

Научная статья

УДК 551.467.3 + 551.326.1

DOI: 10.24412/2658-4255-2023-2-17-32



EDN: GIFQLU

Для цитирования:

Лис Н.А., Чернявская Е.А.,
Миронов Е.У., Тимохов Л.А.,
Егорова Е.С. Информативность
факторов, формирующих
долгопериодные колебания
ледовитости отдельных
районов Баренцева моря //
Российская Арктика. 2023.
Т. 5. № 2. С. 17-32.
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-2-17-32>

Получена: 10.04.2023

Принята: 10.05.2023

Опубликована: 24.05.2023

For citation:

Lis N.A., Cherniavskaia E.A.,
Mironov E.U., Timokhov L.A.,
Egorova E.S. Informativeness
(information-bearing) of
factors forming interannual
variability of the Barents Sea
and its individual areas ice
coveren. Russian Arctic, 2023,
vol. 5, no. 2, pp. 17-32.
(In Russian).
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-2-17-32>

**ИНФОРМАТИВНОСТЬ ФАКТОРОВ, ФОРМИРУЮЩИХ
ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЛЕДОВИТОСТИ
ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

Н.А. Лис* , Е.А. Чернявская , Е.У. Миронов, Л.А. Тимохов,
Е.С. Егорова

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: nalis@aari.ru

Аннотация

Проанализированы различные факторы, формирующие долгопериодные изменения ледовитости западного, северо-восточного и юго-восточного районов Баренцева моря за период 1950–2022 годы. Отмечены совпадающие циклические колебания между ледовитостью и индексами атмосферной циркуляции (5 - 7 и 8 - 14 лет), с атлантическим мультитендекадным колебанием (5 - 9 лет), солнечной активностью (10 лет), параметрами нутации оси вращения Земли и другими астрогеофизическими характеристиками (6, 9 и 10 лет). Построены уравнения множественной регрессии для зимнего и летнего сезонов для каждого района. Оценены сопряженность и вклад каждого предиктора. Показано, что факторы, формирующие межгодовую изменчивость ледовитости, различаются в зависимости от района и сезона. Наибольший вклад в общую дисперсию ледовитости Баренцева моря в западном и северо-восточном районах вносит предшествующее состояние ледяного покрова (78% и 74% соответственно), а в юго-восточном – приповерхностная температура атмосферы (45%).

Ключевые слова: Баренцево море, ледовитость, информативность, межгодовая изменчивость, регрессия, цикличность, статистическое моделирование

**INFORMATIVENESS (INFORMATION-BEARING) OF
FACTORS FORMING INTERANNUAL VARIABILITY OF
THE BARENTS SEA AND ITS INDIVIDUAL AREAS ICE
COVEREN**

N.A. Lis* , E.A. Cherniavskaia , E.U. Mironov, L.A. Timokhov,
E.S. Egorova

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

E-mail: nalis@aari.ru

Abstract

The various combinations of factors that form an interannual variability of ice coveren in the western, northeastern and southeastern parts of the Barents Sea were analysed for the period 1950 - 2022. The co-phased cyclic fluctuations between the Barents Sea ice coveren and atmospheric circulation indices (5 - 7 and 8 - 14 years), Atlantic multidecadal oscillation (5 - 9 years), solar activity (10 years), parameters of the Earth's rotation axis and other astrogeophysical characteristics (6, 9 and 10 years) were reported. Multiple regression equations for the winter and summer seasons for each part of the Barents Sea were formed. The connecting of each predictor with ice coveren variability and their contribution to the ice coveren total dispersion were evaluated. It was shown that the set of factors forming interannual variability of the Barents Sea ice coveren is differs depending on the area and season. It appears that previous state of the ice coveren has the greatest impact at the ice coveren variability in the western and the northeastern parts of the Barents Sea (78% and

74% of total dispersion respectively). And in the southeastern part of the Barents Sea the highest impact at the ice cover volatility has the atmosphere temperature variability – 45% of total dispersion.

Keywords: Barents Sea, ice coverage, informativeness, interannual variability, regression, cyclic processes, statistical modeling

Введение

Баренцево море относится к Атлантической климатической области Арктики [1] и одним из первых реагирует на современные изменения климата. Южная часть моря находится под влиянием тепла, поступающего в его акваторию с Северо-Атлантическим течением [2 - 4], благодаря чему обеспечивается круглогодичное функционирование крупнейшего незамерзающего порта заполярья в г. Мурманск. В северных районах Баренцева моря преобладает влияние холодных арктических течений и льдов, что формирует сложную динамическую систему взаимодействия водных масс на всей его акватории [2, 5].

Арктический морской лед очень чувствителен к изменениям климата и его состояние может служить в качестве индикатора этих изменений. В настоящее время наблюдается уменьшение ледовитости в Северном Ледовитом океане (СЛО) в целом [6, 7]. Наиболее заметно сокращение площади льда в окраинных арктических морях, и Баренцево море является одним из лидеров, где скорость уменьшения сплоченности морского льда за период 1979–2014 годы составляла - 0,52% в год [8]. Так, за последние 20 лет ледовитость Баренцева моря в летний сезон сократилась в три раза [9]. При этом сокращение ледяного покрова наблюдается не только на пике его минимального развития, но в зимний сезон [10]. Баренцево море – единственное из арктических морей, где уменьшение ледовитости наиболее интенсивно происходит именно в зимне-весенний период [8].

Исследованию ледовитости Баренцева моря посвящено множество работ. Например, в [3] автор обобщил имеющиеся данные по основным элементам ледового режима районов Баренцева моря, а также предложил новые методы прогнозов изменения ледового режима заблаговременностью от одного до шести месяцев. Другие авторы рассматривали либо особенности всей акватории моря целиком [6, 10 - 12], либо только его юго-восточного района [13]. Однако, отдельные районы моря, в силу особенностей своих гидрологических и ледовых режимов, имеют существенные различия [3, 9] и исследование факторов, формирующих ледовитость в каждом отдельном районе, особенно в современных условиях меняющегося климата, актуально как никогда.

В изменчивости ледовитости Баренцева моря выделяются низкочастотные колебания с периодами 6–8, 9–11 и 22 года и более высокочастотные с периодами 2–4 года [12]. Циклы с периодами 6–8 лет проявляются и в атмосферной циркуляции, и в глобальных аномалиях температуры атмосферы и уровня моря [14]. Данные периоды близки к лунным циклам продолжительностью 18,6, 8,85 и 6 лет, что вероятно и проявляется в наличии выявленных периодичностей [15]. Во многих работах предполагается, что указанные ритмы формирует, так называемый, 11-летний цикл солнечной активности, который колеблется в пределах от 8 до 14 лет. Также в работе [16] приводится ряд аргументов в пользу того, что 19-летний цикл представляет собой сумму 8 и 11 летних колебаний, которые в свою очередь образованы сериями (2+3+3) и (2+3+3+3) лет соответственно.

Воздействие солнечной активности на данном уровне развития науки напрямую измерить невозможно. Предполагается, что ее влияние проявляется через возмущение магнитного поля и циркуляцию атмосферы. Нутационные движения Земли также не равномерны и испытывают колебания [16, 17]. По терминологии А.С. Мониной [18] колебания 2 - 4 года относятся к межгодовым, 6–8, 9–11 и 22 года – к внутривековым. В данной работе рассматриваются долгопериодные колебания, включающие в себя и межгодовые и внутривековые циклы, которые связаны с воздействием как гидрометеорологических, так и астрогеофизических процессов.

Акватория Баренцева моря – важная часть Северного морского транспортного коридора, функционирование и развитие которого напрямую зависят от ледовых условий в арктических морях СЛО. Поэтому задача по развитию методов прогнозирования долгопериодных изменений ледовитости актуальна как никогда. В данной статье для исследования изменчивости ледовитости применяются методы, базирующиеся на статистическом моделировании, которые, в перспективе, позволяют получать долгопериодные прогнозы (на несколько лет вперед). Качество этих прогнозов во мно-

гом будет зависеть от подобранных предикторов, которые будут отражать не только уже установленные ранее физически взаимосвязанные процессы, но и иметь статистически значимые и устойчивые связи. Поэтому, целью данной работы является исследование информативности различных комбинаций факторов, которые формируют изменения ледовитости в Баренцевом море.

Данные и методы

В работе анализируется изменчивость ледовитости западного, северо-восточного и юго-восточного районов Баренцева моря (рис. 1) в зимний и летний сезоны за период 1950–2022 годы. Границы исследуемых районов для удобства и унификации обозначены также, как в работе Миронова [3].

Под информативностью понимается вносимый предикторами вклад в изменчивость моделируемого предиктанта (ледовитости), выраженный в долях от единицы или процентах от дисперсии ряда. В работе использовались данные по среднемесячным значениям ледовитости, которые рассчитываются в ААНИИ. Для дальнейшего анализа было выполнено осреднение по периодам с декабря по апрель (зимний сезон) и с июля по сентябрь (летний сезон) [3].

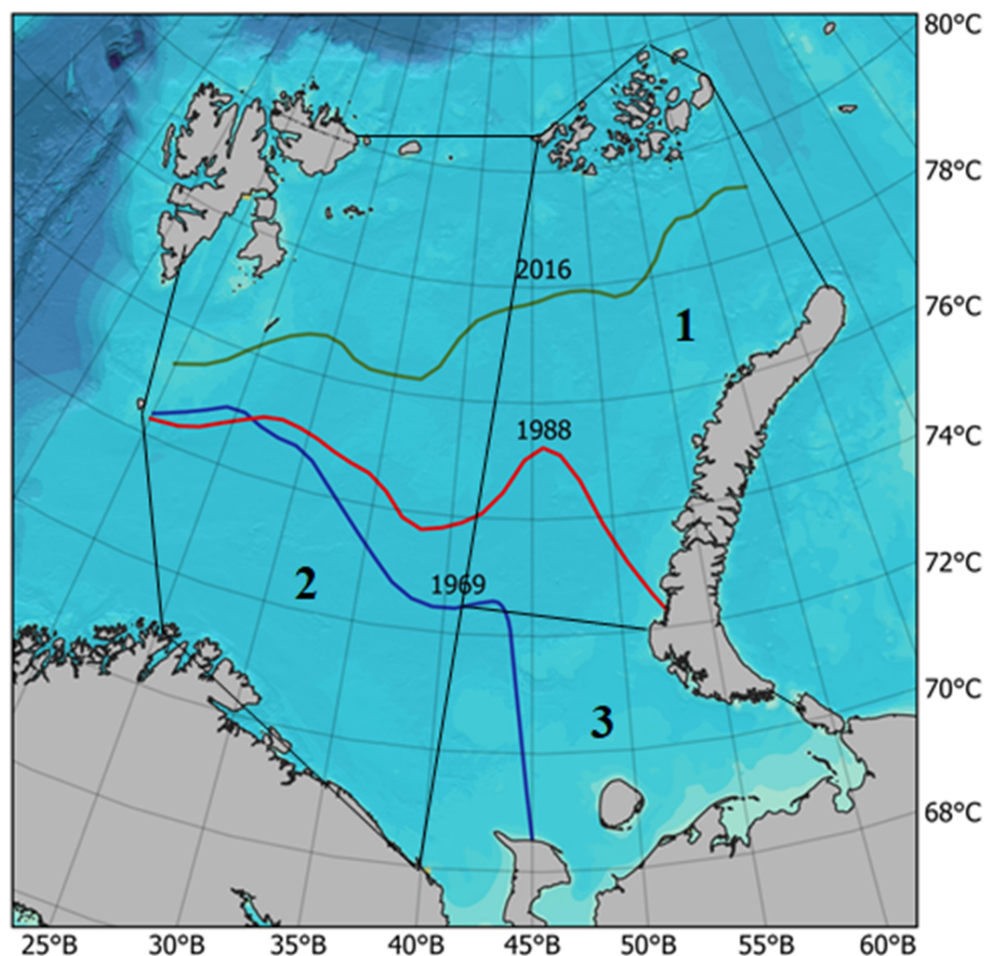


Рисунок 1. Границы районов с однородными ледовыми условиями (черные линии): 1 – северо-восточный, 2 – западный, 3 – юго-восточный районы. Цветные линии – расположение кромки льдов в зимний сезон за характерные годы

Для выявления зависимости изменений ледовитости от различных гидрометеорологических и астрогеофизических факторов применялись физико-статистические методы анализа с использованием мультирегрессионных моделей (метод включения переменных) [19], которые строились с помощью программного пакета Статистика [20]. В качестве предикторов использовались различные гидрометеорологические и астрогеофизические параметры, их список приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Гидрометеорологические и астрогеофизические параметры, используемые в качестве предикторов для уравнений

Гидрометеорологические параметры	
индекс Арктического колебания, АО	www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/ao/
индекс Арктического диполя, AD	Предоставлен Janout M.A. (Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research (AWI) Bremerhaven, Germany), [21]
Тихоокеанско-Североамериканский индекс, PNA	www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/pna/
Североатлантическое колебание, NAO	www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/nao/
Атлантическое мульти декадное колебание, AMO	www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/
приповерхностная температура воздуха ПТВ	http://iridl.ldeo.columbia.edu/
Астрогеофизические параметры	
аномалии расстояния между Землей и Солнцем, С	astro.ukho.gov.uk/nao/lvm/#tabs-d3
поправки к широтной и долготной координатам положения полюса Земли dX и dY	https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=C01&lang=en
параметры нутации оси Земли в долготе и наклоне Δψ и Δε	https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=C01&lang=en
числовой показатель солнечной активности – числа Вольфа Wolf	solarscience.msfc.nasa.gov/

К каждому предиктору, который предполагалось включить в рабочий массив данных, предъявлялся ряд требований. Прежде чем анализировать сопряженность процессов с помощью статистических методов, была изучена взаимосвязь самих процессов, формирующих ледовитость Баренцева моря, с параметрами, которыми данные процессы могут быть представлены.

Информативность предикторов определялась путем численных экспериментов, в ходе которых отсеивались предикторы с наименьшим вкладом в изменчивость ледовитости каждого из районов Баренцева моря. В результате были получены физико-статистические уравнения для зимнего и летнего сезонов. Качество воспроизведения фактической ледовитости полученными уравнениями оценивалось с помощью коэффициента корреляции R и коэффициента детерминации R².

Сопряженность гидрометеорологических и астрогеофизических параметров с ледовитостью

В работе [22] было установлено, что одним из важнейших факторов, формирующих ледовитость, является ветер. Потоки воздуха механически воздействуют на подстилающую поверхность, усиливая или ослабляя скорость поверхностных течений и дрейф льдов [2, 3, 23]. В свою очередь, изменчивость параметров ветра зависит от барической обстановки в регионе – расположения относительно друг друга зон повышенного и пониженного давления. К климатическим факторам, описывающим барическую обстановку, относятся следующие индексы (таблица 1):

- Индекс Арктического колебания (АО) характеризует барическую обстановку в Северном полушарии [24]. В зависимости от фазы (положительной или отрицательной) западный перенос воздушных масс между средними и высокими широтами будет усиливаться или ослабевать, соответственно.
- Индекс Североатлантического колебания (NAO) характеризует западно-восточный перенос воздушных масс в зависимости от углубления или ослабления центров действия атмосферы (ЦДА) – Исландского минимума и Азорского максимума [25, 26].
- Индекс Арктического диполя (AD) так же имеет положительную и отрицательную фазы и характеризует движение воздушных масс либо в сторону морей Северо-Европейского бассейна, либо в сторону Берингова пролива [27].
- Индекс Тихоокеанско-североамериканского колебания (PNA) характеризует изменение направления и интенсивности Атмосферной циркуляции над территориями Западной Европы, Северной Америки и центральной частью Тихого океана [28].

- Влияние адвективного переноса тепла, поступающего с Северо-Атлантическим течением, учитывалось с помощью индекса Атлантического мультидекадного колебания (АМО). Индекс АМО характеризует аномалии поверхностной температуры воды в районе Северной Атлантики [11, 29, 30].

Перечисленные гидрометеорологические характеристики и механизмы их взаимодействия с ледовитостью неоднократно описывались во многих работах [31 - 33]. В тоже время связь изменения климата Арктики и астрогеофизических параметров до сих пор остается дискуссионным вопросом. Однако, в ряде работ [16, 17, 34] приводятся результаты исследования этих механизмов и предлагаются различные аргументы в пользу использования астрогеофизических параметров. Например, показывается сопряженность их циклических вариаций [6]. А также то, что низкочастотные колебания многих гидрометеорологических характеристик, включая ледовитость морей, обусловлены циклическим (50–60 лет) колебанием. Данные циклы, по одной из гипотез, связаны с изменением расстояния между Землей и Солнцем [35], по другой – с межпланетарными гравитационными силами [16].

Перед анализом временных рядов ледовитости, гидрометеорологических и астрогеофизических параметров из них был удален линейный тренд. Затем рассчитан коэффициент парной корреляции и проверен на значимость (при уровне значимости 0,05). Статистически значимые коэффициенты приведены в таблице 2. Наибольшие коэффициенты корреляции отмечаются с индексом АМО (с заблаговременностью от двух до четырех лет) и с приземной температурой воздуха. Связь ледовитости с индексом АМО отрицательна и для западного, северо-восточного и юго-восточного районов максимальные по модулю коэффициенты составляют соответственно 0,51, 0,45 и 0,25. Между ледовитостью с приземной температурой воздуха также отмечается отрицательная связь, которая наиболее сильно проявляется в зимний сезон: модули коэффициентов корреляции для западного и северо-восточного районов больше 0,7, для юго-восточного района – несколько меньше и составляет 0,46. Отметим, что для летней ледовитости юго-восточного района сохраняется значимая отрицательная связь с зимней приземной температурой воздуха (модуль коэффициента корреляции 0,45).

Для юго-восточного района моря не удалось получить значимых коэффициентов корреляции ни с гидрометеорологическими, ни с астрогеофизическими характеристиками. Это может объясняться тем, что данный район находится под влиянием дрейфующих льдов, поступающих из акватории Белого моря, теплых вод Северо-Атлантического течения, речного стока Печоры и ледообмена с Карским морем, которые, в совокупности, формируют сложную структуру юго-восточной части акватории Баренцева моря [2, 3, 9]. По-видимому, для описания столь сложного взаимодействия различных факторов помимо предикторов глобального масштаба должны использоваться и более локальные параметры.

Стоит отметить, что значения парного коэффициента корреляции между ледовитостью и индексами атмосферной циркуляцией довольно низкие ($t_{кр}$ близко к пороговому значению) или вовсе не значимые (ниже порогового значения $t_{кр}$). Индекс NAO имеет значимый коэффициент корреляции лишь с ледовитостью юго-восточного района (зимний сезон). Тогда как при использовании анализа множественной регрессии вносит значимый вклад практически во всех районах.

Анализ циклических гидрометеорологических и астрогеофизических параметров и ледовитости позволил дополнить понимание сопряженности этих процессов. Для каждого из предполагаемых предикторов была построена периодограмма, аналогичная графикам распределения спектральной плотности ледовитости [12]. По спектрограммам были выделены пики спектральных плотностей, а соответствующие им годы (периоды колебаний) занесены в таблицу 3, где полужирным шрифтом также выделены периоды, совпадающие с циклами ледовитости.

При исследовании циклических колебаний особое внимание было уделено периодам, совпадающим для гидрометеорологических и астрогеофизических характеристик и ледовитости. Высокочастотные колебания (менее 3 лет) отмечаются практически во всех рассматриваемых характеристиках и, вероятнее всего, связаны с локальными процессами, возникающими в результате взаимодействия океана и атмосферы и под влиянием атмосферной циркуляции [6]. Циклические колебания с периодами 5, 6, 7 лет и от 8 до 13 лет характерны для всех гидрометеорологических индексов. Наибольшее количество совпадений по периодам циклических колебаний между ледовитостью и индексом NAO, что говорит о сопряженности ледовитости и флуктуаций силы и направления западного переноса с глобальными механизмами, которые их формируют. Например, данные колебания могут быть связаны, в том числе, с влиянием 11-летнего цикла солнечной активности. Последний, в свою очередь, представляет собой осредненный период относительно минимумов солнечной активности, наступающих каждые 8–14 лет [35]. Либо с комбинациями 2-х и 3-х летних периодичностей [16].

Таблица 2.

Коэффициенты парной корреляции между ледовитостью отдельных районов Баренцева моря в зимний и летний сезоны и гидрометеорологическими и астрогеофизическими параметрами за 1950 - 2022 годы

Гидрометеорологические характеристики														
	AMO ₋₂	AMO ₋₃	AMO ₋₄	NAO _w	ПТВ(НМ) _{w-1}	ПТВ(НМ) _{Spring-1}	ПТВ(НМ) _{Aut-1}	Ta(БМ) _w	Ta(БМ) _s	AO _w	AD _s			
L _w (West)	-0,42	-0,43	-0,51	-	-0,40	-0,29	-0,42	-0,78	-	0,29	-			
L _s (West)	-	-	-	-	-0,25	-	-0,20	-	-0,30	0,21	-			
L _w (N-E)	-0,45	-0,43	-0,43	-	-0,51	-0,35	-0,49	-0,75	-	0,29	-			
L _s (N-E)	-0,35	-0,41	-0,41	-	-0,41	-0,28	-0,39	-	-0,33	-	-			
L _w (S-E)	-0,25	-	-	-0,35	-0,34	-0,32	-0,24	-0,46	-	-	-			
L _s (S-E)	-	-	-0,24	-	-0,21	-0,29	-	-0,45	-	0,23	0,22			
Астрогеофизические характеристики														
	dX	dX ₋₁	dY	dY ₋₁	Δψ	Δψ ₋₁	Δψ ₋₂	Δψ ₋₃	Δε	Δε ₋₃	Wolf _s	Wolf _w	C _s	C _w
L _w (West)	-0,45	-0,26	-0,23	-	-0,30	-0,31	-0,28	-0,23	-	-	-	-	-	-
L _s (West)	-	-	-0,38	-0,38	-0,28	-0,30	-0,29	-0,25	-	-	0,21	-	-	-
L _w (N-E)	-0,45	-0,31	-	-	-0,37	-0,38	-0,34	-0,27	-	-0,25	0,28	0,27	-	-
L _s (N-E)	-0,37	-0,31	-0,33	-0,28	-0,33	-0,36	-0,35	-0,30	0,21	-	-	-	-0,21	0,27
L _w (S-E)	-0,25	-0,34	-0,22	-0,21	-0,22	-0,21	-	-	-	-	0,32	0,21	-	0,35
L _s (S-E)	-0,21	-	-0,24	-0,21	-0,24	-0,21	-	-	-	-0,21	-	-	-	-

Примечание. L(West) – ледовитость Западного района; L(N-E) – ледовитость Северо-Восточного района; L(S-E) – ледовитость Юго-Восточного района; S – летний, W – зимний, Spr – весенний и Aut – осенний сезоны; AMO – индекс Атлантического мультидекадного колебания; NAO – индекс Североатлантического колебания; ПТВ – приповерхностная температура воздуха; AO – индекс Арктического колебания; AD – индекс Арктического диполя; X и Y – поправки к широтной и долготной координатам положения полюса Земли; Δψ и Δε – параметры нутации оси Земли; Wolf – числа Вольфа; C – изменение расстояния от Земли до Солнца; НМ и БМ – Норвежское и Баренцево моря; -1, -2, -3, -4 – заблаговременность относительно ледовитости в годах.

Таблица 3.

Периоды циклических колебаний гидрометеорологических индексов и астрогеофизических параметров, выделенные по пикам спектральной плотности

Параметр / индекс	Периоды циклических колебаний в годах				
	более 14	8 - 13	6-8	3-5	менее 3
AO _w	17,5	8,8	-	4,4; 3,7	2,8; 2,4
AO _s	17,5	10 14	7,0	4,4	2,8; 2,3
AD _w	17,5	14	7,0	5,0; 3,5	2,7; 2,4
AD _s	-	11,7	7,0	4,1; 3,3	2,9; 2,4
PNA _w	-	-	7,8	3,7	2,5; 2,3
PNA _s	-	11,7	7,0	4,4; 3,3	2,3
AMO	16,4	9,1	7,5; 6,1	5,3; 4,6; 3,6	2,5
NAO _w	38,8	13,9	7,8	5,7; 5,0	2,7; 2,4
NAO _s	32,2	13,9; 8,8	7,2	5,5; 4,0; 3,5	2,7; 2,3
Wolf	-	11,5; 10,2	-	5,4; 3,8; 3,3	2,7; 2,4
C _w	18,6	13,1; 8,4	6,1	4,0	2,7
C _s	18,6	9,2	6,1	4,0	2,7
Δε	18,6	9,2	-	-	-
Δψ	18,6	9,2	-	-	-
dX	-	10,2	6,6	-	-
dY	-	9,2	6,1	-	-

Примечание. AO – индекс Арктического колебания; AD – индекс Арктического Диполя; PNA – индекс Тихоокеанско-Североамериканского колебания; AMO – Атлантическое мультидекадное колебание; NAO – Североатлантическое колебание; Wolf – числа Вольфа; C – изменение расстояния от Земли до Солнца;

$\Delta\psi$ и $\Delta\epsilon$ – параметры нутации Земли; dY , dX – поправки к широтной и долготной координатам положения полюса Земли; латинскими буквами обозначаются сезоны – S (лето), W (зима); полужирным шрифтом выделены периоды, совпадающие с циклами ледовитости.

В колебаниях астрогеофизических параметров выделяются циклы с периодами 6 – 7 лет и 9–10 лет, которые так же отмечаются и в колебаниях ледовитости Баренцева и Гренландского морей [12]. Цикл 6–7 лет обнаруживается в колебаниях изменения положения полюса Земли, причем этот цикл совпадает с 7- летним колебанием изменения скорости вращения Земли [37] и с 7-летним циклом, формирующимся наложением вынужденного двенадцатимесячного колебания оси вращения Земли и свободного четырнадцатимесячного Чандлеровского колебания [34, 35, 38]. Цикличность с периодами 9–10 лет, вероятнее всего, сформирована либо влиянием 11-летнего цикла солнечной активности [36], либо комбинациями 2-х и 3-х летних периодичностей [16].

Таким образом, наличие совпадающих цикличностей является дополнительным аргументом в пользу включения составляющих нутации оси вращения Земли ($\Delta\psi$ и $\Delta\epsilon$), изменения координат её полюса, а также индексов атмосферной циркуляции в качестве предикторов при разработке статистических уравнений долгопериодных изменений ледовитости Баренцева моря.

Статистические уравнения связи ледовитости с гидрометеорологическими и астрогеофизическими параметрами

Построение статистических уравнений выполнялось путем перебора различных комбинаций для получения уравнения с наиболее высокими коэффициентами корреляции и детерминации. Переменные, входящие в состав уравнений, проверялись на значимость. Для каждого предиктора p-level составил менее 0,05 (менее 5% вероятности, что связь предиктора и предиктанта случайна). В результате, для всего исследуемого периода 1951–2022 гг. построены уравнения множественной регрессии с соответствующими им коэффициентами корреляции и детерминации (таблица 4). Для всех коэффициентов корреляции R критерий Стьюдента был равен $\pm 0,21$ при уровне значимости $\alpha=0,05$. Также все уравнения прошли успешную проверку на адекватность по критерию Фишера. Стандартное отклонение расчетного ряда не превышало среднеквадратического отклонения (СКО) фактической ледовитости. Так же был проведен ряд экспериментов с полученными уравнениями, в результате которых было показано сохранение устойчивости связи до 15 лет (рабочая выборка 1951–2006 годы, независимая 2007–2022 годы). Результаты экспериментов представлены в таблице 4 в виде коэффициентов детерминации по рабочей выборке 1951–2006 годы R^{2*} .

Таблица 4.
Статистические уравнения связи ледовитости Баренцева моря с гидрометеорологическими и астрогеофизическими факторами за период 1951–2022 годы

№	Уравнение	R	R ²	R ^{2*}
Западный район				
1	$L_W = 0,22 \cdot L_{AUT-1} - 1,76 \cdot ПТВ_W - 7,81 \cdot АМО_{-2} - 2,22 \cdot NAO_{W-1} - 0,51 \cdot \Delta\epsilon_{-3} - 0,39 \cdot dX + 25,56$	0,90	0,81	0,80
2	$L_S = 0,51 \cdot L_{SPR} + 2,24 \cdot PNA_S - 2,31 \cdot AO_S + 0,01 \cdot Wolf_W - 0,28 \cdot dY_{-1} + 6,50$	0,92	0,85	0,85
Северо-восточный район				
3	$L_W = - 2,65 \cdot ПТВ_W - 0,16 \cdot АМО_{-4} - 5,18 \cdot NAO_{W-1} - 0,77 \cdot AO_W + 0,04 \cdot Wolf_{S-1} + 50,81$	0,88	0,78	0,78
4	$L_S = 0,35 \cdot L_{SPR} - 2,46 \cdot ПТВ_S - 0,11 \cdot АМО_{-4} + 1,69 \cdot PNA_S - 1,37 \cdot NAO_S - 0,35 \cdot dY + 16,57$	0,90	0,80	0,79
Юго-восточный район				
5	$L_W = - 1,36 \cdot ПТВ_W - 7,59 \cdot NAO_W - 3,68 \cdot PNA_{S-1} - 0,11 \cdot \Delta\epsilon_{-3} - 0,11 \cdot dX_{-1} + 0,05 \cdot Wolf_W + 42,83$	0,65	0,47	0,45
6	$L_S = -0,28 \cdot ПТВ_W + 1,04 \cdot AD_{S-1} - 1,28 \cdot AO_{W-1} - 0,57 \cdot NAO_W - 0,14 \cdot \Delta\epsilon_{-3} - 2,04$	0,59	0,35	0,34

Примечание. L – ледовитость; ПТВ – приповерхностная температура воздуха в соответствующем районе; $\Delta\epsilon$ – параметр нутации оси Земли; NAO – индекс Североатлантического колебания; AD – индекс Арктического диполя; AO – индекс Арктического колебания;

PNA – индекс Тихоокеанско-североамериканского колебания; АМО – индекс Атлантического Мультидекадного колебания; Wolf – числа Вольфа; dX и dY – поправки к широтной и долготной координатам положения полюса Земли; латинскими буквами обозначаются сезоны – S (лето), AUT (осень), W (зима), SPR (весна); -1, -2, -3 – опережение параметра на 1, 2 и 3 года соответственно; R – коэффициент корреляции между фактическими и расчетными значениями; R² – коэффициент детерминации; R^{2*} – коэффициент детерминации для случая проверки на устойчивость на 16 годах.

Подобранные комбинации предикторов демонстрируют тесную связь с ледовитостью западного и северо-восточного районов, и среднюю/заметную – с ледовитостью юго-восточного района. Следует отметить, что во всех уравнениях связи (за исключением уравнения для летнего сезона западного района), в качестве предикторов участвуют приземная температура воздуха и NAO. Другие наиболее часто используемые предикторы (в трех уравнениях из шести): ледовитость предыдущего сезона, АМО, АО, PNA, числа Вольфа и нутация Δε.

При проверке устойчивости полученных статистических уравнений был выполнен ряд следующих экспериментов. Из временных рядов были выделены независимые выборки длиной от семи лет и более (периоды 2016–2022 годы, 2015–2022 годы и т.д.). На зависимых выборках (периоды 1951–2015 годы, 1951–2014 годы и т.д.) были получены новые числовые коэффициенты с помощью составленных ранее статистических уравнений связи ледовитости с гидрометеорологическими и астрогеофизическими характеристиками. В результате, было установлено, что уравнения сохраняют свою устойчивость вплоть до 16 лет. Результаты моделирования с рабочей выборкой для периода 1951–2006 годы представлены в таблице 4 (коэффициент детерминации R^{2*}), моделирования с независимыми выборками на рисунке 2 (для периода 2017–2022 годы – зеленая линия, для периода 2007–2022 годы – синяя линия). При сравнении характеристик качества моделей, отмечено, что коэффициент детерминации укороченного ряда (R^{2*}) для уравнений изменчивости ледовитости отдельных районов Баренцева моря уменьшился не более чем на 0,02 (таблица 4). Это связано в первую очередь с более короткой длиной ряда (на 16 лет). Малое уменьшение коэффициента детерминации говорит о высокой устойчивости полученных уравнений, по крайней мере, на 16 годах.

В целом смоделированная ледовитость с достаточно высокой синхронностью повторяет фактическую изменчивость. Причем, данная закономерность лишь незначительно меняется на независимом ряду, начиная с 2006 года.

Информативность различных факторов в зависимости от вариаций комбинаций предикторов в статистических уравнениях

Исследование информативности различных предикторов выполнялось по уравнениям 1–6 (таблица 4) путем вычисления доли вклада предиктора в общую дисперсию ледовитости, принимаемую за 100%. Результаты оценок приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Вклад (%) предикторов в уравнениях связи ледовитости Баренцева моря с гидрометеорологическими и астрогеофизическими параметрами за период 1951–2022 годы

Предикторы Районы и сезоны	ПТВ	L	АМО	АО	AD	NAO	PNA	Wolf	dX	dY	Δε
West W	9,3	61,3	16,4	-	-	6,1	-	-	3,5	-	3,4
West S	-	78,1	-	5,1	-	-	5,7	4,1	-	7,0	-
N-E W	73,5	-	8,6	5,6	-	8,4	-	3,9	-	-	-
N-E S	7,3	75,7	6,9	-	-	1,4	2,0	-	-	6,7	-
S-E W	19,6	-	-	-	-	19,2	4,9	6,5	13,5	-	36,3
S-E S	45,3	-	-	7,8	7,8	5,9	-	-	-	-	33,2

Примечание. L – ледовитость; ПТВ – приповерхностная температура воздуха соответствующего района; Δε – параметр нутации оси Земли; NAO – индекс Североатлантического колебания; AD – индекс Арктического диполя; АО – индекс Арктического колебания; PNA – индекс Тихоокеанско-североамериканского колебания; АМО – индекс Атлантического Мультидекад-

ного колебания; Wolf — числа Вольфа; X и Y — поправки к широтной и долготной координатам положения полюса Земли; районы: West — западный, N-E — северо-восточный, S-E — юго-восточный. Сезоны: S — летний, W — зимний.

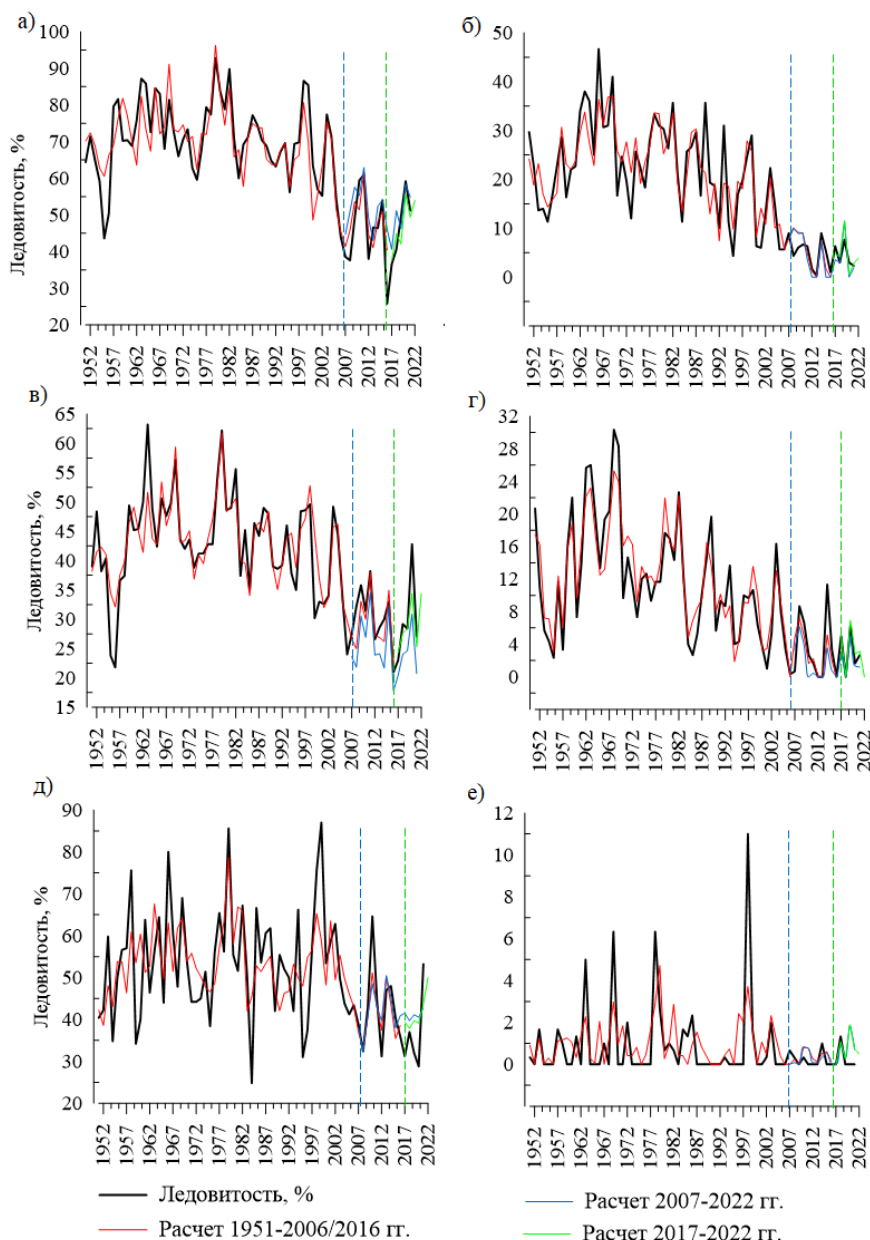


Рисунок 2. Сопоставление фактических и восстановленных по уравнениям значений ледовитости отдельных районов Баренцева моря (а, в, д – зимний, б, г, е – летний сезоны): а, б – западный район; в, г – северо-восточный район; д, е – юго-восточный район за период 1951–2022 годы

Примечание. Вертикальными пунктирными линиями обозначены границы рабочих (1951–2016 гг., зеленая; 1951–2006 гг., синяя) и независимых (2017–2022 гг.; 2007–2022 гг.) выборок.

Анализ выполненных расчетов позволяет сделать следующие выводы. Для ледовитости западного района Баренцева моря характерным является преобладающее влияние предшествующего состояния ледяного покрова как в зимний (вклад 61,3%), так и в летний (вклад 78,1%) сезоны (таблица 5). Это связано с высокой (относительно других районов) инерционностью положения кромки морских льдов, которой способствует расположенный в районе Шпицбергена массив сплоченных однолетних и многолетних льдов. Помимо этого, несколько восточнее Шпицбергена, так же в северной части западного района, где глубины не превышают 200 м, происходит вынос льдов из Арктического бассейна с холодными водами Восточно-Шпицбергенского течения [3]. Влияние адвекции атлантических вод в западном районе также достаточно сильно проявляется. Связано это с тем, что в более глубоководной части западного района (южнее в сторону Скандинавии) происходит поступление теплых

атлантических вод с Северной и Центральной ветвями Норвежского течения в районе Медвежинского желоба и Центрального плато и с Нордкапским течением (у берегов Скандинавии) [38]. Это влияние моделируется индексом АМО, вклад которого в изменчивость ледовитости района составляет 16,4% в зимний сезон (таблица 5). В северо-восточном и юго-восточном районах влияние притока теплых атлантических вод уменьшается и преобладающее влияние оказывает изменчивость приземной температуры атмосферы, которая описывает до 73,5% изменчивости в северо-восточном и до 45% изменчивости в юго-восточном районах (таблица 5). Это может быть связано с интенсивной циклонической активностью и ледообменом с Карским морем.

Несмотря на то, что атмосферная циркуляция вносит значительно меньший вклад (по отдельным предикторам от 1,4 до 8,4%) в изменчивость ледовитости западного и северо-восточного районов Баренцева моря по сравнению с предшествующим состоянием ледовитости и температурой воздуха, ее влияние имеет вполне понятный физический смысл. В юго-восточном районе заметно влияние температуры приземного воздуха и атмосферной циркуляции. Вклад приповерхностной температуры атмосферы составляет 45,3% в зимний и 19,6% в летний сезоны. А предшествующее состояние ледовитости из-за её низкой инерционности, не проявляется вовсе. Интенсивность Северо-Атлантического колебания в зимний сезон имеет максимальное развитие в марте [26], что проявляется практически во всех уравнениях для ледовитости как зимнего, так и летнего сезонов. Аналогичная ситуация наблюдается и в уравнениях описания долгопериодной изменчивости ледовитости Гренландского моря [40, 41]. Длительное сохранение отрицательной фазы NAO приводит к усилению меридионального переноса воздушных масс и, как следствие, увеличению интенсивности поступления теплых атлантических вод в Северо-Европейский бассейн, включая и Баренцево море, что приводит к уменьшению ледовитости. Положительная фаза NAO приводит к противоположному воздействию. В летний сезон уменьшается градиент давления между высокими и средними широтами, происходит интенсификация меридионального переноса. В то же время, влияние NAO снижается, а атмосферная циркуляция моделируется индексами AO и PNA. Описанные особенности атмосферной циркуляции проявляются в уравнениях всех районов для зимнего сезона, а вклад NAO превышает таковой для летнего сезона и составляет 6,1% (западный район), 8,4% (северо-восточный район) и 19,2% (юго-восточный район). Наибольший вклад атмосферная циркуляция вносит в описание изменчивости ледовитости юго-восточного района и составляет суммарно 21,5% для летнего и 24,1% для зимнего сезонов. Вероятно, это связано с тем, что представленные уравнения для юго-восточного района не учитывают речной сток (влияние которого значительно) и ледообмен с Карским морем из-за отсутствия рядов данных за весь рассматриваемый период. В этой связи, данный район требует дальнейшего исследования с расширенным набором более локальных предикторов и за более короткий период.

Связь между ледовитостью Баренцева моря, поправками к широтной и долготной координатам положения полюса Земли и нутацией оси вращения Земли обратная. В положительную фазу, геострофический поток воды имеет доминирующее направление в сторону Центрального Арктического бассейна от средних широт из-за изменения наклона уровня [34]. Что приводит к усилению интенсивности поступления теплых вод из Северной Атлантики в Баренцево море, и ослаблению дрейфа льдов и холодных вод из Центрального Арктического бассейна, способствуя уменьшению ледовитости. На долю нутации оси вращения Земли в наклоне ($\Delta\epsilon$) приходится от 3,4% (западный район) до 36,3% (юго-восточный район) изменчивости общей дисперсии ледовитости. Связь ледовитости с нутацией проявляется через температуру атмосферы. Дело в том, что изменение наклона оси вращения Земли приводит не только к изменению наклона уровня, но и к большему (меньшему) нагреву поверхности Земли и воздуха вследствие инсоляции. На данный момент происходит уменьшение угла наклона оси вращения Земли, что приводит к увеличению поступления солнечной радиации в экваториальные районы и уменьшению в полярные. В свою очередь, это ведет к увеличению градиента между низкими и высокими широтами и к интенсификации меридионального переноса тепла [14, 34]. Поскольку в юго-восточном районе доминирующее влияние на ледовые процессы оказывает атмосфера [3, 13], параметр нутации, в данном случае, косвенно характеризует изменение температуры воздуха Северного полушария. Это находит отражение в уравнениях (таблица 5), где видно, что для юго-восточного района характерно относительно более равномерное распределение вкладов температур воздуха (19,6–45,3% вклада), индексов атмосферной циркуляции (21,5–24,1% вклад суммарно) и нутации оси Земли в наклоне (33,2–36,3% вклада) (таблица 5).

Стоит отметить, что влияние поступления Атлантических вод в Баренцевом и Грен-

ландском морях проявляется с разной заблаговременностью: с запаздыванием в 4 года в Гренландском море [40] и 2 года и 4 года – в Баренцевом море (таблица 4). Дело в том, что в зимний сезон происходит углубление Исландской депрессии и усиление Сибирского антициклона, а их взаимодействие приводит к обострению арктического фронта [26, 42, 43]. В свою очередь, это приводит к усилению западных и юго-западных ветров и способствует более интенсивному поступлению Атлантических вод в Баренцево море. Тогда как в Гренландское море приток этих вод замедляется. Между колебаниями теплого Северо-Атлантического течения и холодного Восточно-Гренландского течения наблюдается взаимосвязь: при усилении интенсивности теплого течения, интенсивность системы холодных течений несколько ослабевает [44]. Это проявляется в двухлетнем запаздывании индекса АМО в уравнениях для ледовитости западного района Баренцева моря и четырехлетней – для Гренландского моря [41] и северо-восточного района Баренцева моря. В летний период Исландский минимум ослабевает, а Сибирский антициклон и вовсе распадается. Влияние атмосферной циркуляции ослабевает и поступление атлантических теплых вод относительно «выравнивается» в обоих морях.

Заключение

Выполненный анализ показал наличие совпадающих периодов в циклических колебаниях как ледовитости Баренцева моря, так и гидрометеорологических и астрогеофизических параметров, что может свидетельствовать о сопряженности их колебаний. С астрогеофизическими параметрами определяются общие циклические периоды 6–10 лет. Общие периоды циклическостей за 5–8 лет и 9–14 лет определяются также с NAO и 7–14 лет с индексами AO, AD и PNA. Что подтверждает статистическую связь изменений ледовитости Баренцева моря с колебаниями атмосферной циркуляции.

Представленные статистические уравнения хорошо описывают изменения ледовитости западного района, воспроизводя до 85% общей дисперсии ледовитости. Это связано, в первую очередь, с близостью западного района к массиву сплоченных льдов и тем, что холодные арктические воды формируют высокую инерционность положения кромки льдов в его северной части. Влияние поступления теплых атлантических вод с Нордкапским течением, которое моделируется индексом АМО с вкладом 16%, лишь в малой степени распространяется на север. В результате, сохраняется высокое влияние предшествующего состояния ледяного покрова, которое вносит до 78% вклада в общую изменчивость ледовитости района.

До 80% от общей дисперсии описывают уравнения для северо-восточного района. Здесь наибольшее влияние оказывают приповерхностная температура атмосферы (74% в зимний сезон) и предшествующее состояние ледовитости (76% в летний сезон). Этот район подвержен влиянию течений Макарова и Персея, приносящих холодные воды и дрейфующие льды из Карского моря с севера. Такая особенность, а также собственные льды местного образования способствуют высокой зависимости ледовитости от предшествующего состояния ледяного покрова. В южную часть района с Западно-Приноземельским течением поступают теплые трансформированные воды атлантического происхождения, что способствует высокой изменчивости расположения кромки льда: от полного очищения до полного замерзания этой части района.

Невысокий процент дисперсии (47%) описывают уравнения ледовитости юго-восточного района. Влияние водо- и ледообмена с Карским и Белым морями, речной сток и заток теплых атлантических вод в совокупности с мелководностью района способствуют самой высокой изменчивости как сплоченности, так и площади льдов. Это единственный район Баренцева моря, который в летний сезон полностью очищается ото льда. В связи с чем, данная акватория требует дополнительного исследования с использованием предикторов, характеризующих более локальные процессы.

Из оценок информативности следует, что влияние атмосферной циркуляции проявляется во всех районах. Индекс NAO имеет наибольший вклад в изменчивость ледовитости зимнего сезона во всех районах (6,1–19,2%). Что говорит о преобладающем влиянии меридионального переноса воздушных масс, которое может приводить к интенсификации поступления в Баренцево море как теплого воздуха, так и теплых атлантических вод.

Из астрогеофизических параметров суммарно наибольший вклад вносит нутация оси вращения Земли – до 36%. Нутация может приводить к изменениям наклона уровня от средних широт к высоким и, таким образом, служить косвенной характеристикой интенсивности дрейфа льда из Арктического бассейна. Кроме того, нутация напрямую влияет на поступление солнечной радиации, способствуя увеличению ме-

ридионального переноса тепла при уменьшении угла наклона оси.

В целом, рассчитанная ледовитость достаточно хорошо описывает её фактические изменения. Выбранные предикторы имеют высокую информативность и устойчивость, поэтому могут быть использованы при дальнейшем анализе долгопериодной изменчивости ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов. Полученные комбинации предикторов могут также послужить основой для разработки прогностических уравнений с заблаговременностью 2–4 года. Главной проблемой перехода к прогнозам является низкая заблаговременность параметров атмосферных процессов. В первую очередь это относится к приповерхностной температуре воздуха, которая вносит довольно ощутимый вклад в изменчивость ледовитости и при этом обладает низкой инерционностью. Это не позволяет использовать её предшествующее состояние при расчетах на полгода и более, как в случае с предшествующей ледовитостью. Одним из способов решения данной проблемы служит поиск предикторов, которые могут косвенно характеризовать температуру воздуха и иметь при этом высокую заблаговременность, как, например, нутация Земли.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22–27–00443.

Список литературы:

1. Прик З. М. Климатическое районирование Арктики //Тр. АНИИ. Л. 1971. Т. 304. С. 72.
2. Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 270 с.
3. Миронов Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: АНИИ, 2004. 320 с.
4. Аксенов П.В., Иванов В.В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64 (1). С. 42–54. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54.
5. Система Баренцева моря / под ред. академика А. П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. 672 с.
6. 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 Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 135 с.
7. JCOMM Expert Team on Sea Ice. Sea-Ice Nomenclature: snapshot of the WMO Sea Ice Nomenclature No. 259. Geneva, Switzerland: WMO-JCOMM, 2014. 121 p. doi: 10.25607/OBP-1515.
8. Wang L., Yuan X., Li C. Subseasonal forecast of Arctic sea ice concentration via statistical approaches // Climate Dynamics. 2019. Vol. 52. P. 4953-4971.
9. Лис Н.А., Егорова Е.С. Климатическая изменчивость ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 3. С. 234–247. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247>.
10. Onarheim I. H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea // Geophys. Res. Lett. 2017. № 44. P. 8387–8395. doi:10.1002/2017GL074304.
11. Крашенинникова С. Б., Крашенинникова М. А. Причины и особенности долговременной изменчивости ледовитости Баренцева моря //Лед и снег. 2019. 59(1). С. 112–122. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-112-122>
12. Тимохов Л.А., Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Юлин А.В. Климатические изменения сезонных и долгопериодных колебаний ледовитости Гренландского и Баренцева морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. 65(2). С. 148–168. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168>
13. Тюряков А. Б., Мочнова Л. П. Метод долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в осенне-зимний период в юго-восточной части Баренцева моря с заблаговременностью 30-45 суток // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. №. 3. С. 73-92.
14. Zotov L., Bizouard C., Sidorenkov N. Common oscillations in global Earth temperature, sea level, and Earth rotation //EGU General Assembly Conference Abstracts. 2014. С. 5683.
15. Сидоренков Н. С., Сумерова К. А. Синхронизация вариаций атмосферной циркуляции колебаниями лунно-солнечных приливов и подбор аналогов для долгосрочных прогнозов погоды //Труды Гидрометцентра России. 2010. Т. 14. №. 344. С. 325.
16. Федоров В.М. Солнечная радиация и климат Земли. М.: Физматлит, 2018. 232 с.

17. Абдусаматов Х.И. Солнце диктует климат Земли. СПб.: Изд-во «Logos», 2009. 197 с.
18. Монин А. С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 247 с.
19. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск: ПИНРО, 2003. 129 с.
20. Hill T., Lewicki P., Lewicki P. Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry, and data mining. StatSoft, Inc., 2006.
21. Janout M.A., Holemann J., Timokhov L., Gutjahr O., Heinemann G. Circulation in the northwest Laptev Sea in the eastern Arctic Ocean: Crossroads between Siberian River water, Atlantic water and polynya-formed dense water // Journ. of Geophys. Research: Oceans. 2017. V. 122. Is. 8. P. 6630–6647. doi: 10.1002/2017JC013159.
22. Зубов Н. Н. Морские воды и льды. М.: Гидрометиздат, 1938. 454 с.
23. Алексеев Г. В. Исследования изменений климата Арктики в XX столетии // Труды ААНИИ. 2003. 446 с. С. 6-21.
24. Thompson D. W. J., Wallace J. M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophysical research letters. 1998. T. 25. №. 9. С. 1297-1300.
25. Goldenberg, S. B., Landsea, C. W., Mestas-Nuñez, A. M., Gray, W. M. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications // Science. 2001. T. 293. №. 5529. С. 474-479.
26. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада ЛТД, 2013. 144 с.
27. Wu B., Wang J., Walsh J. E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion // Journal of Climate. 2006. T. 19. №. 2. С. 210-225.
28. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Monthly weather review. 1987. 115(6). С. 1083-1126.
29. Холопцев А. В., Гуменный М. М. Изменения ледовитости Арктики и атлантическая мультидекадная осцилляция // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2017. 3(2). С. 243-254.
30. Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В., Смирнов А.В. Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла Атлантическими водами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. 15(1). С. 82-97. <https://doi.org/10.48612/fpg/1krp-xbuk-6grz>
31. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // Лёд и Снег. 2017. 57(3). С. 381-390. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390>
32. Alekseev G, Kuzmina S, Bobylev L, Urazgildeeva A, Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. Int J Climatol. 2019. Vol. 39. С. 3582–3592. <https://doi.org/10.1002/joc.6040>
33. Бокучава Д.Д., Семенов В.А. Роль естественных колебаний и факторов внешнего воздействия на климат в потеплении середины XX века в Северном полушарии // Лёд и Снег. 2022. 62(3). С. 455-474. <https://doi.org/10.31857/S2076673422030144>
34. Максимов И.В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 447 с.
35. Медведев И. П., Куликов Е. А., Рабинович А. Б., Лапшин В. Б. Чандлеровские биения и полюсный прилив в Северном и Балтийском морях // Гелиогеофизические исследования. 2018. № 18 С. 9–17.
36. Воейков А.И. Избранные сочинения. Т. 1. Климаты земного шара, в особенности России. М. Л.: Изд. АН СССР, 1948. 423 с.
37. Белашов В. Ю., Белашова Е. С., Харшиладзе О. А. Длиннопериодные нутационно-прецессионные движения мгновенного полюса вращения Земли // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2020. Т. 162. №. 4. С. 467-480
38. Слепцов-Шевлевич Б.А., Бояринов А.М. Солнечный ветер, вращение Земли и климат. СПб: Типография Бланк Издат, 2002. 159 с.
39. Экологический Атлас. Баренцево море. Роснефть, Арктический научный центр, Фонд «НИР». М.: Фонд «НИР», 2020. 447 с.
40. Тимохов Л.А., Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Попов А.В. Особенности сезонной и межгодовой изменчивости ледяного покрова Гренландского моря // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 127–134.
41. Вязигина Н.А., Тимохов Л.А., Егорова Е.С., Юлин А.В. Информативность гидрометеорологических и астрогеофизических факторов в задаче описания

- межгодовых колебаний ледовитости Гренландского моря //Лёд и Снег. 2021. 61(3). С. 431-444. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030099>
42. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М. МГУ, 1982. 192 с.
43. Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф. Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе //Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. 2. С. 14-40.
44. Серяков Е. И. Долгосрочные прогнозы тепловых процессов в Северной Атлантике. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 135 с.

References:

1. Prik Z.M. Klimaticheskoe rajonirovanie Arktiki. Climatic zoning of Arctic. Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo institute. In: Bulletin of Arctic and Antarctic Research Institute. Leningrad, 1971, vol. 304, p. 72–84 (In Russian).
2. Nikiforov E.G., Shpajher A.O. Zakonomernosti formirovaniya krupnomasshtabnyh kolebanij gidrologicheskogo rezhima Severnogo Ledovitogo okeana. Patterns of formation of large-scale fluctuations of the hydrological regime of the Arctic Ocean. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980, 270 p. (In Russian).
3. Mironov E.U. Ledovye usloviya v Grenlandskom i Barencevom moryah i ih dolgosrochnyj prognoz . Ice conditions in the Greenland and Barents Seas and their long-term forecast. St. Petersburg: ANI, 2004. 319 p. (In Russian).
4. Aksenov P.V., Ivanov V.V. «Atlantifikaciya» kak veroyatnaya prichina sokrashcheniya ploshchadi morskogo l'da v bassejne Nansena v zimnij sezon. "Atlantification" as a Possible Cause for Reducing of the Sea-Ice Cover in the Nansen Basin in winter. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64(1), pp. 42-54. (In Russian) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54>
5. Sistema Barenceva morya / pod red. akademika A. P. Lisicyna. The Barents Sea system/ edited by Academician A.P. Lisitsyn M.: GEOS, 2021, 672 p.
6. Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E. Smolyanitsky V. Nauchnye issledovaniya v Arktike: T. 2. Klimaticheskie izmeneniya ledyanogo pokrova Evrazijskogo shel'fa. Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ice Cover Observations. Praxis Publishing Ltd. UK, Chichester. 2007, 135 p.
7. JCOMM Expert Team on Sea Ice. Sea-Ice Nomenclature: snapshot of the WMO Sea Ice Nomenclature No. 259. Geneva, Switzerland: WMO-JCOMM, 2014, 121 p. doi: 10.25607/OBP-1515.
8. Wang L., Yuan X., Li C. Subseasonal forecast of Arctic sea ice concentration via statistical approaches //Climate Dynamics. 2019, vol. 52, pp. 4953-4971.
9. Lis N.A., Egorova E.S. Klimaticheskaya izmenchivost' ledovitosti Barenceva morya i ego ot del'nyh rajonov. Climatic variability of the ice extent of the Barents Sea and its individual areas. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2022, Vol. 68(3), pp. 234-247. (In Russian) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247>
10. Onarheim I. H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea //Geophys. Res. Lett. 2017. № 44, pp. 8387–8395. doi:10.1002/2017GL074304.
11. Krasheninnikova S. B., Krasheninnikova M. A. Prichiny i osobennosti dolgovremennoj izmenchivosti ledovitosti Barenceva moray. Causes and features of long-term variability of the ice extent in the Barents Sea. Lyod i sneg. Ice and Snow. 2019, vol. 59(1), pp. 112-122. (In Russian) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-112-122>
12. Timokhov L.A., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Yulin A.V. Klimaticheskie izmeneniya sezonnyh i dolgoperiodnyh kolebanij ledovitosti Grenlandskogo i Barenceva morej. Climatic changes of seasonal and inter-annual variability of the ice cover of the Greenland and Barents Seas. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2019, Vol. 65(2), pp. 148-168. (In Russian) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168>
13. Tyuryakov A.B., Mochnova L.P. Metod dolgosrochnogo prognoza raspredeleniya molodyh i odnoletnih l'dov v osenne-zimnij period v yugo-vostochnoj chasti Barenceva morya s zablagovremennost'yu 30-45 sutok. A method for long-range forecasting of young and first-year ice distribution in the southeastern Barents Sea in autumn-winter with a lead time of 30-45 days. Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy. Hydrometeorological Research and Forecasting. 2019, №. 3, pp. 73-92. (In Russian)

14. Zotov L., Bizouard C., Sidorenkov N. Common oscillations in global Earth temperature, sea level, and Earth rotation //EGU General Assembly Conference Abstracts. 2014, p. 5683.
15. Sidorenkov N. S., Sumerova K. A. Sinhronizaciya variacij atmosfernoj cirkulyacii kolebaniyami lunno-solnechnyh prilivov i podbor analogov dlya dolgosrochnyh prognozov pogody. Synchronization of atmospheric circulation variations by fluctuations of lunisolar tides and selection of analogues for long-term weather forecasts //Trudy Gidrometcentra Rossii. Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia. 2010, Vol. 14, no. 344, p. 325.
16. Fedorov V.M. Solnechnaya radiaciya i klimat Zemli. Solar radiation and earth's climate. M.: Fizmatlit, 2018, 232 p. (In Russian)
17. Abdusamatov H.I. Solnce diktuet klimat Zemli. The Sun dictates the Earth's climate. St. Petersburg: Logos, 2002, 197 p. (In Russian)
18. Monin A. S. Vvedenie v teoriyu klimata. An Introduction to the Theory of Climate. L.: Gidrometeoizdat, 1982, 247 p. (In Russian)
19. Malinin V.N., Gordeeva S.M. Fiziko-statisticheskij metod prognoza okeanologicheskikh kharakteristik (na primere Severo-Evropejskogo bassejna). Physical and statistical method for forecasting oceanological characteristics (on the example of the North European Basin). Murmansk, 2003, 129 p. (In Russian)
20. Hill T., Lewicki P., Lewicki P. Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry, and data mining. StatSoft, Inc., 2006.
21. Janout M.A., Holemman J., Timokhov L., Gutjahr O., Heinemann G. Circulation in the northwest Laptev Sea in the eastern Arctic Ocean: Crossroads between Siberian River water, Atlantic water and polynya-formed dense water // Journ. of Geophys. Research: Oceans. 2017, vol. 122, Is. 8, pp. 6630–6647. doi: 10.1002/2017JC013159.
22. Zubov N. N. Morskie vody i l'dy. Sea waters and ices. M.: Gidrometizdat, 1938, 454 p. (In Russian)
23. Alekseev G. V. Issledovaniya izmenenij klimata Arktiki v XX stoletii. Studies of climate changes in the Arctic of XX century. Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo institute. In: Bulletin of Arctic and Antarctic Research Institute. 2003, № 446, pp. 6-21. (In Russian)
24. Thompson D. W. J., Wallace J. M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields //Geophysical research letters. 1998, Vol. 25. no. 9, pp. 1297-1300.
25. Goldenberg, S. B., Landsea, C. W., Mestas-Nuñez, A. M., Gray, W. M. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications //Science. 2001, Vol. 293, №. 5529, pp. 474-479.
26. Nesterov E.S. Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean. North Atlantic oscillation: atmosphere and ocean M.: Triada LTD, 2013, 144 p. (In Russian)
27. Wu B., Wang J., Walsh J. E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion //Journal of Climate. 2006, Vol. 19, № 2, pp. 210-225.
28. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns //Monthly weather review. 1987, 115(6), pp. 1083-1126.
29. Holopcev A. V., Gumennyj M. M. Izmeneniya ledovitosti Arktiki i atlanticheskaya mul'tidekadnaya oscillyaciya. Variation the ice coverage in the Arctic regions and the Atlantic multidecadal oscillation. Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni VI Vernadskogo. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geografiya. Geologiya. 2017, 3(2), pp. 243-254 (In Russian).
30. Sumkina A.A., Kivva K.K., Ivanov V.V., Smirnov A.V. Sezonnoe ochishchenie oto l'da Barenceva morya i ego zavisimost' ot advekcii tepla Atlanticheskimi vodami. Seasonal ice removal in the Barents Sea and its dependence on heat advection by Atlantic waters. Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022, 15(1), pp. 82-97 (In Russian) <https://doi.org/10.48612/fpg/1krp-xbuk-6gpz>
31. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V. Vliyanie Atlantiki na poteplenie i sokrashchenie morskogo ledyanogo pokrova v Arktike. Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic. Lyod i Sneg. Ice and Snow. 2017, 57(3), pp. 381-390. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390> (In Russian)
32. Alekseev G, Kuzmina S, Bobylev L, Urazgildeeva A, Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. Int J Climatol. 2019, 39, pp. 3582–3592. <https://doi.org/10.1002/joc.6040>

33. Bokuchava D.D., Semenov V.A. Rol' estestvennykh kolebanij i faktorov vneshnego vozdejstviya na klimat v poteplenii serediny HKH veka v Severnom polusharii. The role of natural fluctuations and factors of external forcing in the Early 20th Century Warming in Northern Hemisphere. *Lyod i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62(3), pp. 455-474. <https://doi.org/10.31857/S2076673422030144> (In Russian)
34. Maksimov I.V. Geofizicheskie sily i vody okeana. Geophysical forces and ocean waters. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970, 447 p. (In Russian)
35. Medvedev I.P., Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Lapshin V.B. Chandler Beats and Pole Tide in the North and Baltic Seas. *Geliogeofizicheskie issledovaniya. Heliogeophysical Research*. 2018, 18, pp. 9–17 (In Russian)
36. Voejkov A.I. Izbrannye sochineniya. T. 1. Klimaty zemnogo shara, v osobennosti Rossii. Selected works. V. 1. Global climate, especially Russian one. Moscow – Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1948, 423 p. (In Russian)
37. Belashov V. YU., Belashova E. S., Harshiladze O. A. Dlinnoperiodnye nutacionno-precessionnye dvizheniya mgnovennogo polyusa vrashcheniya Zemli. Long-period nutational-precessional motions of the instantaneous Earth rotation pole. // *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki*. 2020, Vol. 162, №. 4, pp. 467-480 (In Russian)
38. Sleptsov-Shevlevich B.A., Boyarinov A.M. Solnechnyi veter, vrashchenie Zemli i klimat. Solar wind, Earth's rotation and climate. St. Petersburg, 2002, 159 p. (In Russian)
39. *Ekologicheskij Atlas. Barencevo more. Rosneft', Arkticheskij nauchnyj centr, Fond «NIR»*. M.: Fond «NIR», 2020, 447 p. (In Russian)
40. Timokhov L.A., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Popov A.V. Osobennosti sezonnoj i mezhgodovoj izmenchivosti ledyanogo pokrova Grenlandskogo morya. Seasonal and inter-annual variability of the ice cover in the Greenland sea. *Lyod i Sneg. Ice and Snow*. 2018, Vol. 58, № 1, pp. 127–134. (In Russian)
41. Vyazigina N.A., Timokhov L.A., Egorova E.S., Yulin A.V. Informativnost' gidrometeorologicheskikh i astrogeofizicheskikh faktorov v zadache opisaniya mezhgodovykh kolebanij ledovitosti Grenlandskogo morya. Informativeness (information-bearing) of hydrometeorological and astrogeophysical factors in the problem of describing interannual fluctuations of the Greenland Sea ice coverage. *Lyod i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 61(3), pp. 431-444. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030099> (In Russian)
42. Dobrovol'skij A. D., Zalogin B. S. *Morya SSSR. Seas of the USSR*. M. MGU, 1982, 192 p. (In Russian)
43. Bardin M. YU., Platova T. V., Samohina O. F. Osobennosti izmenchivosti ciklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotah Severnogo polushariya, svyazannye s vedushchimi modami atmosfernoj cirkulyacii v Atlantiko-Evropejskom sektore. Specific features of variability of cyclone activity in northern extratropics associated with leading atmospheric circulation modes in atlantic-european sector. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2015, 2, pp. 14-40. (In Russian)
44. Seryakov E. I. Dolgosrochnye prognozy teplovykh processov v Severnoj Atlantike. Long-term forecasts of thermal processes in the North Atlantic. L.: Gidrometeoizdat, 1979, 135 p. (In Russian)