от температуры поверхности океана (ТПО) и приповерхностной температуры воздуха (ПТВ). При анализе временных рядов температуры определено, что появление подряд двух и более приращений с одинаковым знаком в 2 раза более редкое событие, чем появление двух приращений подряд с противоположными знаками [1]. Это указывает на наличие определенной стабилизирующей обратной связи в межгодовой

изменчивости, возникающей под влиянием внутренней стохастической динамики атмосферы.

Проведенными ранее исследованиями обнаружены два интересных факта. Во-первых, отмеченная закономерность в чередовании знаков разностей годовых значений наблюдалась для климатических рядов среднемесячной температуры в отдельных пунктах наблюдений [21]. Во-вторых, подобная закономерность свойственна рядам случайных чисел, что предлагается использовать в качестве теста для проверки исследуемых рядов на случайность [3; 71].

Проведенный анализ температурных характеристик климата [11] показал, что общие свойства в последовательности знаков разностей случайных и климатических рядов является следствием одной и той же обратной связи, действующей на стохастическую изменчивость, ограниченную внешними условиями. С математической точки зрения это явление следует определить как марковские свойства ограниченных случайных последовательностей. С точки зрения исследования природной системы или ее компонентов оно служит подтверждением их внутренней устойчивости.

Как следует из марковских свойств, вероятность разных знаков у соседних первых разностей одного временного ряда равна  $2/3$ , а вероятность одинаковых знаков в два раза меньше, то есть  $1/3$ . Эти вероятности характеризуют в терминах однородной цепи Маркова конечное состояние после одного шага (первые разности). Используем формулу для однородной цепи Маркова [6]:

$$\pi_n = \pi_0 P^n$$

(где  $\pi_n$  – матрица вероятностей конечного состояния;  $\pi_0$  – матрица вероятностей начального состояния;  $P$  – матрица переходных вероятностей). Матрица переходных состояний, будет выглядеть следующим образом:

	+	-
+	1/3	2/3
-	2/3	1/3

Используя переходные вероятности можно рассчитать вероятность любой последовательности знаков. В общем случае вероятность последовательности первых разностей с «n» одинаковыми знаками можно рассчитать по формуле

$$P^n = 4 \cdot 3^{-(n+1)}$$

Таким образом, статистические свойства климатических рядов, значения которых можно рассматривать как независимые, близки к свойствам ограниченных случайных последовательностей. Первые разности такой последовательности обладают марковским свойством, отражающим действие обратной связи в стохастической модели, порождающей данную последовательность. Эта обратная связь в первых разностях приводит к тому, что вероятность смены знака первых разностей в 2 раза выше, чем сохранение знака. Появление обратной связи вызвано влиянием внешних ограничений на стохастическую динамику моделей (природных систем и их компонентов). Применительно к природной системе и ее компонентам (одним из которых является морской лед) эти свойства подтверждают ее внутреннюю устойчивость и создают определенный прогностический потенциал. Действительно, используя свойство смены знака первых разностей можно предсказать знак приращения характеристики за год

вперед.

Мы применили приведенные представления к анализу межгодовой изменчивости площади морских льдов. В качестве исследуемых характеристик рассматривались месячные (для марта и сентября) значения площади морских льдов в ячейках размером  $1^\circ \times 1^\circ$  с 1901 по 2029 гг., представленные рядами ежегодных значений. Известно, что март и сентябрь – периоды соответственно максимального и минимального распространения морских льдов в морях Российской Арктики и в Северном полушарии в целом. В отличие от приведенных представлений о расчетах вероятностей для двух возможных вариантов первой разности (знак «плюс» или «минус»), мы определяли вероятность для трех возможных вариантов разностей: «плюс», ноль и «минус». Вероятность каждого варианта последней разности определялась для 12 групп (табл. 1) предшествующих сочетаний знаков межгодовой изменчивости – разности (при этом из текущего года вычитался предшествующий год):

Рассматриваемые группы предшествующих сочетаний знаков межгодовой изменчивости (разности последовательных годовых значений) и нуля имеют следующий вид:

----	---	--	-
0000	000	00	0
++++	+++	++	+

То есть, по массиву данных определялась реальная для массива вероятность появления знака разности или нуля после каждого из представленных сочетаний (групп) предшествующих разностей межгодовой изменчивости площади морских льдов. Площадь морских льдов представлена в массиве данных в процентах от площади ячейки.

Таким образом, для каждой ячейки массива анализировались два временных ряда – для марта (максимальная площадь) и сентября (минимальная площадь морских льдов). Теоретически вероятность появления одного из трех вариантов («плюс», ноль, «минус») равна  $1/3$ . Однако, как следует из марковских цепочек, эта вероятность зависит от знака предыдущей разности. Марковское свойство знаков приращения – это их зависимость от знаков предшествующих приращений. Определение характера зависимости вероятности появления одного из трех вариантов в межгодовой изменчивости площади морских льдов для представленных выше комбинаций (групп) предшествующих разностей было основной задачей работы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ вероятности знака разности годовых значений для марта, следующей за комбинациями предшествующих разностей показывает, что с увеличением числа одноименных знаков в комбинации вероятность появления разности с противоположным знаком возрастает (табл. 1). Для нулевых значений вероятность появления нулевой разности возрастает с увеличением числа нулевых разностей в предшествующей группе.

Таблица 1. Распределение и вероятность появления знаков разности и нуля после предшествующих групп знаков и нулей в межгодовой изменчивости для марта

Группа	Количество, ед.			Вероятность, %		
	«плюс»	«минус»	0	«плюс»	«минус»	0
----	221	36	23	78,929	12,857	8,214
---	1424	289	250	72,542	14,722	12,76
--	7418	2047	2633	61,316	16,920	21,764

-	41215	14622	24402	51,365	18,223	30,412
0000	1757	773	11571	12,460	5,482	82,058
000	3286	1342	17859	14,613	5,968	79,419
00	7178	4477	30987	16,833	10,499	72,668
0	26099	16604	74761	22,219	14,135	63,646
++++	85	294	60	19,362	66,970	13,667
+++	456	1419	225	21,714	67,571	10,714
++	2203	8825	1666	17,355	69,521	13,124
+	15002	49874	16341	18,472	61,408	20,120

В среднем по всему массиву вероятность появления знака «плюс» после одной отрицательной разности составляет 51,4% и она увеличивается до 78,9% после четырех предшествующих отрицательных разностей. Диапазон изменения вероятности составляет 27,6%. Вероятность появления положительной разности, таким образом, в среднем возрастает на 9,2% после каждого увеличения числа предшествующих отрицательных разностей в группе. При этом вероятность появления отрицательной разности сохраняется в диапазоне от 18,2% (после одной отрицательной разности) до 12,9% (после комбинации из четырех отрицательных разностей). Вероятность появления нулевой разности соответственно уменьшается от 30,4% до 8,2%.

Вероятность появления отрицательной разности после одной положительной равняется 61,4% и, она увеличивается до 67,0% после четырех отрицательных разностей. Таким образом, вероятность появления отрицательных разностей после положительных изменяется в более узком вероятностном диапазоне (5,5%) по сравнению с вероятностью появления положительной разности после предшествующих отрицательных (27,6%). Иными словами, вероятность появления положительных разностей в марте после отрицательных (отражающих сокращение площади морских льдов) более заметно зависит от знака предшествующих разностей, чем вероятность появления отрицательных разностей после положительных (отражающих увеличение площади морских льдов). Также, в более узком диапазоне сохраняется вероятность появления положительных разностей после предшествующих положительных (от 17,4% до 21,7%). То есть, вероятность появления положительной разности мало изменяется с увеличением предшествующих положительных разностей. Вероятность появления нулевых значений разности после предшествующих положительных изменяется в интервале от 20,1% до 13,7% (табл. 1).

Увеличение вероятности появления положительной (отрицательной) разности знака с увеличением числа предшествующих отрицательных (положительных) разностей подтверждает существование механизма стабилизации в межгодовой изменчивости площади морских льдов. Этот механизм сдерживает тенденцию сокращения площади морских льдов, определяемую усилением интенсивности меридионального переноса радиационного тепла, связанным с уменьшением наклона оси вращения Земли в современную эпоху [\[15\]](#).

Иная картина распределения вероятности отмечается для нулевых комбинаций (групп предшествующих разностей). Отмечается увеличение вероятности появления нулевой разности от 63,6% после одной нулевой разности до 82,1% после четырех предшествующих нулевых значений. Такой характер распределения отражает существование областей с отсутствием межгодовых изменений площади морских льдов и стабильность ледового массива в марте.

Рассчитывались и анализировались числовые значения межгодовой изменчивости для положительных и отрицательных разностей (табл. 2). Для нулевых разностей, естественно, амплитуда равна 0. Межгодовая изменчивость определялась вычитанием из текущего года предшествующего.

Максимальные (средние по всем ячейкам) положительные значения межгодовой изменчивости площади морских льдов в марте отмечаются в разностях, следующих за группами из трех и четырех предшествующих отрицательных разностей – 16,0% и 15,8% соответственно. Межгодовые отрицательные разности в этих случаях существенно меньше (-6,3% для обоих случаев). Также максимальные положительные значения конечной разности отмечаются после групп из трех и четырех положительных разностей (16,0% и 17,3% соответственно). В этих случаях, также отмечаются максимальные по величине отрицательные разности (-18,7% и -23,2% соответственно).

Таблица 2. Среднее для ячейки значение межгодовой изменчивости для ее знака после групп сочетаний предшествующих знаков в марте.

Группа	Среднее значение межгодовой изменчивости, %	
	+	-
----	15,8190	-6,3056
---	15,9803	-6,2941
--	12,0901	-6,4533
-	9,8709	-5,8350
<b>0000</b>	1,4206	-15,8241
<b>000</b>	1,8646	-14,4396
<b>00</b>	1,6194	-9,7087
<b>0</b>	2,4859	-7,9116
<b>++++</b>	17,2941	-23,2313
<b>+++</b>	15,9671	-18,7421
<b>++</b>	13,9573	-10,9763
<b>+</b>	10,6506	-7,6316

*Примечание: значение межгодовой изменчивости площади морских льдов измеряется в % от площади ячейки.*

Следующая, за группами нулевых значений отрицательная разность, по модулю существенно превосходит следующую за той же нулевой группой положительное значение разности (табл. 2). Максимальные отрицательные разности следуют за группами из трех и четырех нулевых разностей: -14,4% и -15,8% соответственно. Значения положительных разностей следующих за нулевыми группами не превышают 2,5%. Таким образом, отрицательные значения разностей следующих за группой нулевых значений в среднем по модулю, приблизительно в 6,5 раз превосходят следующие за нулевыми группами значения положительных разностей.

Значения отрицательной межгодовой изменчивости практически не зависят от количества положительных разностей в предшествующих группах (изменение в пределах от 5,8% до 6,3%). В то же время, значения положительных разностей, следующих за группами отрицательных разностей, возрастают с увеличением количества разностей в группе. Так, среднее значение межгодовой изменчивости после одной предшествующей положительной разности составляет -7,8%, а после серии из четырех положительных разностей уже -23,2%. Сходная зависимость проявляется и для положительных значений разности, следующих за положительными разностями. После одной предшествующей

положительной разности среднее значений межгодовой изменчивости равно 10,7%, после четырех положительных разностей – 17,3%.

Анализ вероятности знака разности годовых значений для сентября (как и для марта), следующей за комбинациями предшествующих разностей показывает, что с увеличением числа одноименных знаков в группе вероятность появления разности с противоположным знаком возрастает (табл. 3). Для нулевых значений вероятность появления нулевой разности возрастает с увеличением числа нулевых разностей в предшествующей группе.

Вероятность появления положительных разностей в межгодовой изменчивости после отрицательных групп в сентябре по сравнению с мартом возрастает. Вероятность появления положительного знака межгодовой изменчивости увеличивается от 62,5% после одной до 82,5% после четырех предшествующих отрицательных разностей. Однако, вероятностный диапазон при этом сужается до 20% по сравнению с 27,6% в марте.

Таблица 3. Распределение и вероятность появления знаков разности и нуля после предшествующей комбинацией знаков и нулей в межгодовой изменчивости для сентября

Группа	Количество, ед.			Вероятность, %		
	«плюс»	«минус»	ноль	«плюс»	«минус»	ноль
----	378	51	29	82,533	11,135	6,332
---	2198	458	216	76,532	15,947	7,521
--	11654	2994	1440	72,439	18,610	8,951
-	46816	19653	8405	62,526	26,248	11,226
<b>0000</b>	110	627	7773	1,293	7,368	91,340
<b>000</b>	358	1355	10911	2,836	10,734	86,431
<b>00</b>	1476	3505	18544	6,274	14,899	78,827
<b>0</b>	10469	14582	42635	15,467	21,544	62,989
<b>++++</b>	47	453	81	8,090	77,969	13,941
<b>+++</b>	591	2471	559	16,321	68,241	15,438
<b>++</b>	3735	11714	2928	20,324	63,743	15,933
<b>+</b>	22345	42642	14413	28,142	53,705	18,152

Вероятностный диапазон появления отрицательных значений после групп положительных разностей, наоборот увеличивается до 24,3% (при 5,5% в марте). Вероятность появления отрицательной межгодовой разности в сентябре изменяется от 53,7% (после одной предшествующей положительной разности) до 78,0% (после серии из четырех положительных разностей). Таким образом, вероятностный диапазон для появления положительных разностей после отрицательных групп в марте больше, чем в сентябре. И наоборот, вероятностный диапазон появления отрицательных разностей после предшествующих положительных в сентябре больше, чем в марте.

Кроме того, увеличивается вероятностный диапазон для появления нулевых значений от 18,4% в марте, до 28,3% в сентябре. При этом, зависимость характера распределения вероятности появления нулевых значений от предшествующих разностей, как и в марте иная, чем для появления противоположных знаков. В случае знаков, отмечается увеличение вероятности появления межгодовой разности одного знака с увеличением группы предшествующих разностей другого знака. Для вероятности появления нулевых разностей (отсутствия межгодовой изменчивости) для марта и сентября отмечается увеличения вероятности появления нулевых значений с увеличением группы



предшествующих нулевых разностей. Первая особенность (для противоположных знаков) отражает устойчивый компонент в стохастической межгодовой изменчивости площади морских льдов. Вторая особенность (для нулевых значений), отражает наличие устойчивых областей в ледовом массиве, не подверженных межгодовым изменениям.

Также рассчитывались и анализировались числовые значения межгодовой изменчивости для положительных и отрицательных разностей в сентябре (табл. 4).

Для сентября отмечается особенность уменьшения значений отрицательной межгодовой разности с увеличением числа отрицательных предшествующих разностей в группе. Так, после одной отрицательной разности среднее значение межгодовой изменчивости составляет -7,7%, в то время, как после четырех отрицательных разностей она сокращается до -3,6%. В марте эта особенность не проявляется. Также (как и для марта) не отмечается зависимость значения положительных разностей, следующих за отрицательными, от числа предшествующих положительных разностей в группе. Однако, (как и в марте) проявляется особенность увеличения значений отрицательной межгодовой изменчивости от количества предшествующих положительных разностей в группе. Так после одной положительной разности среднее для ячейки отрицательное значение межгодовой изменчивости равняется -14,9%, после четырех положительных разностей уже -30,6%.

Таблица 4. Среднее для ячейки значение межгодовой изменчивости для ее знака после групп сочетаний предшествующих знаков в сентябре.

Группа	Среднее значение межгодовой изменчивости, %	
	+	-
----	13,5291	-3,6471
---	15,5669	-4,5175
--	14,6221	-6,0979
-	15,8042	-7,7275
<b>0000</b>	2,6455	-34,0670
<b>000</b>	3,2374	-30,4598
<b>00</b>	5,5976	-25,3966
<b>0</b>	6,8032	-17,6330
<b>++++</b>	27,9574	-30,6313
<b>+++</b>	15,4738	-21,4937
<b>++</b>	18,2851	-15,4723
<b>+</b>	14,6587	-14,9141

Так же, как и для марта, отмечается зависимость значения положительных разностей межгодовой изменчивости от числа предшествующих положительных разностей в группе. Так, после одной положительной разности среднее (для ячейки) значение межгодовой изменчивости равняется 14,7%, после четырех положительных разностях – 28%. Таким образом, в марте и в сентябре после положительных разностей с увеличением числа разностей в группе, значения последующих, как положительных, так и отрицательных межгодовых изменений возрастают.

Для каждой ячейки массива ледовых данных рассчитывались средние модули межгодовой изменчивости (рис. 1).

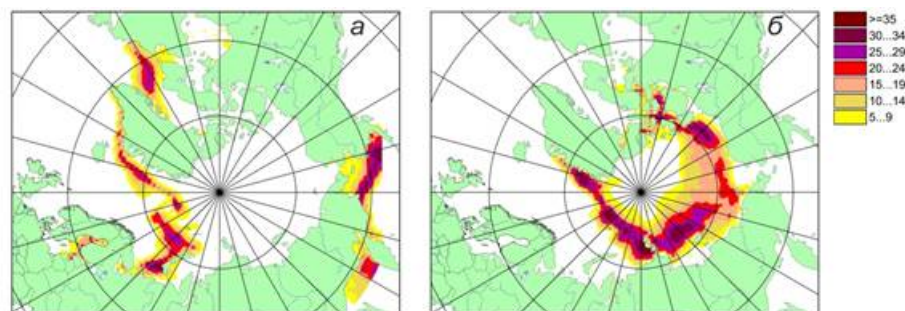


Рис. 1. Средние модули межгодовой изменчивости площади морских льдов, % от площади ячейки.

Известно, что в марте отмечается сезонный максимум распространения морских льдов в Северном полушарии и минимум межгодовой изменчивости [11; 14]. Тем не менее, на общем мало меняющемся фоне, в это время выделяются области, в которых отмечается заметная межгодовая динамика площади морских льдов. Эти области приурочены к устойчивым морским течениям (рис. 1 а). Заметная межгодовая изменчивость площади морских льдов в марте отмечается в море Лабрадор и Девисовом проливе. Эта изменчивость, вероятно, связана с динамикой Западно-гренландского течения [8]. Межгодовая изменчивость в распространении морских льдов отмечается в Датском проливе и Гренландском море, что определяется динамикой Западно-гренландского течения и течения Ирмингера. Изменяется площадь морских льдов в марте также в восточной и северной части Баренцева моря, что связано с Норвежским течением. Также подвержена межгодовым изменениям в марте площадь морских льдов в Беринговом и Охотском морях. В Беринговом море межгодовые изменения в распространении морских льдов, очевидно, связаны с динамикой течения Куросио, в Охотском море – с неустойчивостью Западно-камчатского течения.

Если в марте межгодовая изменчивость в арктическом пространстве представлена фрагментарно, то в сентябре отмечается иная картина. Межгодовая изменчивость площади морских льдов в сентябре образует циркумполярную область, примыкающую с юга приблизительно к границе распространения многолетних льдов (рис. 1 б). В области многолетних льдов расположенной в центре Арктического бассейна и ограниченной зоной заметных межгодовых изменений, межгодовые изменения площади морских льдов не проявляются. Отмеченный характер локализации области заметной межгодовой изменчивости в сентябре связан с сезонным ходом инсоляции и, преимущественно меридиональным направлением сезонного сокращения площади морских льдов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением числа одноименных знаков межгодовой изменчивости в группе вероятность появления разности с противоположным знаком возрастает. Для нулевых значений вероятность появления нулевой разности возрастает с увеличением числа нулевых разностей в предшествующей группе. Таким образом, характер зависимости вероятности знака межгодовой изменчивости от числа предшествующих знаков для положительных и отрицательных знаков отличается от характера зависимости для нулевых значений. В случае знаков, отмечается увеличение вероятности появления межгодовой разности одного знака с увеличением группы предшествующих разностей другого знака. Для вероятности появления нулевых разностей (отсутствия межгодовой изменчивости) для марта и сентября отмечается увеличения вероятности появления нулевых значений с увеличением группы предшествующих нулевых разностей.

Выполненные исследования показали, что, вероятностный диапазон для появления положительных разностей после отрицательных групп в марте больше, чем в сентябре. И наоборот, вероятностный диапазон появления отрицательных разностей после предшествующих положительных в сентябре больше, чем в марте. В марте и в сентябре в периоды, соответственно минимальных и максимальных межгодовых изменений, после положительных разностей с увеличением числа разностей в группе, значения последующих, как положительных, так и отрицательных межгодовых изменений возрастают.

Для марта характерно фрагментарное пространственное расположение областей с заметной межгодовой изменчивостью распространения морских льдов, которые локализованы в районах морских течений и связаны с их межгодовой динамикой. Межгодовая изменчивость площади морских льдов в сентябре образует обширную циркумполярную область, примыкающую с юга к границе распространения многолетних льдов. Такое расположение области заметной межгодовой изменчивости связано с преимущественно меридиональным сезонным сокращением площади распространения морских льдов в соответствии с меридиональным сезонным изменением инсоляции.

Полученные результаты указывают на присутствие в стохастической межгодовой изменчивости площади морских льдов регулярности – механизма стабилизации, что подтверждается увеличением вероятности появления разности одного знака, при увеличении числа предшествующих разностей другого знака в группе. Увеличение вероятности нулевых значений с увеличением числа предшествующих нулевым разностям подтверждает присутствие географических областей, в которых не происходят межгодовые изменения площади морских льдов.

Проведенные исследования могут способствовать повышению достоверности прогнозов межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном полушарии, в периоды их максимального и минимального сезонного распространения.

**Благодарности.** Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики» (121051100167-1) и «Географические основы устойчивого развития энергетических систем с использованием возобновляемых источников энергии» (121051400082-4)

## Библиография

1. Алексеев Г.В., Священников П.Н. Естественная изменчивость характеристик климата северной полярной области и Северного полушария. Л.: Гидрометеиздат, 1991, 160 с.
2. Альтговазен З.Р. Статистические характеристики межгодовой изменчивости среднемесячных температур воздуха // Метеорология и гидрология, 1976, № 10, С. 30–35.
3. Бокс Д., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. М.: Мир, 1974, 406 с.
4. Захаров В.Ф. Льды Арктики и современные природные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1981, 136 с.
5. Кондратьев К.Я. Глобальный климат. СПб., Наука, 1992, 359 с.
6. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова. М.: Наука, 1970, 271 с.
7. Кэнделл М. Временные ряды. М.: Финансы и статистика, 1983, 198 с.
8. Лебедев А.А., Уралов Н.С. Гирометеорологические условия формирования

- аномалии ледовитости в Девисовом проливе // Труды ААНИИ, 1977, Т. 341, С. 53–72.
9. Ледяные образования морей западной Арктики / Ред. Г.К. Зубакин. СПб., ААНИИ, 2006, 272 с.
  10. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л., Гидрометеиздат, 1982, 246 с.
  11. Морской лед / Ред. Фролов И.Е., Гаврило В.П. СПб., Гидрометеиздат, 1997, 402 с.
  12. Фёдоров В.М., Гребенников П.Б., Фролов Д.М. Анализ откликов в динамике площади морских льдов отдельных районов Арктики на изменение инсоляции // Арктика и Антарктика, 2020а, №2. DOI: 10.7256/2453-8922.2020.2.3.31875.
  13. Фёдоров В.М., Гребенников П.Б., Фролов Д.М. Оценка роли инсоляционного фактора в изменениях площади морских льдов в российской Арктике // Криосфера Земли, 2020б. Т.24. №3. с.38-50. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-3(38-50).
  14. Федоров В.М., Гребенников П.Б. Многолетние изменения площади морских льдов в Северном полушарии в связи с изменением характеристик инсоляции // Криосфера Земли, 2021. Т. 25. № 2. С. 38–47. DOI: 10.15372/KZ20210204.
  15. Федоров В.М. Эволюция современного глобального климата Земли и ее возможные причины // Геориск, 2020. Т. 14. № 4. С. 16–29. DOI: 10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29
  16. Шулейкин В.В. Физика моря. М., АН СССР, 1953. 990 с.
  17. Rayner N.A., Parker, D.E., Horton E.B. et al. (2003). Global Analysis of Sea Surface Temperature, Sea Ice, and Night Marine Air Temperature since the Late Nineteenth Century. *J. Geophys. Res.*, 108, D14, 4407. DOI: 10.1029/2002JD002670.
  18. URL: <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html> (дата обращения: 20.06.2023).

## Результаты процедуры рецензирования статьи

*В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.*

*Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).*

Предмет исследования являются, по мнению автора, закономерности особенности межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном полушарии.

Методология исследования, в статье указаны о использовании использовалась база данных Метеорологического центра Хэдли, составленная с использованием эмпирических ортогональных функций и данных инструментальных и визуальных (прежде всего судовых и спутниковых) наблюдений. На основе алгоритмов аппроксимации и экстраполяции доступных данных (оцифрованные карты площади морских льдов, данные судовых и спутниковых наблюдений) с учетом температуры поверхности океана проведена реконструкция площади морских льдов, использовалась методика, основанная на марковских свойствах естественной изменчивости, а также математические и статистические методы с оценкой вероятности событий.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о динамик морских льдов, которая зависит от многих факторов, определяемых геофизическими процессами - температура и влажность воздуха, температура поверхности океана, циркуляционные процессы в атмосфере, морские течения, наличие и структура галоклина, облачность, сток рек, альбедо и др. Основу отмеченных факторов составляет приходящая к Земле солнечная радиация. Это может быть полезным с точки зрения их участия в термических циклах, которые не до конца исследованы в северных

экосистемах, во-вторых, исследование актуально в связи с хозяйственным освоением Арктической зоны, где сосредоточены многочисленные промышленные производства.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований сделать вывод о пространственных и временных особенностях, указывающие на присутствие регулярностей в межгодовой изменчивости характеристик состояния природной среды., для Северного Ледовитого океана найдена тесная связь годового хода среднего модуля межгодовой изменчивости площади морских льдов с годовым ходом облучения Северного полушария со смещением на 2 месяца. Выявлены на основе анализа массива ледовых данных пространственные и временные особенностей в межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном полушарии.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном полушарии, которые могут способствовать повышению достоверности прогнозов в периоды их максимального и минимального сезонного распространения.

Статья содержит разнообразный интересный иллюстративный материал в форме таблиц, рисунков, диаграмм.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и методические рекомендации.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.