

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 644—665.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):644—665.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.467:[52+550.3](985)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-644-665

Сопряженность долгопериодных колебаний ледовитости арктических морей и астрогеофизических факторов

**Леонид Александрович Тимохов, Иван Евгеньевич Фролов,
Валерий Александрович Белязо, Александр Алексеевич Дмитриев,
Олег Александрович Трошичев**

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ltim@aari.ru

Аннотация. Для длительных временных рядов (1901—2016 гг.) установлена высокая корреляция между астрогеофизическими параметрами (координаты полюса и наклон земной оси Земли, продолжительность суток, солнечная активность, расстояние между Землей и Солнцем) и долгопериодными колебаниями средней трехлетней скользящей августовской ледовитостью западных и восточных морей Арктики. Полученные статистические уравнения описывают 72 % и 60 % общей дисперсии ледовитости западных и восточных морей соответственно. Дополнительное подключение в анализ различных гидрометеорологических факторов повышает точность воспроизведения долгопериодных изменений ледовитости на 11—25 %. Рассчитаны оценки вклада астрогеофизических и гидрометеорологических параметров в общую дисперсию ледовитости.

Ключевые слова: Арктические моря, долгопериодные колебания площади льдов, астрогеофизические характеристики, гидрометеорологические индексы, статистические модели.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке НИРТ Росгидромета 5.1 «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты (криосферы), процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей».

Для цитирования: Тимохов Л. А., Фролов И. Е., Белязо В. А., Дмитриев А. А., Трошичев О. А. Сопряженность долгопериодных колебаний ледовитости арктических морей и астрогеофизических факторов // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 644—665. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-644-665.

Original article

Conjugation of long-term fluctuations of Arctic Sea ice and astrogeophysical factors

**Leonid A. Timokhov, Ivan E. Frolov, Valeri A. Belyazo,
Aleksandr A. Dmitriev, Oleg A. Troschichev**

Arctic and Antarctic Research Institute, ltim@aari.ru

Summary. On long-term rows 1901—2016 the conjugacy between astrogeophysical parameters (the coordinates of the pole and parameters of the Earth's nutation, the length of the day, solar activity and the distance between the Earth and the Sun in the winter and summer half-year) and long-period fluctuations of the average three-year sliding August ice cover of the western (total correlation coefficient $R = 0,85$) and eastern ($R = 0,78$) seas of the Arctic has been established. The obtained statistical equations for the Arctic seas' ice cover describe 72 % of the total dispersion of the western Arctic seas' ice cover and 60 % of the total dispersion of the eastern seas' ice cover. A physical interpretation of the possible direct or indirect influence of astrogeophysical factors is proposed. An additional connection to the analysis of hydrometeorological factors (air temperature, atmospheric circulation indices AO, NAO, PNA, the index of the thermal state of the North Atlantic AMO) increases the accuracy of reproducing long-term changes in ice cover by 11—25 %. Estimates of the contribution of astrogeophysical and hydrometeorological parameters to the overall dispersion of ice coverage are obtained: western 60 % and 40 % and eastern 47 % and 53 % of the Arctic seas, respectively. Predictions of the ice cover for three years and ten years ahead according to the obtained equations with independent astrogeophysical and hydrometeorological predictors demonstrate satisfactory agreement of the predicted values and the actual data of the ice cover. The performed study confirms the close correlation of long-period fluctuations in the Arctic seas with astronomical factors. The author's research is the development of a statistical approach to modeling long—period fluctuations in the Arctic seas, the key point of which was the inclusion of astrogeophysical parameters in predictors along with traditional hydrometeorological indices.

Keywords: Arctic seas, long-term ice area fluctuations, astrogeophysical characteristics, hydrometeorological indices, statistical models.

Acknowledgments: This work was carried out with the support of SRTW Roshydromet 5.1. «Development of models, methods and technologies for monitoring and predicting the state of the atmosphere, ocean, marine ice cover, glaciers and permafrost (cryosphere), ice interaction processes with natural objects and engineering structures for the Arctic and Technology of Hydrometeorological Consumer Support».

For citation: Timokhov L. A., Frolov I. E., Belyazo V. A., Dmitriev A. A., Troschichev O. A. Conjugation of long-term fluctuations of Arctic Sea ice and astrogeophysical factors *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(644—665). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-644-665. (In Russ.).

Введение

Ледяной покров является важной компонентой Северного Ледовитого океана (СЛО) и играет ключевую роль в арктической климатической системе, регулируя взаимодействие атмосферы с океаном в полярной области [1]. Судоходство и добыча полезных ископаемых, береговая инфраструктура в Арктике имеют свою специфику, и долгосрочный прогноз ледовых условий арктических морей является важной задачей для обеспечения хозяйственной деятельности в суровых условиях Арктики.

Современное потепление Арктики отмечается как минимум двумя важными климатическими событиями — значительным увеличением температуры воздуха и аномальным уменьшением площади арктических льдов в летний период [1]. Экстремальное уменьшение площади ледяного покрова в начале текущего столетия, сопровождавшееся аномальными колебаниями термохалинной структуры [2] и быстрыми изменениями климата в Арктике [3], показало, что изменения оказались быстрее, чем это представляли климатические модели.

Современные климатические модели прогнозируют дальнейшее уменьшение площади ледяного покрова в летний период. Так, в статье [4], где приведены результаты расчетов по модели RCP8.5 NEMO, показано, что к 2030—2039 гг. концентрация льдов в навигационный период может значительно уменьшиться, открыв полярный маршрут из Европы в Азию через Северный полюс. В то же время в монографии [1] на основе анализа фактических межгодовых изменений площади льдов и эмпирической модели было установлено, что в XXI в. ожидается сохранение колебательного (а не одностороннего) фона изменений площади льдов в арктических морях. Согласно этому прогнозу, в 2020—2040 гг., вероятно, произойдет увеличение площади льдов с максимумом около 2030 г. в восточных арктических морях и около 2035 г. — в западных морях. Это свидетельствует о том, что в настоящее время нет однозначного ответа на вопрос, по какому сценарию будут развиваться изменения площади ледяного покрова в Северном Ледовитом океане, поэтому исследования причин и генезиса долговременных и климатических изменений площади ледяного покрова и методы их описания продолжают оставаться актуальной задачей.

Синоптические и сезонные изменения состояния морского ледяного покрова во времени и пространстве определяются, прежде всего, тепловыми и динамическими процессами в системе атмосфера — ледяной покров — океан. В настоящее время краткосрочные и среднесрочные прогнозы ледовитости на основе гидродинамических и физико-статистических моделей разработаны и используются в оперативной деятельности [1].

Долговременные изменения ледовитости арктических морей масштабов межгодовых и климатических колебаний, в отличие от короткоперiodных процессов, приобретают другие черты, в которых находит отражение интегральное (за год, десятилетие) воздействие внутренних гидрометеорологических процессов на ледяной покров и влияние обратных связей на атмосферные и океанографические процессы. Кроме того, многие исследователи отмечают влияние на долговременные процессы внешних факторов: приливных и нутационных сил, вращения Земли, солнечной активности и космических лучей. Так, И. В. Максимов [5] указывал на присутствие в ледовитости Баренцева моря 6—7-летней цикличности, которая вызвана нутационными причинами: наложением вынужденных колебаний оси вращения Земли (12 месяцев) и свободных колебаний («полюсный прилив», 14 месяцев). З. М. Гудкович, Э. И. Саруханян, Н. П. Смирнов [6] установили присутствие цикла «полюсного прилива» в атмосфере высоких широт и колебаниях ледовитости арктических морей. И. В. Максимов обратил также внимание на влияние девятнадцатилетнего деклинационного прилива на океан

и ледовитость [5]. Б. А. Слепцов-Шевлевич и А. М. Бояринов в монографии [7] отметили связь климатических изменений среднегодовой площади льдов в Приатлантической Арктике с долговременными изменениями среднегодовой угловой скорости вращения Земли и с возмущенностью геомагнитного поля Земли. В монографии А. А. Дмитриева, В. А. Белязо, Ю. П. Гудошникова [8] отмечается роль орбитальных движений планет Солнечной системы в формировании планетарной климатической изменчивости атмосферных процессов полярных регионов и, как следствие, в цикличности изменений ледовитости.

Связь ледовитости арктических морей с солнечной активностью, прежде всего, с одиннадцатилетним циклом числа Вольфа, рассматривалась в работах [5, 9, 10—14]. В. П. Карклин [10] и А. Г. Егоров [14] полагают, что вариации солнечной активности проявляются в изменениях полей атмосферного давления и циркуляции атмосферы, от которых зависят аномалии других гидрометеорологических элементов, включая ледяной покров. На важную роль двадцатидвухлетнего цикла солнечной активности в межгодовых изменениях ледовитости арктических морей обратил внимание Б. А. Слепцов-Шевлевич [13, 15]. Этот цикл возникает при обращении знака магнитных полей на Солнце при переходе от одного одиннадцатилетнего цикла солнечной активности к другому. Циклы ледовитости 50—60 лет связывают с долговременными колебаниями солнечной активности. В работе [16] на длительных рядах чисел Вольфа установлено, что цикл Глейсберга состоит из двух мод колебаний: периодичностей 50—80 лет и 90—140 лет. Авторы работы [17] полагают, что шестидесятилетний цикл является результатом меняющейся диссиметрии центра масс Солнечной системы под влиянием Юпитера, Сатурна и Урана [8].

Исследуя тенденции изменения площади льдов в Северном полушарии, В. М. Федоров [18] показал, что основной причиной их изменения являются колебания инсоляции Солнца. В колебаниях поступления солнечной радиации к Земле автор выделяет два механизма. Первый связан с изменением солнечной активности Солнца, в качестве показателя которого чаще всего используют числа Вольфа, а второй механизм связан с изменением расстояния между Землей и Солнцем, наклоном оси вращения Земли и др., которые вызывают изменения в инсоляции Солнца, приходящей на внешнюю границу атмосферы [18].

Из приведенного обзора следует, что исследователями установлен ряд отдельных внешних воздействий, являющихся, по их мнению, вероятными причинами межгодовых и климатических изменений площади льдов в Арктике. Но каково их совместное влияние на ледовитость? Астрогеофизические воздействия составляют две доминирующие группы гравитационной и радиационной природы. В результате астрогеофизическое влияние является комплексным механизмом, в котором участвуют силы и потоки различной физической природы, причем действие их непрерывно по всему спектру колебаний.

Цель настоящей статьи состоит в исследовании связи колебаний ледовитости западных и восточных арктических морей с комплексом переменных как астрогеофизических, так и гидрометеорологических факторов, а также в построении статистических моделей августовской ледовитости западных и восточных морей

Арктики с комплексом астрогеофизических и гидрометеорологических факторов и в выявлении вклада указанных переменных в общую дисперсию ледовитости.

Данные и методы

Объектом исследования являются арктические моря от Гренландского на западе Арктики до Чукотского моря на востоке. По ледовому режиму арктические моря разделяют на две отличающиеся группы [1]. Западные моря (Гренландское, Баренцево и Карское) и их ледовитость (L_w) находятся под значительным влиянием Атлантики. Часть акватории первых двух морей остается свободной ото льда даже в зимнее время, поэтому межгодовая изменчивость их ледовитости отмечается во все сезоны года. Восточные моря (Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) находятся на сибирском шельфе, их акватория большую часть года покрыта сплоченными льдами, и площадь ледяного покрова морей (L_e) в значительной степени находится под влиянием процессов тихоокеанского сектора Арктики.

Для исследования долговременных изменений площади ледяного покрова необходимы длительные ряды наблюдений. В работах [19—25] авторами были собраны и систематизированы временные ряды ледовитости различной продолжительности, как отдельных арктических морей, так и регионов. Значения ледовитости определялись по имеющимся судовым, авиационным наблюдениям за положением кромки льда и спутниковым наблюдениям. Дополнительно авторами выполнялась реконструкция ледовитости по литературным источникам и выполнялись расчеты по эмпирическим формулам. В монографиях [1, 25] кратко описывается история накопления информации о ледяном покрове арктических морей.

В настоящей работе были использованы наиболее длительные временные ряды (1900—2019 гг.) ледовитости морей в августе за 119 лет. До 1933 г. ледовитость вычислялась авторами [23] с помощью эмпирических связей ледовитости с локальной температурой воздуха, направлением и скоростью ветра и учитывались отдельные исторические сведения о распространении льдов. Как указано в монографии [1], связь расчетных данных с реконструированными по литературным источникам данными характеризуется коэффициентом корреляции равным 0,72, т.е. ошибки реконструкции составляли порядка половины дисперсии ледовитости. Для периода с 1933 по 1946 г. величины ледовитости рассчитывались по данным немногочисленных морских и авиационных экспедиций, но в отдельных случаях выполнялась реконструкция, при этом ошибки расчета рядов ледовитости составляла около 10—30 % дисперсии ледовитости [23, 24]. После 1947 г. точность расчетов значительно выросла, ошибки реконструкции рядов ледовитости уменьшились до 5—10 % дисперсии, поскольку использовались данные авиационных экспедиций, наблюдения на морских судах, а с 1980 г. основным источником данных стали спутниковые наблюдения, точность которых полностью отвечает практическим потребностям. За период с 2004 по 2019 г. величины ледовитости были рассчитаны с использованием базы ледовых данных ААНИИ [26].

В качестве астрогеофизических переменных в работе используются следующие характеристики:

- среднегодовые значения координат полюса Земли (dX и dY);
- параметры наклона оси Земли (долготный $d\psi$ и угловой $d\epsilon$ индексы);
- среднегодовая продолжительность суток (индекс lod , length of day).

Эти параметры были рассчитаны по данным сайта <ftp://ftp.nga.mil/pub2/gps/eopp/ууууеопр/EOPPyddd.TXT>. Выбранные нами величины $d\psi$ и $d\epsilon$ представляют собой поправки к углам наклона оси вращения Земли ψ_{1980} и ϵ_{1980} , вычисленным по модели прецессии-нutationи MAC1980, чтобы получить наблюдаемые величины ψ , ϵ .

Колебания солнечной радиации вследствие изменения расстояния Земля—Солнце представлены индексами dDs и dDw , которые являются нормированными отклонениями расстояния от Земли до Солнца в летний и зимний периоды соответственно, вычислены по данным <https://soft-ok.net/226-astroprocessor-zet-9-lite.html>.

Для характеристики изменения физической активности Солнца (индекс SA) использовано среднегодовое значение чисел Вольфа, которое выбрано по данным https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt.

Структура межгодовых и долгопериодных колебаний ледовитости и астрогеофизических характеристик

Межгодовые изменения макромасштабных характеристик — суммарных площадей льдов западных и восточных морей в августе, соответственно Lw и Le , характеризуются полицикличностью. Так, по оценкам авторов [1], на фоне отрицательных линейных трендов (климатическое уменьшение площади льдов в августе) отмечаются квазипериодические колебания различной частоты, обобщенно представленные в табл. 1.

Таблица 1

Вклад основных частот в дисперсию изменчивости суммарных площадей распространения льда в августе в западных (Гренландском, Баренцевом и Карском) и восточных (Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском) морях в % (сокращенный вариант из [1])

Contribution of the main frequencies to the dispersion of variability of the total area of ice spread in August in the western (Greenland, Barents and Kara) and eastern (Laptev, East Siberian and Chukchi) seas in % (abridged version from [1])

Регионы Арктики	Линейный тренд, %	Вклад основных циклов в дисперсию площади морского льда, %				
		Частота, 1/год (циклы, годы)				
		0,01—0,03 (50—60)	0,04—0,06 (20)	0,08—0,11 (9—12)	0,12—0,15 (7—8)	> 0,17 (2—5,5)
Западный	24	17,5	13	6,5	7	32
Восточный	3	7	5	12,5	13,5	59

Примечание: в качестве характеристики линейного тренда принимается его коэффициент детерминации.

Комментируя табл. 1, укажем, что, по мнению авторов работы [1], короткопериодные циклы 2—5,5 лет формируются преимущественно под влиянием атмосферных процессов. Взаимодействие составляющих системы «океан — ледяной покров — атмосфера» может вызвать автоколебательные процессы, и, по разным оценкам, предполагаемые периоды автоколебаний могут составлять 4—8, 20—30 лет и др. (обзор публикаций смотрите в [1]).

Циклы 7—8 лет близки к полюсному приливу, вызванному нутационными причинами. Однако В. М. Федоров [18] отмечает также присутствие восмилетней вариации в изменениях инсоляции, приходящей на внешнюю границу атмосферы. Ритмы с периодом 9—12 лет обычно относят к влиянию так называемого одиннадцатилетнего цикла изменения солнечной активности, характеризуемой числом солнечных пятен (числом Вольфа). По И. В. Максимову [5], двадцатилетняя цикличность ледовитости является следствием девятнадцатилетнего деклинационного прилива. Но в вариациях приходящей солнечной радиации, связанной с изменением наклоном оси вращения Земли, расстояния между Землей и Солнцем и др., В. М. Федоров [18] также выделил девятнадцатилетнюю цикличность.

Периоды вынужденной вариации оси вращения Земли вследствие изменения расстояния между Землей и Солнцем, Землей и Луной, наклона орбиты Луны к эклиптике включают циклы 18,6 лет, 9,3 года, 1 год и более короткие [27]. По теории Швейдера [11], свободная нутация вызывает переменную силу деформации на поверхности Земли, которая формирует в океане вынужденную четырнадцатимесячную волну «полюсного прилива» с максимальной амплитудой в районе 45° северной и южной широт и равной нулю на экваторе и полюсах, причем высота уровня вдоль широты не меняется. В реальном океане «полюсный прилив» представляет собой результат совместного воздействия как свободных, так и вынужденных колебаний, а сложение вынужденной годовой волны и свободного четырнадцатимесячного Чандлеровского цикла порождает шести—семилетнее биение в уровне океана. По оценке И. В. Максимова [5], горизонтальная составляющая силы деформации при свободных и вынужденных колебаниях оси вращения Земли в 17 раз меньше горизонтальной составляющей приливообразующей силы Луны. Но действие сил деформации нутационной природы на полуцикле в 100—200 продолжительнее действия короткопериодной приливообразующей силы Луны. Эффект воздействия на океан горизонтальной составляющей силы деформации деклинационного долгопериодного прилива, по оценке И. В. Максимова [5], сравним с воздействием «полюсного прилива».

Для анализа статистических связей в работе использованы средние трехлетние скользящие значения ледовитости и астрогеофизических индексов за период с 1901 г. по 2017 г. С помощью кросс-корреляционного анализа были вычислены значимые парные коэффициенты корреляции ледовитости арктических морей с астрогеофизическими индексами (табл. 2) и временные лаги (в годах) опережения астрогеофизического индекса (знак «минус»).

Коэффициенты корреляции ледовитости с большинством астрогеофизических индексов превосходят величину $R = 0,50$, что является достаточно тесной статистической связью для характеристик долгопериодных процессов. Малые

парные коэффициенты корреляции обнаруживаются между ледовитостью и солнечной активностью SA. Ледовитость восточных морей слабо коррелирует с индексом магнитной активности Kp и продолжительностью суток lod, характеризующей скорость вращения Земли.

Таблица 2

Значимые парные коэффициенты корреляции R ледовитости арктических морей с астрогеофизическими индексами

Significant paired correlation coefficients R of the ice cover of the Arctic seas with astrogaeophysical indices

	dX	dY	dψ	dε	SA	Kp	lod	dDs	dDw
Lw	-0,70(0)	-0,80(0)	0,75(0)	0,72(0)	-0,27(-1)	-0,50(-2)	0,54(-1)	0,62(0)	-0,63(0)
	-0,68(-1)					-0,49(-3)		0,61(-1)	-0,63(-1)
Le	-0,64(0)	-0,51(0)	0,58(0)	0,55(0)	0,15(-5)	-0,19(0)	0,21(-6)	0,58(-1)	-0,56(-1)
	-0,64(-1)	-0,51(-1)						0,58(-2)	-0,56(-2)

Примечание: В скобках указаны временные лаги в годах, при этом «минус» означает опережение астрогеофизического индекса, а «ноль» — синхронность ледовитости и индекса.

На рис. 1 для примера приведены нормированные временные графики площади льдов в августе западных и восточных морей и отдельных астрогеофизических характеристик. Нетрудно видеть, что колебания ледовитости и астрогеофизических параметров неплохо согласуются, причем изменения астрогеофизических

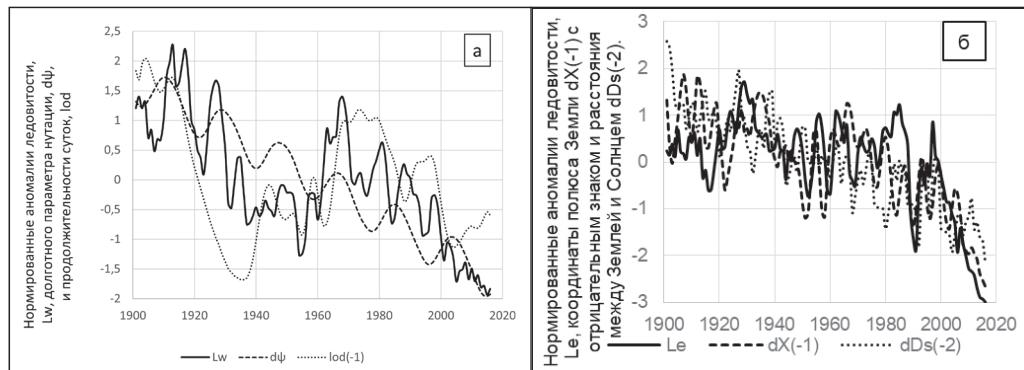


Рис. 1. Временные серии аномалий трехлетних, скользящих нормированных на среднеквадратическое отклонение ледовитости Lw, Le в западном секторе (a) и восточном секторе Арктики (б), а также астрогеофизических характеристик: долготного параметра наклона оси Земли, $d\psi$; продолжительности суток, lod; координаты полюса Земли, $dX(-1)$ с отрицательным знаком, и аномалии расстояния между Землей и Солнцем, $dDs(-2)$.

Fig. 1. Time series of three-year moving anomalies normalized to the standard deviation of ice coverage Lw, Le in the western sector (a) and the eastern sector of the Arctic (b), as well as astrogaeophysical characteristics: the longitudinal parameter of nutation, $d\psi$; the length of the day, lod; anomalies coordinate of the Earth's pole, $dX(-1)$ with a negative sign, and anomalies of the distance between the Earth and the Sun, $dDs(-2)$.

индексов преимущественно опережают изменения ледовитости или изменяются синхронно. Эти результаты служат определенным основанием полагать, что существует связь между длительными колебаниями ледовитости и астрогеофизическими факторами, и отмечать ведущую роль астрогеофизических факторов в долговременных изменениях суммарной ледовитости арктических морей.

Поскольку ледовитость арктических морей подвержена влиянию множества факторов, то реальная роль каждого индекса может быть установлена только в результате экстракции его вклада из суммарного влияния нескольких факторов, поэтому нами была поставлена задача получить уравнение связи ледовитости с множеством астрогеофизических факторов, а затем получить оценки вклада каждого фактора в изменчивость ледовитости при комплексном их влиянии.

Анализ статистической связи долговременных изменений ледовитости с астрогеофизическими параметрами

Для получения статистических уравнений долговременных изменений ледовитости арктических морей в августе для периода с 1901 г. по 2016 г. в качестве предикторов использовались средние трехлетние скользящие значения следующих астрогеофизических параметров: dX , dY , $d\psi$, $d\epsilon$, SA , lod , dDs , dDw . В рабочую базу параметры вошли с различным временным лагом и составили массив из 40 переменных длительностью 116 членов каждая переменная. Построение статистических уравнений выполнялось методом мультирегрессионного анализа по программе «Статистика» [28] путем исключения переменных [29]. Сначала строилась полная модель с использованием всех предикторов. Затем из нее исключались наименее значимые предикторы по критерию p -level. Далее процедура продолжалась до получения наиболее статистически значимых переменных. В результате были получены уравнения долгопериодных изменений трехлетних скользящих значений августовской ледовитости арктических морей западной Lw и восточной Le частей Арктики от астрогеофизических переменных (модельные значения ледовитости обозначены символами $Lw1$ и $Le1$):

$$Lw1 = 21504,7 * d\epsilon(0) + 95,4 * lod(-1) - 0,9 * SA(-4) + 738,9, \quad (1)$$

$$Le1 = -2929,01 * dX(-1) + 198,98 * dDs(-2) + 0,76 * SA(-5) + 313,83. \quad (2)$$

В результате испытания всех астрогеофизических переменных в уравнения (1), (2) вошли следующие предикторы: $d\epsilon$ — угловой параметр наклона оси Земли; lod — продолжительностью суток; SA — солнечная активность (числа Вольфа); dX — вариации X — координаты полюса Земли; dDs — нормированные отклонения расстояния от Земли до Солнца в летний период. В уравнениях временные лаги в годах указаны в скобках при предикторах.

Основные статистические показатели приведены в табл. 3, из которой видно, что линейные коэффициенты детерминации (0,72 и 0,60) больше или около критического значения 0,5—0,6 [29]; критерий Фишера больше критического значения ($F > 5F_{kp}$) [29]; вероятность ошибки расчета (p -level) для всех коэффициентов регрессии меньше заданного уровня значимости (0,01). Это означает, что

уравнения (1) и (2) адекватны (значимы), т.е. рассчитанные по уравнениям значения соответствуют исходным данным ледовитости.

Таблица 3

Статистические параметры регрессионных моделей (1) и (2)

Statistical parameters of regression models (1) and (2)

Lw1; $R = 0,85$; $R^2 = 0,72$; $F(3,116) = 94,4$; $F_{kp} = 4,0$				Le1; $R = 0,78$; $R^2 = 0,60$; $F(3,116) = 58,4$; $F_{kp} = 4,0$				
	Уравнение 1	ρ	$p\text{-level}$		Уравнение 2	r	$p\text{-level}$	Вклад, %
1	$d\epsilon(0)$	0,63	0,000	52	1	$dX(-1)$	-0,60	0,000
2	$lod(-1)$	0,36	0,000	17	2	$dDs(-2)$	0,23	0,005
3	$SA(-4)$	-0,15	0,004	3	3	$SA(-5)$	0,17	0,005

Примечание: R — множественный коэффициент линейной корреляции; R^2 — коэффициент детерминации; F — критерий Фишера; F_{kp} — табличное значение критерия Фишера; ρ — частный коэффициент корреляции; $p\text{-level}$ — уровень значимости. В пятой и восьмой колонках указан вклад предиктора в общую дисперсию ледовитости в процентах.

Важным условием корректности статистических моделей (1) и (2) является независимость (некоррелированность) предикторов между собой. В табл. 4 приведены значения взаимных коэффициентов корреляции предикторов. Как видно из таблицы, коэффициенты корреляции между переменными в правых частях уравнений (1) и (2) изменяются от 0,08 до 0,63, что свидетельствует о практической независимости предикторов, так как значения коэффициентов корреляции меньше коэффициента корреляции 0,7, считающегося границей при определении коллинеарности [29], поэтому практическое отсутствие коллинеарности предикторов свидетельствует о корректности статистических уравнений (1) и (2).

Таблица 4

Корреляционная матрица предикторов, вошедших в уравнения (1) и (2)

Correlation matrix of predictors included in equations (1) and (2)

Уравнение 1, Lw1				Уравнение 2, Le1			
Lw1	$d\epsilon(0)$	$lod(-1)$	$SA(-4)$	Le1	$dX(-1)$	$dDs(-2)$	$SA(-5)$
$d\epsilon(0)$	1,00	0,26	-0,13	$dX(-1)$	1,00	-0,65	0,09
$lod(-1)$	0,26	1,00	-0,20	$dDs(-2)$	-0,65	1,00	-0,08
$SA(-4)$	-0,13	-0,20	1,00	$SA(-5)$	0,09	-0,08	1,00

Таким образом, полученные множественные коэффициенты линейной корреляции ($R = 0,85$ и $R = 0,78$) ледовитости морей западной и восточной частей Арктики с астрогеофизическими факторами являются несомненно значимыми для долгопериодных процессов. Линейный коэффициент детерминации, который отражает вклад предикторов в общую дисперсию многолетних колебаний площади льдов, показывает, что астрогеофизические факторы определяют 72 % общей дисперсии ледовитости западных арктических морей и 60 % общей дисперсии ледовитости восточных морей.

Приведенные в пятой и восьмой колонках в табл. 3 вклады предикторов, показывают, что на долговременную изменчивость ледовитости морей наибольшее

влияние оказывают нутационные эффекты, представленные угловым параметром наклона оси вращения Земли $d\epsilon(0)$ для западных морей и координатой $dX(-1)$ полюса Земли с опережением в один год для восточных морей. Отметим, что в спектре флюктуаций индекса $d\epsilon(0)$ преобладает двадцатилетний цикл, а в спектре координаты полюса Земли $X(0)$ доминируют шести—семилетнее биение, а также цикл с периодом 30 лет.

Следующий вклад в общую дисперсию ледовитости западных морей вносят вариации скорости вращения Земли (17 %), моделируемое индексом $lod(-1)$, и изменения расстояния между Землей и Солнцем в летний период $Ds(-2)$ для восточных морей (9 %). Заметим, что в спектре среднегодового индекса lod на ряде 1900—2017 гг. не выделяются значимые циклы, но аппроксимация ряда lod полиномом шестой степени указывает на присутствие квазицикличности 60—80 лет. В изменчивости аномалии расстояния между Землей и Солнцем Ds наблюдаются значимые цикличности (4 года и 12 лет) с несколько меньшей амплитудой. Роль солнечной активности $SA(-4)$, представленная числами Вольфа, невелика и равна 3 % и 6 % соответственно для западных и восточных морей. В спектре флюктуаций среднегодовой солнечной активности SA используемого нами ряда длиной 118 лет выделяется доминирующая цикличность 10—11 лет.

Схематично механизм влияния предикторов на ледовитость представляется следующим образом. При положительных аномалиях параметра наклона оси вращения Земли $d\epsilon(0)$ увеличивается поток солнечной радиации на внешнюю границу атмосферы в широтной зоне 60—90°; уменьшается температурный контраст север—юг, ослабляется меридиональный перенос, понижается температура воздуха [18] и увеличивается площадь льдов в западных морях, как это и следует из уравнения (1). При положительном значении вариации координаты dX наклон уровня океана направлен от широты 45° в сторону Северного полюса, а поток имеет преимущественно северо-восточное направление, уменьшая площадь льдов в восточных морях (уравнение (2)). При отрицательных значениях аномалий $d\epsilon(0)$ и X наблюдается обратный эффект.

Влияние изменения скорости вращения Земли (индекс lod) на ледовитость западных морей осуществляется, по Б. А. Слепцову-Шевлевичу и А. М. Бояринову [7], следующим образом. При положительном значении индекса lod (увеличение индекса lod — замедление вращения Земли) на полюсах наблюдается вспучивание поверхности океана, а на экваторе — проседание, поэтому в соответствии с уравнением (1) уровень океана вследствие замедления вращения Земли уменьшается от полюса к экватору, в результате чего возникший геострофический поток водных масс направлен на юго-запад, увеличивая ледовитость в западных морях. При уменьшении индекса lod (ускорение вращения Земли) возникает обратный эффект.

Возможный механизм влияния предиктора $Ds(-2)$ на ледовитость восточных арктических морей заключается в том, что при положительном значении аномалии расстояния между Землей и Солнцем (Земля удаляется от Солнца) уменьшается приход солнечной радиации на внешнюю границу атмосферы Земли, что отражается в понижении температуры воздуха, и способствует увеличению ледовитости. Отрицательное значение индекса $Ds(-2)$ (уменьшение расстояния

между Землей и Солнцем) демонстрирует увеличение прихода солнечной радиации на внешнюю границу атмосферы, вследствие чего повышается температура воздуха и уменьшается площадь распространения льдов, что и следует из уравнений (1) и (2).

Более сложной является интерпретация механизма влияния интенсивности солнечной радиации SA (вариации чисел Вольфа) с опережением четыре и пять лет на ледовитость. По мнению многих ученых (см. обзор в [1]), влияние интенсивности солнечной радиации на океан и ледяной покров является не прямым, а через атмосферную циркуляцию. Так, А. Г. Егоров [14] показал, что в течение 16—23 циклов центр наибольших барических аномалий перемещается в пространстве северной полярной области между Северной Америкой и Евразией по некоторой полюсной оси, проходящей через точки геомагнитного и географического полюса. Результатом этого является солнечно обусловленное регулирование режима воздушных переносов над акваторией северо-евразийского мелководья и многолетние изменения в повторяемости формирования ледовой оппозиции между западными и восточными арктическими морями России. Вероятно, поэтому предиктор SA в уравнения для западных и восточных морей вошел с разным знаком.

Более слабая корреляция между многолетними колебания ледовитости восточных морей с астрогеофизическими факторами может быть связана с недостаточно удовлетворительной реконструкцией временного ряда ледовитости с 1900 г. по 1932 г. или с неучетом дополнительных астрогеофизических факторов. Однако довольно высокие коэффициенты корреляции (0,85 и 0,78) для августовской ледовитости западных и восточных морей Арктики, соответственно, значительное превышение критерия Фишера над табличным значением, указывают на тесную сопряженность долгопериодных колебаний ледовитости арктических морей и астрогеофизических параметров.

Анализ статистических связей ледовитости арктических морей с астрогеофизическими и гидрометеорологическими параметрами

Рассмотрим роль астрогеофизических и гидрометеорологических факторов в их совместном влиянии на долговременные колебания ледовитости арктических морей. В качестве гидрометеорологических параметров с учетом результатов публикаций [31, 32] были использованы следующие индексы: Арктическое колебание (Arctic Oscillation, AO); Североатлантическое колебание (North Atlantic Oscillation, NAO); атлантическое мультидекадное колебание (Atlantic multidecadal oscillation, AMO); Тихоокеанско-североамериканское колебание (Pacific North American oscillation, PNA). По данным сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>, рассчитывались средние индексы для периодов от месяца i до месяца j , x_{ij} , с времененным сдвигом в годах n , $x_{ij}(-n)$, где знак минус означает опережение предиктором ледовитость на n лет.

Данные о среднегодовой температуре воздуха (Ta) в Арктике севернее широты 60° были взяты из работы [32], дополненные расчетами для последнего десятилетия. Отметим, что в статье [33] были использованы другие длинные ряды

среднегодовой температуре воздуха для анализа и получения статистических моделей долговременных колебаний температуры воздуха в Арктике. Чтобы уменьшить влияние пульсаций гидрометеорологических воздействий с временным масштабом меньше трех лет, ряды предикторов были подвергнуты трехлетнему скользящему осреднению. Методом мультирегрессионного анализа были получены следующие уравнения долгопериодных изменений трехлетних скользящих значений августовской ледовитости арктических морей западной Lw2 и восточной Le2 частей Арктики, как функции астрогеофизических и гидрометеорологических переменных:

$$\begin{aligned} \text{Lw2} = & 15100,97 * \text{d}\varepsilon(0) + 58,84 * \text{lod}(-1) - 0,7 * \text{SA}(-4) - \\ & - 252,52 * \text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1) - 562,35 * \text{AMO}(-5) + 12483,46 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Le2} = & -2052,0 * \text{dX}(-1) + 0,96 * \text{SA}(-5) - 152,4 * \text{AO}_{\text{X-III}}(0) - \\ & - 157,9 * \text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1) - 544,9 * \text{AMO}(-8) + 12213,2. \end{aligned} \quad (4)$$

В результате испытания всех переменных и исключения наименее значимых предикторов в уравнения (3), (4) вошли следующие астрогеофизические и гидрометеорологические предикторы с временными лагами, указанными в уравнениях в скобках: $\text{d}\varepsilon$, lod , SA , dX , AMO , AO , PNA .

Основные статистические характеристики регрессионных моделей (3) и (4) приведены в табл. 5. Как следует из табл. 5, уровни значимости $p\text{-level}$ для всех предикторов получились равными и меньшими 0,01 за исключением индекса $\text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1)$ в уравнении (4) ($p\text{-level} = 0,018$); общие линейные коэффициенты корреляции довольно большие; коэффициенты детерминации (0,81 и 0,71) больше критического значения 0,5–0,6 [29]; для критериев Фишера выполняется неравенство ($F > 5F_{\text{кр}}$) [29]. Таким образом, приведенные в табл. 5 параметры статистических уравнений (3–4) свидетельствуют об адекватности (значимости) полученных моделей и расчеты по уравнениям соответствуют исходным данным ледовитости.

Таблица 5

Статистические параметры регрессионных моделей (3) и (4).

Обозначения указаны в табл. 4

Statistical parameters of regression models (3) and (4). The notations are given in Table 4

Lw2; $R = 0,90$; $R^2 = 0,81$; $F(5,110) = 89,4$; $F_{\text{кр}} = 3,2$					Le2; $R = 0,845$; $R^2 = 0,71$; $F(5,110) = 52,7$; $F_{\text{кр}} = 3,2$				
	Уравнение 3	ρ	$p\text{-level}$	Вклад, %		Уравнение 4	ρ	$p\text{-level}$	Вклад, %
1	$\text{d}\varepsilon(0)$	0,44	0,000	37	1	$\text{dX}(-1)$	-0,36	0,000	14
2	$\text{lod}(-1)$	0,22	0,000	9	2	$\text{SA}(-5)$	0,25	0,000	7
3	$\text{SA}(-4)$	-0,12	0,008	3	3	$\text{AO}_{\text{X-III}}(0)$	-0,33	0,000	12
4	$\text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1)$	-0,13	0,003	3	4	$\text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1)$	-0,12	0,019	2
5	$\text{AMO}(-5)$	-0,39	0,000	29	5	$\text{AMO}(-8)$	-0,57	0,000	36

Сравнивая структуру уравнений (1), (2) и (3), (4) отмечаем, что в них вошли одни и те же астрогеофизические предикторы, за исключением индекса dDS . Гидрометеорологический индекс $\text{PNA}_{\text{IV-IX}}(-1)$ вошел в оба уравнения (3), (4), индекс

AO_{x-III} оказался значимым для ледовитости восточных морей. Из оценок вклада предикторов видим, что ледовитость Запада Арктики в большей степени определяется колебаниями угловой компоненты наклона оси вращения Земли (37 %) и поступлением теплых атлантических вод АМО(-5) (29 %). При этом вклад астрогеофизических факторов $d\epsilon(0)$, $lod(-1)$, $SA(-4)$ в общую дисперсию долгопериодных изменений ледовитости западных морей в полтора раза больше, чем гидрометеорологических факторов АМО(-5), $PNA_{IV-IXI}(-1)$.

Вклад гидрометеорологических факторов в дисперсию ледовитости восточных морей (50 %, табл. 5) в 2,4 раза больше вклада астрогеофизических (21 %, табл. 5). Вероятной причиной такого различия является удаленность от Северной Атлантики, определенная закрытость восточного сектора Арктики от Тихого океана, большая подверженность влиянию атмосферной циркуляции, а также неудовлетворительная реконструкция временного ряда ледовитости с 1900 г. по 1932 г. Обратим внимание на изменение роли астрогеофизических факторов при расширении числа переменных. Общий вклад астрогеофизических факторов в дисперсию ледовитости западных морей после дополнительного включения в анализ гидрометеорологических факторов сократился с 72 % (табл. 4) до 49 % (табл. 5), а для восточных морей — с 60 % (табл. 4) до 21 % (табл. 5). Можно предположить, что часть гидрометеорологических факторов зависит от астрогеофизических параметров, уменьшив прямой вклад астрогеофизических факторов. Однако этот вопрос требует дополнительного изучения.

Рассмотрим роль каждого гидрометеорологического фактора в формировании долгопериодных колебаний ледовитости, принимая во внимание знаки, с которыми индексы входят в уравнения. Теплые атлантические воды (индекс АМО(-5)) непосредственно влияют на ледовитость западной части Арктики, а временной лаг в пять лет представляет средний промежуток времени распространения атлантических вод от Северной Атлантики до западных морей [1]. Влияние атлантических вод на ледовитость восточного сектора Арктики опосредовано. Индекс АМО(-8) отражает состояние фронтальной зоны между водами атлантического и тихоокеанского происхождения, а временной лаг в восемь лет равен средней продолжительности адвекции атлантических вод от Северной Атлантики до хребтов Ломоносова-Менделеева. Положительная аномалия индекса АМО(-8) означает, что фронтальная зона трансполярного дрейфа смешена на восток, антициклонический круговорот воды и льдов занимает более южное положение, поэтому в северных частях восточных арктических морей преобладает вынос льдов в Арктический бассейн, что уменьшает ледовитость морей. При отрицательной аномалии АМО(-8) наблюдается обратная ситуация.

Положительное значение индекса PNA описывает ситуацию ветровых потоков с юга-запада на северо-восток над западными арктическими морями, которые вызывают уменьшение ледовитости этих морей. Циклонический режим атмосферной циркуляции (индекс АО положительный) сопровождается уменьшением площади льдов в восточных арктических морях. При антициклоническом режиме (индекс АО отрицательный) расширяется антициклонический круговорот поверхностных вод и льдов в Амеразийском суббассейне, на северных границах

восточных морей формируется заток льдов из Арктического бассейна, что сопровождается увеличением ледовитости этих морей [1]. Интерпретация вклада астрогеофизических членов описана выше.

По уравнениям (1)–(4) были выполнены диагностические расчеты ледовитости морей с использованием базовых предикторов для периода с 1901 г. по 2016 г. Также были выполнены расчеты ледовитости для периода с 2017 г. по 2019 г. с использованием независимого материала, т.е. предикторов, которые не вошли в рабочую базу при построении уравнений. На рис. 2 *а* и рис. 2 *б* приведены временные кривые фактических и расчетных значений ледовитости. Из рисунков видно, что изменчивость трехлетней скользящей средней величины площади льдов западных морей в августе хорошо воспроизводится моделями. При этом изменения наклона оси вращения Земли и скорости вращения Земли играют важную роль в макромасштабной долговременной изменчивости ледовитости в западной (приатлантической) части Арктики. Менее успешно воспроизводятся колебания ледовитости восточных арктических морей.

На рис. 2 *а* и рис. 2 *б* также приведены результаты предвычисления ледовитости с помощью уравнений (3) и (4) по независимым предикторам. Среднеквадратическая величина расхождения между фактическими и предвычисленными данными для трех лет (2016–2018 гг.) составила для западных морей 12 % и восточных 18 % от среднеквадратического отклонения вариаций ледовитости за период с 1901 г. по 2018 г. и, соответственно, 3,6 и 5,6 % от общей амплитуды изменения

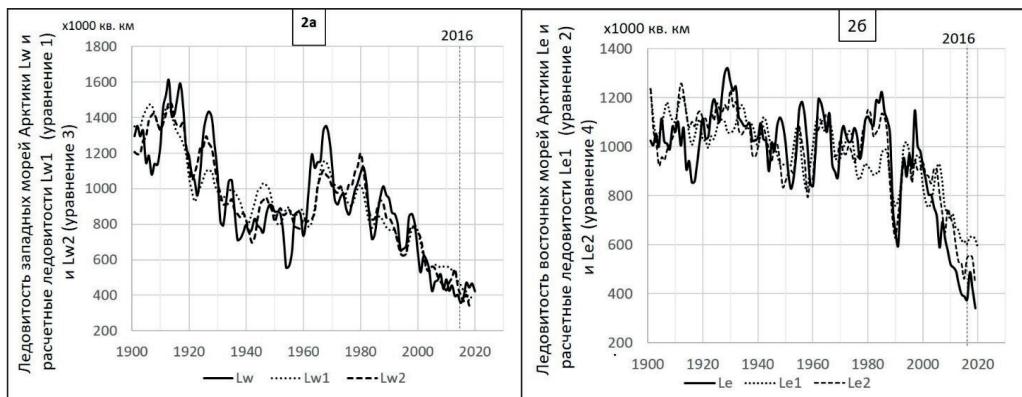


Рис. 2. Фактические и рассчитанные площади льдов в августе: (а) в западных морях Lw, Lw1, Lw2 и (б) в восточных морях Le, Le1, Le2 Арктики для периода с 1901 г. по 2015 г., ограниченного на рисунках вертикальной штрихпунктирной линией.

Расчеты ледовитости для периода с 2017 г. по 2020 г. по независимым значениям предикторов приведены справа от штрихпунктирной линии.

Fig. 2. Actual and calculated ice areas in August:

(a) in the western seas Lw, Lw1, Lw2 and (b) in the eastern seas Le, Le1, Arctic Le2 for the period 1901–2015, limited in the drawings by a vertical bar line.

Ice calculations for 2016–2018 for independent predictor values are given to the right of the dotted line.

ледовитости в 1901—2015 гг. Такая достаточно высокая точность предвычисления многолетней изменчивости площади льдов арктических морей получена впервые.

Анализ устойчивости статистических уравнений связи ледовитости с астрогеофизическими и гидрометеорологическими параметрами

Полученные статистические критерии уравнений (1)—(4) свидетельствуют об адекватности полученных моделей и расчеты по уравнениям соответствуют исходным данным ледовитости. Следовательно, разработанные модели подтверждают наличие сопряженности долгопериодных колебаний ледовитости арктических морей и астрогеофизических факторов, как независимо, так и в комплексе с гидрометеорологическими факторами.

С точки зрения использования статистической модели для прогнозирования ледовитости, критерия статистической адекватности недостаточно. В работе [29] указывается, что прогностическая адекватность достигается при увеличении F_{kp} минимум в 4—5 раз, и это условие выполняется для моделей (1—4). Но дополнительным критерием возможности использования модели для прогноза является сохранение структуры статистического уравнения при изменении длины выборки, а также оценка надежности модели путем проверки ее точности по независимой выборке, поэтому были выполнены расчеты на измененной длине ряда (1933—2010 гг.). В результате применения мультирегрессионного анализа методом исключения используемых предикторов (астрогеофизических и гидрометеорологических) были получены следующие уравнения:

$$\begin{aligned} Lw2_{(1933-2010)} = & 11262,6 * de(0) + 100,09 * lod(0) - 0,59 * SA(-4) - \\ & - 2042,7 * X(0) - 223,1 * PNA_{IV-IX}(-1) - 301,73 * AMO(-5) + 7057,0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Le2_{(1933-2010)} = & -1287,8 * dX(-1) + 0,77 * SA(-5) + 332,2 * Ds(2) - \\ & - 105,5 * AO_{X-III}(0) - 288,2 * PNA_{IV-IX}(-1) - 745,1 * AMO(-8) + 15331,6. \end{aligned} \quad (6)$$

Как видим, в уравнения (5) и (6) вошли те же предикторы, что и в уравнения (3) и (4), но добавились переменная $X(0)$ в уравнении (5) для западных морей и $Ds(2)$ в уравнении (6) для восточных морей. Таким образом, при изменении длины выборки структура уравнений в общем сохранилась, что свидетельствует об устойчивости моделей, по крайней мере, на временных диапазонах 1901—2016 гг. и 1933—2010 гг.

Из оценок качества построенных моделей (табл. 6) следует, что ее стандартная ошибка для зависимых предикторов (S_1) меньше среднего квадратичного отклонения $\sigma_{\Delta L}$ предиктантов ($Lw2_{(1933-2010)}$ и $Le2_{(1933-2010)}$). При этом коэффициент детерминации R^2 больше 0,5—0,6 [29]; модели адекватны по критерию Фишера ($F > 5F_{kp}$); показатель качества модели $S_1/\sigma_{\Delta L}$ меньше требуемого предела 0,8. Следовательно, критерии качества моделей показывают, что полученные уравнения (5) и (6) являются статистически значимыми. И поскольку средняя квадратичная ошибка расчета S_2 меньше среднего квадратичного отклонения предиктора $\sigma_{\Delta L}$, принимаемого за предельную ошибку в сверхдолгосрочных прогнозах [29] (отношение $S_2/\sigma_{\Delta L}$ значительно меньше 0,8), то статистические модели характеризуются достоверностью.

Таблица 6

Статистические параметры регрессионных моделей (5) и (6). В таблице обозначены:

S_1, S_2 — средняя квадратичная ошибка расчетов по зависимым (индекс 1) и независимым (индекс 2) предикторам; $\sigma_{\Delta L}$ — среднее квадратичное отклонение предикторов ($Lw2_{(1933-2010)}$ и $Le2_{(1933-2010)}$)

Statistical parameters of regression models (5) and (6). The table shows:

S_1, S_2 — the root mean square error of the test calculations for dependent (index 1) and independent (index 2) predictors; $\sigma_{\Delta L}$ — the root mean square deviation of the predictors ($Lw2_{(1933-2010)}$ and $Le2_{(1933-2010)}$)

	$Lw2_{(1933-2010)}$	$Le2_{(1933-2010)}$
Общий коэффициент корреляции, R	0,82	0,86
Коэффициент детерминации, R^2	0,68	0,75
Критерий Фишера, F	$F(5,74) = 31,2$	$F(5,74) = 43,6$
Табличное значение критерия Фишера, F_{kp}	2,3	2,3
Показатель качества модели, $S_1/\sigma_{\Delta L}$	0,54	0,35
Эффективность расчета по независимым предикторам, $S_2/\sigma_{\Delta L}$	0,43	0,37

По уравнениям (5) и (6) были произведены расчеты ледовитости на независимом ряде предикторов 2011—2020 гг. (на рис. 3 результаты расчета приведены

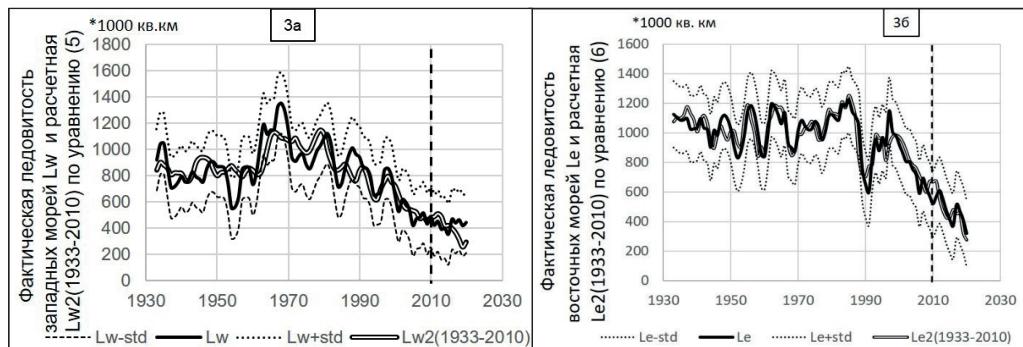


Рис. 3. Фактические Lw , Le (толстые черные линии) и рассчитанные $Lw2_{(1933-2010)}$, $Le2_{(1933-2010)}$ (тонкие двойные линии) площади льдов в августе в западных (а) и в восточных (б) морях Арктики для периода с 1933 г. по 2010 г., ограниченного на рисунках вертикальной штриховой линией. Пунктирными линиями нанесены значения ледовитости минус и плюс стандартное отклонение ($Lw-std$, $Le-std$ и $Lw+std$, $Le+std$).

Расчеты ледовитости для периода с 2011 г. по 2020 г. по независимым значениям предикторов приведены справа от вертикальной штриховой линии.

Fig. 3. Actual Lw , Le (thick black lines) and calculated $Lw2_{(1933-2010)}$, $Le2_{(1933-2010)}$ (thin double lines) ice areas in August in the western (a) and eastern (b) Arctic seas for the period 1933—2010, limited in the figures by a vertical dashed line. The dotted lines show the values of the arctic ice areas minus and plus the standard deviation ($Lw-std$, $Le-std$ and $Lw+std$, $Le+std$).

Calculations of ice cover for 2011—2020 based on independent predictor values are shown to the right of the vertical dashed line.

справа от вертикальной штриховой линии) и выполнены оценки точности расчета ледовитости, которые приведены в последней строке табл. 6. Результаты показывают удовлетворительную эффективность расчетов, свидетельствуют об адекватности (значимости) полученных моделей, о соответствии расчетов исходным данным ледовитости и подтверждают достоверность статистических моделей. Выполненное исследование может служить хорошим основанием для развития методов сверхдолгосрочного расчета и прогноза ледовитости путем построения статистических и физико-статистических моделей.

Заключение

Выполненный анализ установил тесную сопряженность между долгопериодными колебаниями ледовитости арктических морей и выбранными астрогеофизическими параметрами. Использование в качестве предикторов только астрогеофизических характеристик позволяет получить статистические уравнения многолетних изменений площади льдов в августе и описать 71 % и 51 % общей дисперсии изменчивости ледовитости соответственно западных и восточных морей Арктики.

Дополнительное подключение в анализ гидрометеорологических факторов повышает точность воспроизведения долгопериодных изменений ледовитости на 11—25 %. Получены оценки вклада астрогеофизических и гидрометеорологических параметров в общую дисперсию ледовитости западных и восточных морей Арктики, которые равны для западных морей 49 % и 32 % и для восточных 33 % и 38 %. Но если отнести влияние Атлантики (индекс АМО) к внешним факторам, то вклады внешних (включая астрогеофизические) и гидрометеорологических параметров в общую дисперсию ледовитости западных и восточных морей Арктики изменяются и равны для западных морей 78 % и 3 % и для восточных 69 % и 2 %, соответственно.

Расчет ледовитости на три и десять лет вперед по полученным уравнениям с независимыми астрогеофизическими и гидрометеорологическими предикторами демонстрируют удовлетворительно согласие предвычисленных величин и фактических данных ледовитости. Этот результат свидетельствует об успешном моделировании многолетних колебаний ледовитости.

Авторское исследование является развитием статистического подхода к моделированию долговременных колебаний ледовитости морей Арктики, ключевым моментом которого стало включение в предикторы астрогеофизических параметров наряду с традиционными гидрометеорологическими индексами. Этот подход является новой парадигмой методологии комплексного описания многолетних колебаний ледовитости, и может служить хорошим основанием для развития методов сверхдолгосрочного расчета и прогноза не только летней ледовитости арктических морей, но и других характеристик климатического состояния Арктики.

Литература

1. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова Евразийского шельфа / СПб: Наука. 2007. 135 с.

2. Timokhov L., Ashik I., Kirillov S. et al. Extreme Changes of the Arctic Ocean during and after IPY2007/2008 // *Polarforschug*. 2012. V. 81. No. 2. P. 85—102.
3. Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундамент. и прикладная климатология*. 2015. №1. С. 11—26.
4. Aksenen Y., Popova E. E., Yool A. et al. On the future navigability of Arctic sea routes: High-resolution projections of the Arctic Ocean and sea ice // *Marine Policy*, 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
5. Максимов И. В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 447 с.
6. Гудкович З. М., Саруханян Э. И., Смирнов Н. П. «Полночный прилив» в атмосфере высоких широт и колебания ледовитости арктических морей // *Доклады АН*. 1970. Т. 190, № 3. С. 954—957.
7. Слепцов-Шевлевич Б. А., Бояринов А. М. Солнечный ветер, вращение Земли и климат. Санкт-Петербург: 2002. 159 с.
8. Дмитриев А. А., Белязо В. А., Гудошников Ю. П. Ритмические колебания земных природных процессов и их гравитационная обусловленность. СПб: Издательство Политехнического университета, 2011. 231 с.
9. Визе В. Ю. Колебания солнечной активности и ледовитости полярных морей / Доклады юбилейной сессии Арктического института. Л., изд-во Глазевморпути, 1945. 7 с.
10. Карклин В. П. 22-летний цикл солнечной активности и поле атмосферного давления умеренных и высоких широт северного полушария // *Известия ВГО*, 1973, № 3, С. 275—280.
11. Карклин В. П., Ковалев Е. Г. Влияние солнечной активности на формирование крупных аномалий ледовитости арктических морей // *Труды ААНИИ*. 1994. Т. 432. С. 28—35.
12. Санцевич Т. И. К методике долгосрочных гидрометеорологических прогнозов для Арктики // *Труды ААНИИ*. 1970. Т. 292. С. 49—86.
13. Слепцов-Шевлевич Б. А. Геофизические основы морских гидрологических прогнозов. М.: В/О “Мортехинформреклам”. 1991. 103 с.
14. Егоров А. Г. Солнечный цикл и два режима многолетнего изменения приземного давления в высоких и умеренных широтах северного полушария Земли в зимний период // *Доклады Академии Наук*. 2007. Т. 414. № 3. С. 402—407.
15. Слепцов-Шевлевич Б. А., Захаров В. Ф. Проявление солнечной активности в многолетних колебаниях ледовитости в приатлантической Арктике // *Известия Русского геогр. о-ва*. 1996. Т. 128. Вып.2. С. 55—58.
16. Ogurtsov M. G., Nagovitsyn Yu. A., Kocharov G. E. and Jungner H. Long period cycles of the sun’s activity recorded in direct solar data and proxies // *Solar Physics* 2002. 211: 371—394.
17. Гудкович З. М., Карклин В. П., Фролов И. Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова, Евразийских арктических морей и их возможные причины // *Метеорология и гидрология*. 2005. №6. С. 5—14.
18. Федоров В. М. Солнечная радиация и климат Земли. М.: ФИЗМАТГИЗ, 2018. 232 с.
19. Лесгафт Э. Льды Северного Ледовитого океана и морской путь из Европы в Сибирь. СПб., 1913.
20. Визе В. Ю. Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Труды ААНИИ. Т. 190. М.: Изд-во Глазевморпути. 1944б. 274 с.
21. Захаров В. Ф. Морские льды и климат. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 92 с.
22. Vinje T. Fram strait ice fluxes and atmospheric circulation: 1950—2000 // *J. Climate*. 2001. No.14. P. 3508—3517.
23. Карклин В. П., Юлин А. В., Карелин И. Д., Иванов В. В. Климатические колебания ледовитости арктических морей сибирского шельфа // *Тр. ААНИИ*. 2001. Т. 443. С. 5—11.
24. Лебедев А. А., Миронов Е. У. Реконструкция ледовых условий в Северной Атлантике и прилегающих морях в годы Второй Мировой войны // *Труды ААНИИ*. 2001. Т. 443. С. 30—37.
25. Йоханнессен О. М., Александров В. Ю., Фролов И. Е. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 3. Дистанционное зондирование морских льдов на Северном морском пути: изучение и применение. СПб.: Наука, 2007. 512 с.
26. Единая система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <http://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php> (дата обращения 24.06.2019).
27. Медведев И. П., Куликов Е. А., Рабинович А. Б., Лапшин В. Б. Чандлеровские биения и полночный прилив в Северном и Балтийском морях // *Гелиогеофизические исследования*. 2018. Вып. 18. С. 9—17.

28. Электронный ресурс <http://statistica.ru/theory>
29. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003, 129 с.
30. Тимохов Л. А., Бородачев В. Е., Бородачев И. В. и др. Роль гидрометеорологических факторов и солнечной активности в межгодовых изменениях площади льдов Восточно-Сибирского моря // Лёд и Снег. 2019. 59(2). С. 222—233.
31. 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. 58(1). 127—134.
32. Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming // J. Climate. 2010. 23(14): 3888—3906.
33. Тимохов Л. А., Малинин В. Н., Иванов В. В. Связь долговременных изменений температуры воздуха в Арктике с колебаниями гидрометеорологических и астрогеофизических факторов // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 451—473.

References

1. Frolov I. E., Goodkovich Z. M., Karklin V. P. et al. *Nauchnyye issledovaniya v Arktike. T. 2. Klimaticheskiye izmeneniya ledyanogo pokrova Yevraziyskogo shelfa = Scientific research in the Arctic. T. 2. Climatic changes in the ice sheet of the Eurasian shelf.* St. Petersburg: Nauka. 2007:135 p. (In Russ.).
2. Timokhov L., Ashik I., Kirillov S. et al. Extreme Changes of the Arctic Ocean during and after IPY2007/2008. *Polarforschug.* 2012; 81(2): 85—102.
3. Alekseev G. V. Development and amplification of global warming in the Arctic. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologija = Fundamental and applied climatology.* 2015; (1): (11—26). (In Russ.).
4. Aksenov Y., Popova E. E., Yool A. et al. On the future navigability of Arctic sea routes: High-resolution projections of the Arctic Ocean and sea ice. *Marine Policy.* 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
5. Maximov I. V. *Geofizicheskiye sily i vody okean = Geophysical forces and waters of the ocean.* Lenigrad: Gidrometeoizdat. 1970: 447 p. (In Russ.).
6. Gudkovich Z. M., Sarukhanyan E. I., Smirnov N. P. “Polar tide” in the atmosphere of high latitudes and fluctuations of ice cover of the Arctic seas. *Doklady of the Academy of Sciences = Reports earth sciences.* 1970; (190)3: (954—957). (In Russ.).
7. Sleptsov-Shevlevich B. A., Boyarinov A. M. *Solnechnyy veter, vrashcheniye Zemli i klimat = Solar wind, Earth rotation and climate.* St. Petersburg. 2002: 159 p. (In Russ.).
8. Dmitriev A. A., Belyazo V. A., Gudoshnikov Yu. P. *Ritmicheskiye kolebaniya zemnykh prirodnykh protsessov i ikh gravitatsionnaya obuslovlennost' = Rhythmic fluctuations of terrestrial natural processes and their gravitational conditionality.* St. Petersburg: Izdatelstvo Politekhnicheskogo Universiteta. 2011: 231 p. (In Russ.).
9. Vise V. Yu. *Kolebaniya solnechnoy aktivnosti i ledovitosti polyarnykh morey / Doklady yubileynoy sessii Arkticheskogo instituta = Fluctuations of solar activity and ledovitost of the polar seas. Doklady yubileynoy sessii Arcticheskogo instituta.* Leningrad: Izdatelstvo Glavsevmorputi. 1945. (In Russ.).
10. Karklin V. P. 22-year cycle of solar activity and the atmospheric pressure field of the temperate and high latitudes of the northern hemisphere. *Izvestiya VGO = VGO News.* 1973; (3): (275—280) (In Russ.).
11. Karklin V. P., Kovalyov E. G. Influence of solar activity on forming of large anomalies of a ledovitost of the Arctic seas. *Trudy Arkhicheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proceeding of the AARI.* 1994; (432): (28—35). (In Russ.).
12. Santsevich T. I. To a technique of long-term hydrometeorological forecasts for the Arctic. *Trudy Arkhicheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proceeding of the AARI.* 1970; (292): (49—86). (In Russ.).
13. Sleptsov-Shevlevich B. A. *Geofizicheskiye osnovy morskikh gidrologicheskikh prognozov = Geophysical bases of sea hydrological forecasts.* Moscow: Morskikhinformreklam. 1991:103 p. (In Russ.).
14. Egorov A. G. Solar cycle and two regimes of long-term changes in surface pressure in high and temperate latitudes of the Earth's northern hemisphere in winter. *Doklady Akademii Nauk. = Reports of the Academy of Sciences.* 2007; 414(3): (402—407). (In Russ.).

15. Sleptsov—Sheylevich B. A., Zakharov V. F. Manifestation of solar activity in long—term fluctuations of a ledovitost in the prialantichesky Arctic. *Izvestiya russkogo geograficheskogo obschestva = News RGO*. 1996; 128(2): (55—58). (In Russ.).
16. Ogurtsov M. G., Nagovitsyn Yu. A., Kocharov G. E. and Jungner H. Long period cycles of the sun's activity recorded in direct solar data and proxies. *Solar Physics*. 2002; (211): 371—394.
17. Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Frolov I. E. Centuries-old climate and ice cover of the Eurasian Arctic seas changes and their possible causes. *Meteorologiya i Gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2005; (6): (5—14). (In Russ.).
18. Fedorov V. M. *Solnechnaya radiatsiya i klimat Zemli = Solar radiation and climate of the Earth*. Moscow: Fizmatgiz. 2018: 232 p. (In Russ.).
19. Lesgaft E. *L'dy Severnogo Ledovitogo okeana i morskoy put' iz Yevropy v Sibir' = The ice of the Arctic Ocean and the sea route from Europe to Siberia*. St. Petersburg, 1913.
20. Wiese V. Y. *Osnovy dolgosrochnykh ledovykh prognozov dlya arktycheskikh morey. = Fundamentals of long-term ice forecasts for the Arctic seas*. Proceedings of the AARI. Moscow: Glavsevmorput publishing house. 1944; (190): 274 p. (In Russ.).
21. Zakharov V. F., Malinin V. N. *Morskiye l'dy i klimat = Sea ice in the climate*. St. Petersburg, Hydrometeoizdat. 2000: 92 p. (In Russ.).
22. Vinje T. Fram strait ice fluxes and atmospheric circulation: 1950-2000. *J. Climate*. 2001; (14): 3508—3517.
23. Karklin V. P., Yulin A. V., Karelina I. D., Ivanov V. V. Climatic fluctuations of the Arctic seas of the Siberian shelf. *Trudy Arktycheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proceeding of the AARI*. 2001; (443): (5—11). (In Russ.).
24. Lebedev A. A., Mironov E. U. Reconstruction of ice conditions in the North Atlantic and adjacent the seas during the Second World War. *Trudy Arktycheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proceeding of the AARI*. 2001; (443): (30—37). (In Russ.).
25. Johannessen O. M., Alexandrov V. Yu., Frolov I. Ye., et al. *Nauchnye issledovaniya v Arktike. Vol. 3. Distantionnoye zondirovaniye morskikh l'dov na Severnom morskem puti: izucheniiye i primeneniye = Scientific research in Arctic. Vol. 3. Remote Sensing of Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications*. SPb.: Nauka, 2007: 512 p. (In Russ.).
26. Electronic resource <https://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php>
27. Medvedev I. P., Kulikov E. A., Rabinovich A. B., Lapshin V. B. Chandler Beats and Pole Tide in the North and Baltic Seas. *Geliogeofizicheskiye issledovaniya = Heliogeophysical Research*. 2018; (18): (9—17). (In Russ.).
28. Electronic resource <http://statistica.ru/theory>.
29. Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Fiziko-statisticheskiy metod prognoza okeanologicheskikh kharakteristik (na primere Severo-Yevropeyskogo basseyna). = Physico-statistical method for predicting oceanological characteristics (on the example of the North European Basin)*. Murmansk, PINRO Publishing House. 2003: 129 p. (In Russ.).
30. Timokhov L. A., Borodachev V. E., Borodachev I. V. et al. A role of hydrometeorological factors and solar activity in interannual changes of the area of ice of the East Siberian Sea. *Led i sneg Ice = Ice and Snow*. 2019; 59(2): (222—233). (In Russ.).
31. Timokhov L. A., Vyazigina N. A., Mironov E. U., Popov A. V. Features of seasonal and interannual variability of an ice cover of the Greenland Sea. *Led i sneg Ice = Ice and Snow*. 2018; 58(1): (127—134). (In Russ.).
32. Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of polar amplification in long—term surface air temperature variations and modern arctic warming. *J. Climate*, 2010. 23(14): 3888—3906.
33. Timokhov L. A., Malinin V. N., Ivanov V. V. Relationship of Long-Term Changes in Arctic Air Temperature with Fluctuations in Hydrometeorological and Astrogeophysical Factors. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2024; (76): (451—473). (In Russ.).

Информация об авторах

Тимохов Леонид Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела океанологии, ФГБУ «ААНИИ», ltim@aari.ru.

Фролов Иван Евгеньевич, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, научный руководитель ФГБУ «ААНИИ».

Белязо Валерий Александрович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, отдел ледового режима и прогнозов, ФГБУ «ААНИИ», v—belizo37@mail.ru.

Дмитриев Александр Алексеевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «ААНИИ», aad1907@yandex.ru.

Трошичев Олег Александрович, доктор физико-математических наук, научный руководитель отдела геофизики, ФГБУ «ААНИИ», olegtro@aari.ru.

Information about the authors

Timokhov L. A., Doctor of Physical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Department of Oceanology, Federal State Budgetary Institution Arctic and Antarctic Research Institute.

Frolov I. E., Doctor of Geography Sciences, Professor, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, scientific director of Arctic and Antarctic Research Institute.

Belyazo V. A., Candidate of Geography Sciences, Senior Researcher, Department of Ice Regime and Forecasts, Arctic and Antarctic Research Institute.

Dmitriev A. A., Candidate of Geography Sciences, Senior Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute.

Troshichev O. A., Doctor of Physical Sciences, Scientific Director of the Department of Geophysics, Arctic and Antarctic Research Institute.

Конфликт интересов: **конфликт интересов отсутствует.**

*Статья поступила 13.08.2025
Принята в печать 07.11.2025*

*The article was received on 13.08.2025
The article was accepted on 07.11.2025*