

Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.467.3:551.326.1

doi: 10.31857/S2076673421030099

Информативность гидрометеорологических и астрогеофизических факторов в задаче описания межгодовых колебаний ледовитости Гренландского моря

© 2021 г. Н.А. Вязигина*, Л.А. Тимохов, Е.С. Егорова, А.В. Юлин

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

*navyazigina@aari.ru

Informativeness (information-bearing) of hydrometeorological and astrogeophysical factors in the problem of describing interannual fluctuations of the Greenland Sea ice coverage

N.A. Viazigina*, L.A. Timokhov, E.S. Egorova, A.V. Yulin

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*navyazigina@aari.ru

Received September 1, 2020 / Revised March 30, 2021 / Accepted June 25, 2021

Keywords: *Greenland Sea, hydrometeorological and astrogeophysical impact, ice coverage, interannual variability, multiple regression, sea ice, statistical equations for diagnosis.*

Summary

The interannual changes in ice coverage in the Greenland Sea for the winter (December–April), spring (May–June), summer (July–September), and autumn (October–November) seasons for the period 1950–2018 are considered. The presence of negative linear trends and the polycyclic oscillations of the ice coverage variability for all seasons has been confirmed. Using spectral analysis, the dominant fluctuations from 5 to 22 years were identified. The cross-correlation method allowed us to determine the significant relationship of the Greenland Sea ice coverage with hydrometeorological and astrogeophysical factors. The statistically significant relationship of the ice coverage for a concrete year with similar characteristics for a previous period persisting up to three years had been noted. The highest cross-correlation coefficients were noted in the winter and spring seasons. The ice coverage of the autumn season demonstrates the persistence of the inertia of ice conditions for up to two years. The analysis of correlations with astrogeophysical parameters revealed the closest relationship between the ice coverage and the longitude coordinate of the Earth's pole position, the nutation parameters of the Earth's axis, and the distance between the Earth and the Sun. When constructing the multi-regression equations, we investigated the informativeness of various hydrometeorological and astrogeophysical factors in the models of the ice coverage variability for each season. The following estimates of quality of the models were obtained: correlation coefficients (up to 0.89), determination coefficients (to up 0.80), and a model reliability which depends on the admissible forecast error and includes the mean square deviation of the investigated value) – up to 99%). The informativeness of various factors was estimated and the contribution to the total variance was revealed: hydrometeorological factors – up to 70%; astrogeophysical factors – up to 50%. The obtained statistical equations can be used for the diagnosis and for development of methods for the very-long-term forecast of the Greenland Sea ice coverage.

Citation: Viazigina N.A., Timokhov L.A., Egorova E.S., Yulin A.V. Informativeness (information-bearing) of hydrometeorological and astrogeophysical factors in the problem of describing interannual fluctuations of the Greenland Sea ice coverage. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (3): 431–444. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421030099.

Поступила 1 сентября 2020 г. / После доработки 30 марта 2021 г. / Принята к печати 25 июня 2021 г.

Ключевые слова: *Гренландское море, гидрометеорологические и астрогеофизические воздействия, ледовитость, межгодовая изменчивость, множественная регрессия, морской лёд, статистические уравнения для диагностики.*

Подтверждены отрицательные линейные тренды и полицикличность ледовитости Гренландского моря. Установлена тесная связь изменения ледовитости с температурой воздуха и индексами атмосферной циркуляции, а также с долготной координатой положения полюса Земли, параметрами нутации оси Земли и расстоянием между Землей и Солнцем. Получены физико-статистические уравнения изменения ледовитости для всех сезонов с учётом влияния различных факторов и оценена их информативность по вкладу каждого фактора в общую дисперсию. На долю гидрометеорологических индексов приходится до 70%, астрогеофизических – до 50%.

Введение

Северо-Европейский бассейн – своего рода «кухня погоды» всей Европы и имеет как научное, так и практическое значение для различных исследований. В этом регионе взаимодействуют основные центры действия атмосферы, зарождаются и проходят пути североатлантических циклонов и функционирует сложная система океанических течений, а для ледяного покрова характерны значительные сезонные и межгодовые изменения.

Гренландское море – часть Северо-Европейского бассейна. Оно представляет собой область выноса льдов и опреснённых вод из Арктического бассейна. В то же время Западно-Шпицбергенское течение, проходящее у западных берегов архипелага Шпицберген, несёт в Арктический бассейн тёплые и солёные воды Северной Атлантики [1]. Первые представления об изменчивости площади льда Северо-Европейского бассейна были получены ещё В.Ю. Визе [2]. В период с 1950 по 1987 г. В.А. Березкин, А.И. Каракаш, Г.К. Зубакин, А.А. Лебедев, Н.С. Уралов и др. [3–7] внесли значительный вклад в изучение механизмов формирования изменчивости ледовитости, а также в методы её долгосрочного прогнозирования. В 2004 г. Е.У. Миронов [8] обобщил имеющиеся данные по основным элементам ледового режима Гренландского моря, а также предложил новые методы прогноза изменения ледового режима заблаговременностью от одного до шести месяцев. Он выделил следующие факторы, влияющие на ледовитость Гренландского моря: температуру воздуха, атмосферную циркуляцию, температуру воды и течения, т.е. те основные параметры, в изменчивости которых выделяются квазициклические флуктуации разного масштаба. В работе [9] высказано обоснованное предположение, что высокочастотная часть в изменениях ледовитости формируется преимущественно в результате воздействия и взаимодействия ледяного покрова с гидрометеорологическими процессами.

Ещё в конце XVIII в. А.И. Воейков утверждал, что на климат и его изменчивость в основном влияет перемещение воздушных масс в результате влияния Солнца [10]. Именно выявлению доказательств непосредственного влия-

ния солнечной активности на атмосферную циркуляцию особое внимание уделялось учёными в 1960-х годах. Так, И.В. Максимов, М.С. Эйгенсон, Б.М. Рубашев и др. [11–13] показали, что на долгопериодные флуктуации ледовитости, прежде всего в низкочастотной части колебаний, могут влиять и астрогеофизические факторы, среди которых: деклинационный и полюсный прилив [14], скорость вращения Земли [15, 16] и солнечная активность [17–19]. М.И. Пудовкин [20] показал, что изменение потока поступающей солнечной энергии вызывает изменение температуры воздуха и высоты изобарических поверхностей в тропосфере, обуславливая этим заметные изменения скорости крупномасштабной циркуляции атмосферы. Анализ солнечно обусловленных изменений приземного и высотного давления позволил А.Г. Егорову [21, 22] установить их связь с многолетними особенностями распределения льдов в арктических морях в летний период.

Согласно В.М. Федорову [19], в результате малой изменчивости суммарного солнечного излучения главный механизм изменения инсоляции Земли связан с небесно-механическими процессами, которые вызывают изменение расстояния между Землёй и Солнцем, а также земной орбиты и наклона оси вращения Земли. В работе [23] показано, что наиболее значимый фактор, определяющий вариации максимальных и минимальных значений площади морских льдов в многолетнем режиме, – изменчивость приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации.

На крупномасштабную структуру уровня океана и циркуляцию вод, по И.В. Максимо-ву [11], влияют гравитационные силы Луны и Солнца и колебания скорости вращения Земли. Эта подгруппа переменных действует через парциальное изменение гравитационного поля, формирующее долговременную вынужденную волну приливного типа и возникновение парциального геострофического течения. Волной «полюсного прилива» Дж. Дарвин назвал вынужденную волну, возникающую в Мировом океане и связанную с колебаниями мгновенной оси вращения Земли [14]. Центробежная сила Земли изменяется в результате свободных 14-месячных колебаний (Чандлеровское колебание) и 12-месячных вынужденных колебаний оси вра-

щения Земли или движений мгновенного полюса Земли [24]. Наложение этих двух колебаний создаёт 6–7-циклическое биение.

В работах [25, 26] исследована роль гидрометеорологических факторов и солнечной активности в межгодовых изменениях ледовитости отдельных арктических морей. По нашему мнению, следующий шаг в развитии описания долгопериодных колебаниях ледовитости — включение в анализ отдельно не только гидрометеорологических индексов, но и астрогеофизических факторов, а также объединение их в единой статистической модели. Исследование механизмов долгопериодной изменчивости площади льда Гренландского моря как одного из индикаторов изменений климата становится с каждым годом актуальнее. Особенно это относится к разработке методик сверхдолгосрочных прогнозов с заблаговременностью более шести месяцев. Однако вопрос о факторах, формирующих межгодовые и климатические колебания ледовитости, до сих пор остаётся дискуссионным.

К задачам настоящей работы относятся:

1) оценка статистических связей между межгодовой изменчивостью площади льдов с гидрологическими, метеорологическими и астрогеофизическими факторами;

2) разработка статистических моделей долгопериодных колебаний ледовитости зимнего, весеннего, летнего и осеннего сезонов с помощью мультирегрессионного анализа путём перебора гидрометеорологических и астрогеофизических предикторов;

3) исследование информативности различных гидрометеорологических и астрогеофизических факторов при описании долгопериодных изменений ледовитости Гренландского моря.

Исходные сведения и методы анализа

Данные по *среднемесячным значениям ледовитости* Гренландского моря [27] получены на основе авиационных ледовых разведок (с 1950 до 1986 г.) и спутниковых данных путём дешифрирования спутниковых снимков в Центре «Север» ГНЦ АНИИ (с 1986 г. по настоящее время) [8, 28]. Под термином «ледовитость» понимается доля площади, занятая льдом любой сплочённости, по отношению к общей площади

моря или любого другого большого географического района. Этот район может быть глобальным, включающим в себя площадь морей целого полушария, или локальным, представляя собой только часть океана или моря [29]. Кроме того, для характеристики ледовитости используют также величину площади моря, занятую льдами.

В качестве характеристик *атмосферных процессов* мы выбрали среднегодовые и среднесезонные индексы крупномасштабной атмосферной циркуляции: АО (Арктическое колебание, Arctic Oscillation), АД (Арктический диполь, Arctic Dipole), Pacific North American oscillation (Тихоокеанско-Североамериканский индекс, PNA), North Atlantic Oscillation (Северо-Атлантическое колебание, NAO) и температуру воздуха T_a . Эти переменные использовались для описания долгопериодных колебаний ледовитости в арктических морях [8, 25, 26] и показали свою продуктивность. Временные серии индексов АО, АД, PNA любезно предоставил М.А. Janout [30]. Они представляют собой первые три моды разложения приземного атмосферного давления от 60° с.ш. до полюса по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ). Индекс АО воспроизводит ситуации повышения/понижения атмосферного давления над Арктикой, отображая интенсификацию широтного обмена. Индекс АД отображает интенсификацию меридионального обмена; третья мода EOF3 представляет собой диполь с осью, перпендикулярной оси АД. Данные индекса NAO, представляющего собой разницу высоты поверхности 500 гПа между пунктами в Исландии (64° с.ш., 24° з.д.) и вблизи Азорских островов (39° с.ш., 24° з.д.), взяты на сайте <https://www.spc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/>. Перечисленные индексы отражают характер воздушных переносов, которые индуцируют ветровой дрейф льдов, а также изменяют топографию поверхности моря, особенно вблизи берегов (сгонно-нагонные явления), и через градиент уровня влияют на дрейф ледяного покрова.

В базу *гидрометеорологических факторов* также вошли Атлантическое мультидекадное колебание (Atlantic Multidecadal Oscillation, АМО; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>) и температура воздуха T_a . Эти предикторы относятся к термодинамическим характеристикам, определяющим интенсивность фазовых перехо-

дов: таяние льда весной и летом и его нарастание осенью и зимой.

Астрогеофизические факторы составили две подгруппы.

1. Долгопериодные гравитационные силы Луны и Солнца и колебания скорости вращения Земли учитывались вариациями среднегодовых координат X , Y полюса Земли (<ftp://hpiers.obspm.fr/iers/series/opa/eopc04>) и среднегодовых параметров нутации оси Земли — $dEps$ и $dPsi$ (<https://datacenter.iers.org/eop/-/somos/5Rgv/latest/38>).

В качестве индекса скорости вращения Земли использована среднегодовая величина флуктуации продолжительности дня lod (length of day; <https://astro.ukho.gov.uk/nao/lvm/#tabs-d3>). Таким образом, флуктуации скорости вращения Земли изменяют ротационную часть гравитационного поля, создавая, по образному определению Б.А. Слепцова-Шевлевича [18], «ротационный прилив», а вариации положения полюса Земли формируют так называемый «полюсный прилив» [14].

2. Во вторую подгруппу включены величина солнечной активности V (среднегодовое число Вольфа) (https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt), а также среднее за шесть месяцев расстояние от Солнца до Земли в летнее (апрель—сентябрь) C_S и зимнее (октябрь—март) C_W полугодия (<https://soft-ok.net/226-astroprocessor-zet-9-lite.html>). Предполагается, что эти факторы оказывают как прямое термическое воздействие (изменение солнечной радиации в результате колебаний чисел Вольфа и за счёт изменения расстояния между Землей и Солнцем [20]), так опосредованное, через атмосферную циркуляцию.

Исходные среднемесячные значения ледовитости осреднялись по сезонам года в соответствии со следующими градациями [8]: зиме соответствуют месяцы с декабря по апрель, весне — с мая по июнь, лету — с июля по сентябрь и осени — с октября по ноябрь. Значения исследуемых индексов осреднялись также по сезонам, полугодиям и за год. Обработка временных рядов включала в себя спектральный, кросс-корреляционный и мультирегрессионный анализ, выполненный с помощью пакета анализа программы «Статистика» [31]. Описание используемых статистических методов приведено в приложении программ «Статистика», а также в работе [32].

Связь ледовитости Гренландского моря с гидрологическими, метеорологическими и астрогеофизическими факторами

Межгодовые изменения ледовитости Гренландского моря в зимний, весенний, летний и осенний сезоны приведены на рис. 1. Во всех сезонах за период 1950—2018 гг. выделяются линейные тренды, демонстрирующие уменьшение площади льдов в Гренландском море. На фоне линейных трендов наблюдаются колебания, размах которых для зимнего и весеннего сезонов (стандартное отклонение для этих периодов составляет $15 \cdot 10^4$ и $12 \cdot 10^4$ км² соответственно) больше, чем для летнего и осеннего сезонов (стандартное отклонение для них равно $9 \cdot 10^4$ и $8 \cdot 10^4$ км² соответственно). Для определения структуры доминирующих флуктуаций в межгодовых колебаниях площади льдов выполнен спектральный анализ временных рядов ледовитости для каждого сезона, результаты которого приведены на рис. 2. При исследовании для данной длины рядов (69 лет) статистически достоверны (расчёты по программе «Статистика») периоды не более 22-х лет. Как видно из графиков функции спектральной плотности, основные межгодовые колебания сезонной ледовитости сосредоточены в низкочастотной части спектра с периодами от 5 до 22-х лет.

Функции спектральной плотности зимнего и весеннего сезонов очень схожи: в этих спектрах выделяются циклические колебания с периодом 22 и 16—17 лет. В спектре весенних колебаний ледовитости значительная доля спектральной плотности приходится на цикличность с периодом 9 лет и меньшая — для вариации с периодом 5 лет. В высокочастотной части спектра зимних колебаний ледовитости отмечаются небольшие пики с периодами от двух до четырёх лет. Спектр межгодовых колебаний ледовитости в летний и осенний сезоны довольно близки друг к другу, но отличаются от цикличности зимне-весеннего периода за исключением присутствия колебания с периодом 23 года. В летне-осенний период обнаруживается довольно значительная цикличность — 13 лет, а также небольшие цикличности с периодом 6—7 лет. Амплитуды колебаний в высокочастотной части спектра в 2—3 раза меньше амплитуд колебаний с периодом 13 и 22 года.

Выполненный анализ временных рядов подтверждает тезис о полицикличности изменений

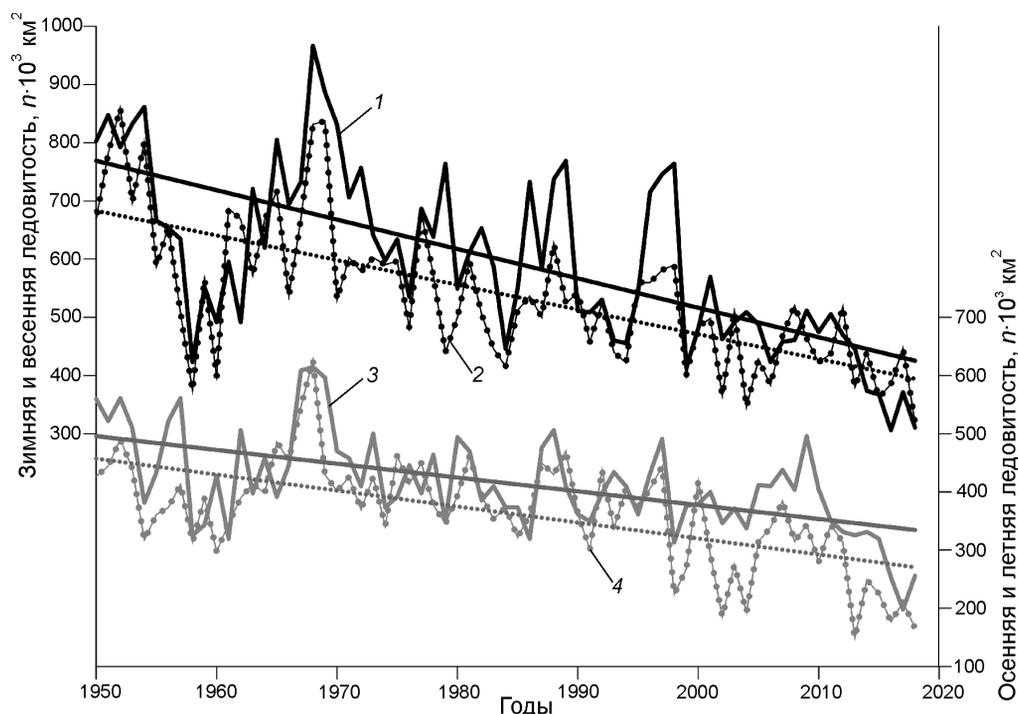


Рис. 1. Межгодовые изменения ледовитости Гренландского моря в сезоны: 1 – зимний; 2 – весенний; 3 – летний; 4 – осенний за период 1950–2018 гг. и их линейные тренды
Fig. 1. The interannual variability of the Greenland sea ice cover during the: 1 – winter; 2 – spring; 3 – summer; 4 – autumn seasons from 1950 to 2018 and linear trends

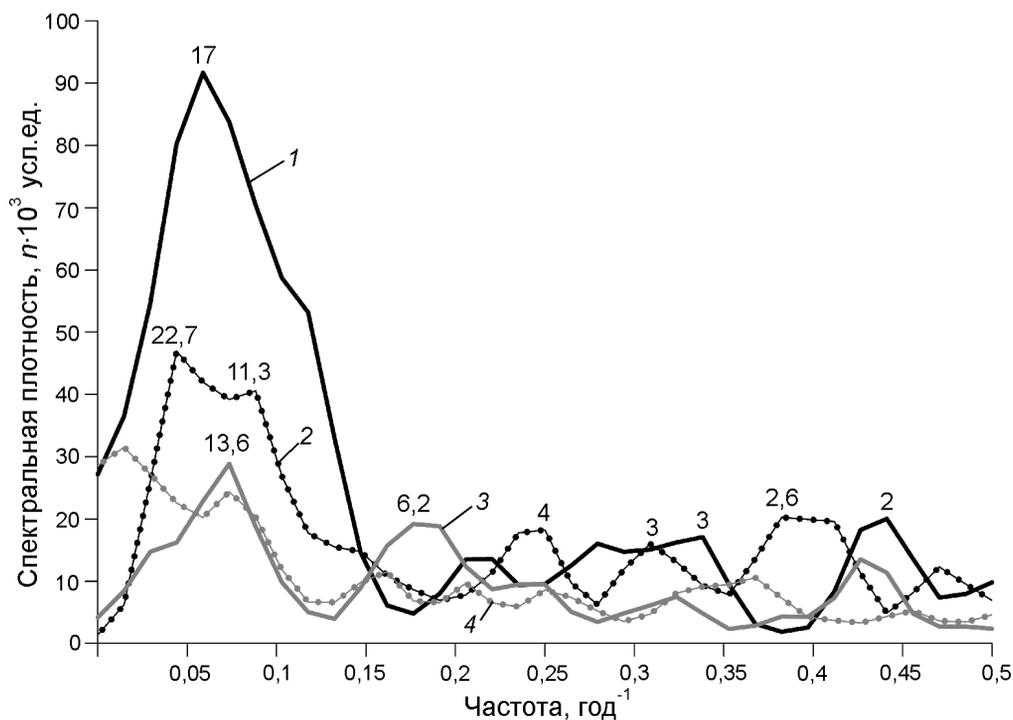


Рис. 2. Спектральные плотности межгодовых колебаний ледовитости Гренландского моря в сезоны: 1 – зимний; 2 – весенний; 3 – летний; 4 – осенний; над пиками функций спектральной плотности указаны периоды в годах
Fig. 2. The spectral densities of the Greenland Sea ice cover interannual fluctuations during the seasons: 1 – winter; 2 – spring; 3 – summer; 4 – autumn; the periods (in years) of the spectral density function peaks are highlighted in the figure

Таблица 1. Парные значимые коэффициенты кросс-корреляции сезонных аномалий ледовитости Гренландского моря с гидрометеорологическими факторами: зима (декабрь–апрель), лето (июль–сентябрь), осень (октябрь–ноябрь), весна (май–июнь)*

Предыстория ледовитости												
Сезон	З ₋₁	Л ₋₁	В ₋₁	О ₋₁	З ₋₂	Л ₋₂	В ₋₂	О ₋₂	З ₋₃	Л ₋₃	В ₋₃	О ₋₃
Зима	0,59	0,57	0,63	0,58	0,44	0,55	0,49	0,37	0,30	0,29	0,35	–
Лето	0,41	0,54	0,34	0,39	0,39	0,37	0,39	0,26	0,36	0,33	0,39	–
Весна	0,36	0,53	0,49	0,49	0,35	0,38	0,35	0,27	0,24	–	0,36	–
Осень	0,54	0,50	0,56	0,45	0,34	0,26	0,34	0,24	0,33	–	0,38	–
Гидрометеорологические факторы												
Сезон	АО _{SP-1}	T _{aW-1}	T _{aS-1}	NAO _{W-1}	NAO _S	T _{aNS-1}	T _{aNW-1}					
Зима	–0,34	–0,52	–0,47	–	0,30	–0,49	–0,72					
Лето	–0,43	–0,41	–0,54	–0,29	0,26	–0,68	–0,54					
Осень	–0,31	–0,49	–0,35	–	–	–0,34	–0,46					
Весна	–0,39	–0,41	–0,43	–	0,29	–0,45	–0,56					
Параметры связи с Атлантическим океаном												
Сезон	АМО ₋₂	АМО ₋₃	АМО ₋₄	B _{NW-1}	B _{NSP-1}	B _{NS-1}	B _{NAUT-1}					
Зима	–0,35	–0,43	–0,50	–	–0,39	–0,29	–0,28					
Лето	–0,44	–0,60	–0,46	–0,27	–0,52	–0,43	–0,32					
Осень	–	–0,29	–	–0,27	–0,45	–0,32	–					
Весна	–	–0,34	–0,32	–0,25	–0,33	–0,34	–0,24					

*Ледовитость: З – зимы; Л – лета; О – осени; В – весны; T_a – температура атмосферы в Гренландском море; T_{aN} – температура атмосферы в Норвежском море; B_N – тепловой баланс в Норвежском море; в индексе –1, –2, –3 –4 – опережение параметра на 1, 2, 3 и 4 года соответственно; индекс: АО – Арктического колебания; NAO – Северо-Атлантического колебания; АМО – Атлантического мультидекадного колебания; латинскими буквами обозначаются сезоны: лето – S; осень – AUT; зима – W; весна – SP.

ледовитости, сформулированный ранее в работе [9] применительно к ледовитости арктических морей. Тренды и спектры колебаний составляют основную часть изменчивости площади льдов всех четырёх сезонов Гренландского моря, поэтому при установлении причин межгодовой изменчивости ледовитости моря сопряжённость её со спектрами внешних факторов может служить определённым показателем, по которому фактор можно использовать в качестве предиктора для физико-статистических моделей. Однако отметим ещё одну гипотетическую причину, согласно которой фактор не может быть выбран по признаку спектра: когда фактор линейно воздействует на ледовитость, это, естественно, не отражается в спектрах предиктора и предиктанта. Выбору предикторов помогает корреляционный анализ связи сезонной ледовитости с глобальными индексами разной природы. Для оценки степени связи процессов изменчивости ледовитости Гренландского моря с гидрометеорологическими и астрогеофизическими параметрами были рассчитаны коэффициенты кросс-корреляции для

уровня значимости $\alpha = 0,05$. Результаты расчёта представлены в табл. 1.

Прежде всего обращает на себя внимание инерционность изменчивости площади ледяного покрова. В табл. 1 в блоке «Предыстория ледовитости» указаны коэффициенты корреляции ледовитости каждого сезона с ледовитостью в предыдущие годы (с отрицательным временным лагом –1, –2 и –3 года). Ледовитость зимнего сезона характеризуется максимальными величинами коэффициентов связи с состоянием ледяного покрова в предыдущие годы и составляет от 0,30 до 0,59, т.е. инерционность зимних ледовых процессов достаточно велика и сохраняется до трёх лет. Инерционность хорошо проявляется и в зимний, и в весенний сезоны, тогда как для осеннего сезона коэффициенты с отрицательным лагом в три года оказались незначимы. Выявленная инерционность ледовитости показывает, что предшествующее состояние ледяного покрова и его площадь – наиболее важные предикторы при разработке уравнений как для диагноза, так и для прогноза, что ранее было показано в ряде работ [8, 25].

Таблица 2. Парные значимые коэффициенты кросс-корреляции сезонных аномалий ледовитости Гренландского моря с астрогеофизическими параметрами*

Сезон	Астрогеофизические параметры								
	X	Y	$dPsi$	$dPsi_{-3}$	$dEps$	lod	C_S	C_W	V_{-1}
Зима	-0,41	-0,49	0,55	0,54	0,62	0,32	0,32	-0,33	-0,28
Лето	-0,48	-0,51	0,54	0,53	0,55	0,54	0,38	-0,42	-
Осень	-0,29	-0,56	0,49	0,46	0,57	0,25	0,33	-0,46	-
Весна	-0,30	-0,58	0,57	0,54	0,63	-	0,37	-0,32	-

* X и Y – широтная и долготная координаты положения полюса Земли; $dPsi$, $dEps$ – параметры нутации оси Земли; C_S и C_W – расстояние от Земли до Солнца в летний и зимний периоды соответственно; lod – скорость вращения Земли; V_{-1} – числа Вольфа.

Следующий этап исследования – анализ связи ледовитости моря с различными гидрометеорологическими характеристиками: атмосферным давлением, температурой, а также разными объективными гидрометеорологическими и астрогеофизическими индексами. При оценке связи ледовитости и Арктической осцилляции значимые коэффициенты корреляции приходятся на весенний сезон предыдущего года. Здесь наблюдается обратная связь с максимальной величиной 0,43 (по модулю) с летней ледовитостью (см. табл. 1, блок «Гидрометеорологические факторы»). Это означает, что при ослаблении антициклона над Арктикой Атлантическая воздушная масса вторгается в Европу и усиливает поток тёплых и солёных вод Северной Атлантики в Северо-Европейский бассейн, что приводит к уменьшению ледовитости Гренландского моря. Интересен тот факт, что вторая мода разложения приземного атмосферного давления EOF₂, или индекс AD, не имеет значимых парных коэффициентов корреляции (данные не приводятся), но хорошо проявляется во множественной линейной регрессии в совокупности с другими предикторами. Обратная связь ледовитости с приповерхностной температурой атмосферы подтверждается высокими значимыми отрицательными коэффициентами корреляции для температуры воздуха как в Гренландском, так и в Норвежском морях, которые сохраняются более года.

Связь ледовитости с характеристиками вод Северной Атлантики, выраженными индексом мультитендекадной атлантической осцилляцией АМО и поверхностным тепловым балансом в Норвежском море V_N , также довольно тесная (см. табл. 1, блок «Параметры связи с Атлантическим океаном»). Наиболее значимо эта связь проявля-

ется для летнего и зимнего сезонов года с коэффициентом корреляции более 0,60 по модулю.

Среди астрогеофизических факторов наиболее тесная связь ледовитости проявляется с долготной координатой положения полюса Земли Y , параметрами нутации оси Земли $dPsi$, $dEps$ с коэффициентами корреляции больше 0,50 (табл. 2). Статистическая связь ледовитости со скоростью вращения Земли lod лучше всего проявляется для летнего сезона с коэффициентом корреляции 0,54, а с изменениями расстояния от Земли до Солнца C_S и C_W коэффициенты корреляции определяются на уровне 0,32–0,46. Самый низкий коэффициент корреляции наблюдается для индекса солнечной активности (числами Вольфа) с временным лагом –1 год V_{-1} .

Проведённый анализ показывает, что межгодовые изменения ледовитости всех четырёх сезонов года статистически связаны не только с гидрометеорологическими, но и с астрогеофизическими параметрами.

Исследование информативности гидрометеорологических и астрогеофизических факторов в моделях изменчивости ледовитости

Исследование информативности различных факторов при описании изменчивости ледяного покрова выполнено путём численных экспериментов на статистических моделях сезонной ледовитости. Модели строили с помощью мультирегрессионного анализа с использованием пакета программ «Статистика» [31]. Подготовленные ряды гидрометеорологических характеристик и индексов, а также ряды астрогеофизических параметров (см. раздел «Связь ледовитости Гренландского моря с гидрологическими, ме-

теорологических и астрогеофизическими факторами») образовали базу испытательных предикторов. Отметим, что в ранее опубликованных работах долгопериодные изменения ледовитости исследовались только в рамках гидрометеорологического воздействия [8, 9] или только с использованием в качестве предикторов астрогеофизических параметров [11, 18, 20 и др.]. В настоящей работе исследование проводится комплексно с включением в анализ не только гидрометеорологических, но и астрогеофизических характеристик, так как только совместный анализ позволяет оценить вклад каждого предиктора при одновременном включении других предикторов разной природы.

Процедура получения статистического уравнения связи ледовитости с предикторами выполнялась путём их перебора и нахождения уравнения с наиболее высоким общим коэффициентом корреляции, с достаточной статистической значимостью переменных, входящих в статистическую модель. Статистический подход для получения уравнений, описывающих изменения ледовитости в августе для Гренландского моря, ранее был применён в работе [25], когда при анализе использовалась трёхлетняя скользящая величина ледовитости, а в качестве предикторов – трёхлетние скользящие гидрометеорологические характеристики. В настоящей работе исследуются межгодовые сезонные изменения ледовитости. По исходным данным ледовитости четырёх сезонов (зима, весна, лето и осень) и предикторов вычислены аномалии от средних за исследуемый период, которые были нормированы по стандартному отклонению. Это позволило проводить анализ с данными одной размерности, что повышает качество уравнений, облегчает работу и увеличивает производительность программы «Статистика».

Уравнения межгодовых изменений площади льдов Гренландского моря для каждого сезона находились методом *мультирегрессионного анализа* путём перебора разных предикторов: гидрологических, метеорологических и астрогеофизических параметров и индексов. Для оценки качества построенных моделей использовались следующие параметры: коэффициент корреляции R , коэффициент детерминации R^2 и обеспеченность модели P при установленной допустимой ошибке стандартного отклонения σ (σ – допустимая погрешность для сверхдолгос-

рочных ледовых прогнозов, $0,8\sigma$ – для долгосрочных ледовых, $0,67\sigma$ – для краткосрочных прогнозов или для оценки точности диагностических уравнений) [26]. Для всех коэффициентов корреляции R критерий Стьюдента был равен $\pm 0,21$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Статистические модели летнего сезона. В летний сезон (июль–сентябрь) ведущая роль в формировании ледовых условий принадлежит предыстории ледовитости (весенний период) и поверхностной температуре воздуха (табл. 3, уравнения 1.1–1.3), что ранее отмечалось в работе [8]. Действительно, в уравнении 1.1 на долю влияния указанных предикторов приходится 28 и 26% общей дисперсии соответственно. Не менее важны – приток тёплых Атлантических вод (АМО) и атмосферная циркуляция (индексы АО, AD и NAO), на долю которых приходится 18 и 20% соответственно. Широтная координата положения полюса Земли X вносит вклад, оцениваемый в 9%. Использование как предшествующих ледовых и гидрометеорологических условий, так и астрогеофизических параметров позволило добиться обеспеченности построенных уравнений до 99%, что отвечает высокому показателю качества модели.

В ходе следующего экспериментов из предикторов было исключено предшествующее значение ледовитости (уравнение 1.2). Коэффициент корреляции в этом случае снижается с 0,87 до 0,85, а обеспеченность – с 99 до 94% (см. табл. 3, уравнение 1.2), однако оставшийся набор предикторов также имеет достаточно высокую информативность. После исключения предшествующей ледовитости и индексов атмосферной циркуляции получено уравнение 1.3, качественные показатели которого уменьшились, но незначительно. Эксперимент показал, что с помощью всего трёх предикторов в физико-статистических моделях можно достаточно информативно описывать долгопериодную изменчивость ледовитости.

Статистические модели осеннего сезона. Для осеннего периода (октябрь–ноябрь) были получены уравнения 2.1 и 2.2 (см. табл. 3). Доминирующий фактор в уравнении 2.1 – предшествующая летняя ледовитость L_S с вкладом в общую дисперсию 48%, тогда как на долю остальных предикторов – поверхностной температуры воздуха, долготной координаты положения полюса Земли Y и индекса атмосферной циркуляции PNA – при-

Таблица 3. Физико-статистические уравнения связи ледовитости Гренландского моря с гидрометеорологическими и астрогеофизическими факторами*

Уравнение и его номер	R	R ²	P, %		
			σ	0,8σ	0,67σ
<i>1. Летние (июль–сентябрь) аномалии</i>					
1.1. $L_S = -0,32T_{a_S} + 0,33L_{SP} - 0,26AMO_{-3} - 0,18X_1 - 0,18NAO_{S-1} + 0,16AD_{S-1} - 0,14AO_W$	0,87	0,75	99	97	94
1.2. $L_S = -0,48T_{a_S} - 0,24AMO_{-3} - 0,28X_1 - 0,20NAO_{SP} + 0,16AD_{W-1} - 0,19PNA_{S-1}$	0,85	0,72	94	90	90
1.3. $L_S = -0,42T_{a_S} - 0,31AMO_{-3} + 0,23dEps$	0,79	0,63	91	84	80
* L_S – ледовитость за летний период (июль–сентябрь); T_{a_S} – поверхностная температура воздуха за летний период (июль–сентябрь).					
<i>2. Осенние (октябрь–ноябрь) аномалии</i>					
2.1. $L_{AUT} = 0,41L_S - 0,24T_{a_{AUT}} - 0,24AD_S - 0,26Y$	0,81	0,65	90	88	87
2.2. $L_{AUT} = 0,46L_S - 0,26T_{a_{AUT}} - 0,59Y - 0,43dPsi_{-3}$	0,79	0,62	88	86	81
2.3. $L_{AUT} = -0,47T_{a_{AUT}} - 0,41Y - 0,23AD_S - 0,18NAO_{S-1}$	0,77	0,59	87	84	81
* L_{AUT} – ледовитость за осенний период (октябрь–ноябрь); $T_{a_{AUT}}$ – поверхностная температура воздуха за осенний период (октябрь–ноябрь); AD – индекс Арктического диполя.					
<i>3. Зимние (декабрь–апрель) аномалии</i>					
3.1. $L_W = -0,49T_{a_W} + 0,31L_{AUT-1} - 0,23AMO_{-4} - 0,16NAO_{W-1}$	0,89	0,80	94	94	94
3.2. $L_W = -0,49T_{a_W} + 0,33L_{AUT-1} - 0,23AMO_{-4} - 0,13V_{-1}$	0,89	0,80	97	96	94
3.3. $L_W = -0,35T_{a_{NW-1}} + 0,39dEps - 0,25AMO_{-4} - 0,15V_{-1}$	0,83	0,69	96	93	83
* L_W – ледовитость за зимний период (декабрь–апрель); T_{a_W} – поверхностная температура воздуха за зимний период (декабрь–апрель); $T_{a_{NW-1}}$ – поверхностная температура воздуха за зимний период (декабрь–апрель) в Норвежском море.					
<i>4. Весенние (май–июнь) аномалии</i>					
4.1. $L_{SP} = 0,68L_W - 0,41Y - 0,17AO_W - 0,17V + 0,17AD_{W-1} - 0,15PNA_{SP}$	0,89	0,79	99	94	93
4.2. $L_{SP} = -0,41T_{a_W} - 0,39Y - 0,17V - 0,15AO_W$	0,82	0,67	90	88	88
4.3. $L_{SP} = -0,52T_{a_W} + 0,31dPsi_{-1} - 0,17V$	0,79	0,62	81	71	65
* L_{SP} – ледовитость за весенний период (май–июнь); T_{a_W} – поверхностная температура воздуха за зимний период (декабрь–апрель).					

*Дополнительно см. усл. обозначения к табл. 1 и 2.

ходятся практически равные части: по 17–19%. Общий коэффициент корреляции уравнения несколько меньше, чем в уравнениях для летнего сезона, и варьирует в пределах 0,77–0,81. Обеспеченность полученных уравнений оказалась достаточно высокой и составила 87–90% (см. табл. 3).

Анализ установленных связей позволяет высказать несколько предположений о роли выбранных предикторов в формировании осенней ледовитости. Положительная аномалия летней ледовитости способствует формированию повышенной ледовитости в осенний период и наоборот. Отрицательная аномалия AD соответствует положительной аномалии давления над Сибирью и отрицательной аномалии приземного атмосферного давления над Канадским бассейном. Это способствует усилению воздушных переносов, увеличивающих дрейф льдов в Гренландское море, что, в свою очередь, приводит к повышению ледовитости в осенний период. Положитель-

ная аномалия NAO, соответствующая антициклоническому режиму над Северным Ледовитым океаном и северным ветрам повышенной интенсивности над Гренландским морем, сопряжена с уменьшением ледовитости в осенний период.

В экспериментах по исключению из предикторов предшествующей летней ледовитости L_S получено статистическое уравнение 2.3 (см. табл. 3), в которое в качестве предикторов вошли индексы атмосферной циркуляции AD_S и NAO_{S-1} , а также поверхностная температура воздуха $T_{a_{AUT}}$ и параметр нутации оси вращения Земли $dEps$. И хотя общий коэффициент корреляции был меньше, чем для предыдущих уравнений, уровень обеспеченности оказался высоким.

Статистические модели зимнего сезона. Для зимнего периода (декабрь–апрель) во всех уравнениях 3.1–3.3 в табл. 3 в качестве предикторов использовались: приток тёплых Атлантических вод (индекс АМО); приповерхностная темпера-

тура воздуха (Гренландского T_a и Норвежского морей $T_{a_{NW}}$), а для уравнений 3.2 и 3.3 – солнечная активность предыдущего года V_{-1} . Указанные предикторы входят в уравнение со знаком минус, т.е. положительные аномалии этих предикторов вызывают уменьшение ледовитости. Ледовитость осеннего периода (предыстория L_{AUT-1}) входит в уравнения 3.1 и 3.2 со знаком плюс. Это означает, что большая ледовитость осенью предыдущего года приводит к повышенной ледовитости в последующий зимний период. По полученным уравнениям был оценен вклад каждого предиктора. Для уравнения 3.1 основной вклад 59 и 23% в общую дисперсию ряда приходится на поверхностную зимнюю температуру воздуха Гренландского моря T_{a_w} и состояние осенней ледовитости в предшествующий год L_{AUT-1} соответственно. Вклад влияния атлантических вод (АМО) с временным лагом –4 года и индексом атмосферной циркуляции NAO с временным лагом –1 год оценивается в 19%.

В ходе дальнейших экспериментов из ряда предикторов была исключена атмосферная циркуляция, что позволило получить уравнение 3.2. Как видно из приведённых результатов, индекс атмосферной циркуляции Северо-Атлантического колебания NAO успешно заменяется солнечной активностью в виде чисел Вольфа с запаздыванием в один год. При этом обеспеченность уравнения повышается с 94 до 97% (см. табл. 3). В следующем эксперименте после исключения ледовитости предшествующего осеннего сезона было получено уравнение 3.3. Наибольший вклад в общую дисперсию ледовитости приходится на параметр нутации оси Земли $dEps$, который составил 42%. Вклады температуры воздуха предыдущего года в Норвежском море $T_{a_{NW-1}}$, индекса АМО с временным лагом –4 года и солнечной активности предыдущего года V_{-1} составили 34, 18 и 6% соответственно. Качественные показатели уравнения незначительно снижались (коэффициент корреляции уменьшился с 0,89 до 0,83; обеспеченность – с 97 до 96%; см. табл. 3). В то же время установленный набор предикторов позволяет использовать уравнение 3.3 для увеличения заблаговременности предвычисления площади ледяного покрова, так как предикторы входят с временным лагом –1 и –4 года, а долготная координата положения полюса Земли рассчитывается на несколько лет вперёд.

Статистические модели весеннего сезона. Для весеннего периода (май–июнь) также получены три варианта статистической модели межгодовой изменчивости ледовитости (см. табл. 3). В качестве предикторов в уравнение 4.1 вошли: предшествующее зимнее значение ледовитости L_w с вкладом в общую дисперсию 63% и долготная координата положения полюса Земли Y с вкладом 22%. Вклад остальных предикторов, представленных индексами атмосферной циркуляции АО, АД и PNA, составляет 10%. При отрицательных фазах АД и PNA давление над Карским морем и морем Лаптевых повышается, а над Канадским Арктическим архипелагом понижается, усиливается также зональная составляющая и ослабевают меридиональный перенос и антициклоническая деятельность. Увеличение продолжительности этих процессов приводит к значительному и длительному повышению ледовитости. При положительных фазах АД и PNA наблюдается обратная ситуация. Отметим, что в каждом из представленных уравнений в число предикторов входит солнечная активность, представленная числами Вольфа, с вкладом в общую дисперсию ряда в 4, 6 и 8% соответственно. После исключения из предикторов предшествующей зимней ледовитости в ходе численных экспериментов установлено, что влияние астрогеофизических процессов в уравнении возрастает и составляет до 38% вклада в общую дисперсию ледовитости (уравнение 4.2). На приземную температуру воздуха и параметр нутации оси Земли приходится по 20%. При исключении индексов атмосферной циркуляции в число переменных в уравнении 4.3 вошёл параметр нутации Земли $dPsi_{-j}$ и солнечной активности (числа Вольфа V).

По результатам проведённых численных экспериментов можно сделать важный вывод: в весенний (см. табл. 3, уравнения 4.1–4.3) и осенний (см. табл. 3, уравнения 3.1–3.3) сезоны года влияние притока тёплых и солёных вод Северной Атлантики значительно ослабевает и основной вклад в долготную изменчивость ледовитости приходится на атмосферные процессы.

Продуктивность полученных моделей межгодовой изменчивости ледовитости четырёх сезонов продемонстрируем, сравнив диагностические расчёты по уравнениям 1.1–4.3 с фактическими данными ледовитости. Графики фактических и расчётных значений ледовитости Гренландского моря за период 1950–2018 гг. приведены на

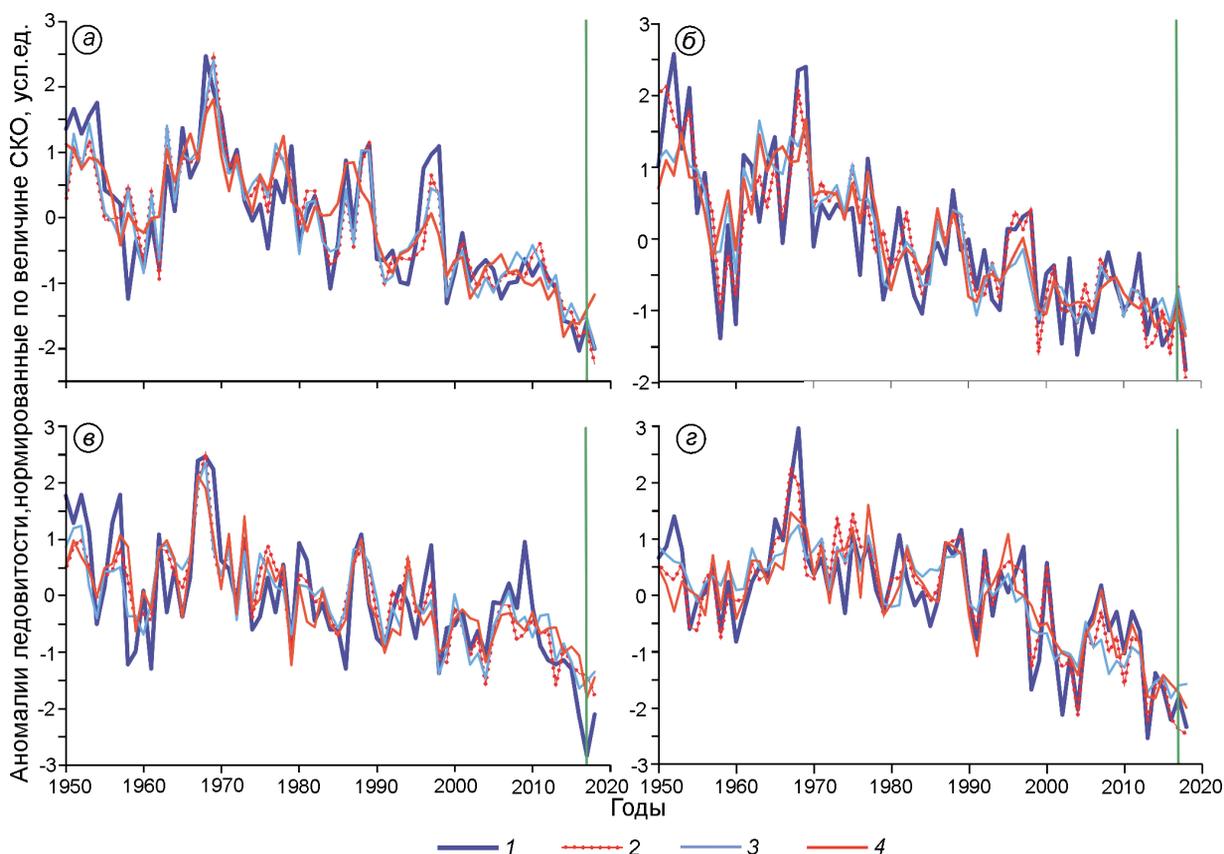


Рис. 3. Сопоставление фактических и восстановленных по уравнениям значений аномалий ледовитости Гренландского моря за период 1950–2018 гг.:

1 – ледовитость; 2 – уравнения 1; 3 – уравнения 2; 4 – уравнения 4; сезоны: а – зимний; б – летний; в – осенний; г – весенний; вертикальной чертой обозначено разделение ряда на зависимую (слева) и независимую (справа) выборки

Fig. 3. Comparison of the actual and equations-reconstructed values of the Greenland Sea ice cover anomalies during the 1950–2018:

1 – ice cover; 2 – equations 1; 3 – equations 2; 4 – equations 4; a – winter; б – summer; в – autumn; г – spring seasons; the time series separation into dependent (left-hand side of the figure) and independent (right-hand side) samples is shown by the vertical line

рис. 3. Выбранные предикторы и построенные физико-статистические уравнения 1.1–4.3 достаточно информативны и хорошо описывают изменчивость ледовитости. Обеспеченность расчётных уравнений на зависимых рядах составляет до 99% при допустимой ошибке σ и до 94% при допустимой ошибке $0,67\sigma$. Дополнительно выполнена проверка уравнений на независимой выборке (2017–2018 гг.), которая показала, что они достаточно хорошо описывают долгопериодные изменения площади льда (см. рис. 3). Обеспеченность расчёта по независимой выборке составила для летнего и зимнего сезонов 100%, для весеннего – 83%, а наиболее невысокие показатели пришлось на осенний сезон – 53%. Исходя из представленных результатов (см. табл. 3 и рис. 3), лучшие результаты дают уравнения, в которых

предикторы в совокупности представлены гидрологическими, метеорологическими и астрогеофизическими факторами, а также учтена предыстория состояния ледяного покрова.

Для проверки устойчивости полученных статистических уравнений выполнен следующий эксперимент. Временной ряд предикторов был разделён на две части: 1950–2000 и 2001–2018 гг. По данным 1950–2000 гг. получены статистические уравнения связи ледовитости с гидрометеорологическими и астрогеофизическими характеристиками. В уравнения вошли те же предикторы, что и в уравнения 1.1–4.3, но величины коэффициентов пропорциональности несколько различались, коэффициенты корреляции (0,70–0,84) и детерминации (0,48–0,70) уменьшились, но также остались статистически значимы. Далее

выполнены расчёты ледовитости по независимому ряду 2001–2018 гг. Обеспеченность уравнений, полученных по более короткому ряду, составила 67–97%. Эффективность проверочной выборки – 2–6%. Это – высокий показатель. Указанные значения параметров меньше параметров уравнений, полученных для ряда 1950–2018 г., но они также удовлетворительные. Полученный результат показывает устойчивость полученных статистических уравнений 1.1–4.3, по крайней мере, для интервала 18 лет. Небольшое снижение эффективности уравнений для ряда 1950–2000 гг. связано, на наш взгляд, с уменьшением длины ряда, так как этот ряд не охватил аномально тёплые годы – 2007 и 2012.

Заключение

Для межгодовых изменений площади льдов Гренландского моря в зимний, весенний, летний и осенний сезоны подтверждены наличие отрицательного линейного тренда и полицикличность колебаний, ранее установленные для ледовитости арктических морей [9]. Получены статистические связи межгодовой изменчивости площади льдов не только с гидрометеорологическими факторами, но и с астрогеофизическими параметрами. Высокие значимые коэффициенты кросс-корреляции ледовитости и астрогеофизических параметров дают основание полагать их взаимосвязь и необходимость включения их в число предикторов при разработке физико-статистических уравнений для описания многолетних изменений сезонной ледовитости Гренландского моря. Разработаны статистические модели долгопериодных колебаний ледовитости для зимнего, весеннего, летнего и осеннего сезонов года, которые учитывают не только гидрометеорологические,

но и астрогеофизические предикторы. Наибольший вклад (от 23 до 63%) в общую дисперсию ледовитости вносит ледовитость предшествующего сезона. В моделях, где был исключён предиктор «ледовитость предшествующего сезона», вклад в общую дисперсию гидрометеорологических факторов составил до 70%, а вклад астрогеофизических факторов – до 50%. При этом вклады параметра нутации оси Земли, долготной и широтной координат положения полюса Земли и числа Вольфа могут достигать соответственно 42, 43 и более 8% соответственно. Вошедшие в уравнения предикторы имеют достаточно высокую информативность, а построенные физико-статистические модели хорошо описывают долговременную изменчивость ледовитости. Предлагаемые нами статистические модели могут быть использованы как для диагноза, так и в качестве основы для разработки методов прогноза с большой заблаговременностью на несколько лет вперёд.

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».

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».

Литература

1. Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 269 с.
2. Визе В.Ю. Климат морей советской Арктики. Л.–М.: Изд-во Главсевморпути, 1940. 124 с.
3. Березкин В.А. Труды первой высокоширотной экспедиции на «Садко» в 1935 г. Т. 1. Вып. 1. Грен-

References

1. Nikiforov E.G., Shpayher A.O. *Zakonomernosti formirovaniia krupnomasshtabnykh kolebaniia gidrologicheskogo rezhima Severnogo Ledovitogo okeana*. Patterns of formation of large-scale fluctuations of the hydrological regime of the Arctic Ocean. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980: 269 p. [In Russian].
2. Wiese V.Yu. *Klimat morei Sovetskoi Arktiki*. Climate of the Seas of the Soviet Arctic. Moscow – Leningrad: Glavsevmorput Publishing, 1940: 124 p. [In Russian].

- ландское море и Полярный бассейн: Гидрологические работы в Гренландском море и в районе к северу от Шпицбергена. Л., 1939. 167 с.
4. *Каракаш А.И.* Ледовитость Гренландского моря и возможность предсказания состояния льда в морях западного сектора Арктики // Тр. ЦИП. 1950. Вып. 17. С. 40–55.
 5. *Кириллов А.А., Хромцова М.С.* О многолетней изменчивости ледовитости Гренландского моря и методике ее прогноза // Тр. ААНИИ. 1970. Т. 303. С. 46–54.
 6. *Лебедев А.А., Уралов Н.С.* Прогнозирование ледовитости Гренландского моря в связи с особенностями теплового состояния Атлантического океана и атмосферной циркуляции // Проблемы Арктики и Антарктики. 1977. Вып. 50. С. 36–39.
 7. *Зубакин Г.К.* Крупномасштабная изменчивость состояния ледяного покрова морей Северо-Европейского бассейна. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 160 с.
 8. *Миронов Е.У.* Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ААНИИ, 2004. 319 с.
 9. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: «Наука», 2007. 136 с.
 10. *Воейков А.И.* Избранные сочинения. Т. 1. Климаты земного шара, в особенности России. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1948. 423 с.
 11. *Максимов И.В.* Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 447 с.
 12. *Эйгенсон М.С.* Солнце, погода и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 276 с.
 13. *Рубашев Б.М.* Проблемы солнечной активности. М.-Л.: Наука, 1964. 362 с.
 14. *Гудкович З.М., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* «Полюсный прилив» в атмосфере высоких широт и колебания ледовитости арктических морей // Докл. АН СССР. 1970. Т. 190. № 4. С. 954–957.
 15. *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.
 16. *Гудкович З.М., Ковалев Е.Г., Никифоров Е.Г.* О связи угловой скорости вращения Земли с климатическими изменениями // Изв. РГО. 2004. Вып. 6. С. 1–10.
 17. *Абдусаматов Х.И.* Солнце диктует климат Земли. СПб.: Изд-во «Logos», 2009. 197 с.
 18. *Слепцов-Шевлевич Б.А., Бояринов А.М.* Солнечный ветер, вращение Земли и климат. СПб: Типография Бланк Издат, 2002. 159 с.
 19. *Федоров В.М.* Солнечная радиация и климат Земли. М.: Физматлит, 2017. 232 с.
 20. *Berezkin V.A. Trudy pervoj vysokoshirotnoj ekspedicii na «Sadko» v 1935 g. T. 1. Vyp. 1. Grenlandskoe more i Polyarnyj bassejn: Gidrol. raboty v Grenlandskom more i v rajone k severu ot Shpicbergena.* Proc. of the first high-latitude expedition on board the «Sadko» ship in 1935. V. 1 (1). The Greenland Sea and the Polar Basin: Hydrological work in the Greenland Sea and in the area north of Svalbard. Leningrad: 1939: 167 p. [In Russian].
 21. *Karakash A.I. The Greenland Sea ice cover and the possibility of the ice condition predicting in the seas of the western sector of the Arctic. Trudy CIP. The Proceeding of the Central Forecasting Institute. 1950, 17: 40–55. [In Russian].*
 22. *Kirillov A.A., Hromcova M.S. Long-term variability of the Greenland Sea ice cover and the its forecast method. Trudy AANII. Proc. of the AARI. 1970, 303: 46–54. [In Russian].*
 23. *Lebedev A.A., Uralov N.S. Forecasting the ice coverness of the Greenland Sea due to the peculiarities of the thermal state of the Atlantic Ocean and atmospheric circulation. Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of Arctic and Antarctic. 1977, 50: 36–39. [In Russian].*
 24. *Zubakin G.K. Krupnomasshtabnaia izmenchivost' sostoianiiia ledianogo pokrova morei SeveroEvropeiskogo basseina. Large-scale variability of the state of the ice cover of the seas of the North European Basin. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 160 p. [In Russian].*
 25. *Mironov E.U. Ledovye usloviia v Grenlandskom i Barentsevom moriakh i ikh dolgosrochnyi prognoz. Ice conditions in the Greenland and Barents Seas and their long-term forecast. St. Petersburg: AARI, 2004: 319 p. [In Russian].*
 26. *Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E., Smolyanitsky V. Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ice Cover Observations. Praxis Publishing Ltd. UK, Chichester, 2009: 164 p.*
 27. *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].*
 28. *Maksimov I.V. Geofizicheskie sily i vody okeana. Geophysical forces and ocean waters. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970: 447 p. [In Russian].*
 29. *Ejgenzon M.S. Solnce, pogoda i klimat. Sun, weather and climate. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1963: 276 p. [In Russian].*
 30. *Rubashev B.M. Problemy solnechnoj aktivnosti. Problems of the solar activity. Moscow – Leningrad: Nauka, 1964: 362 p. [In Russian].*
 31. *Gudkovich Z.M., Saruhanyan E.I., Smirnov N.P. «Pole tide» in the atmosphere of high latitudes and the Arctic seas cover fluctuations. Dokl. AN SSSR. Proc. of the USSR Academy of Sciences. 1970, 190 (4): 954–957. [In Russian].*
 32. *Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Frolov I.E. Interdecadal climate variability, the Eurasian Arctic seas' ice cover areas and their possible causes. Meteorologiya i gidrologiya. Russian Meteorology and Hydrology. 2005, 6: 5–14. [In Russian].*
 33. *Gudkovich Z.M., Kovalev E.G., Nikiforov E.G. On the relationship of the Earth angular velocity with climatic changes. Izvestiya RGO. Proc. of the Russian Geographical Society. 2004, 6: 1–10. [In Russian].*
 34. *Abdusamatov H.I. Solnce diktuet klimat Zemli. The Sun dictates the Earth's climate. St. Petersburg: Logos, 2002: 197 p. [In Russian].*

20. Пудовкин М.И. Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду. Соросовский образовательный журнал. 1996. № 10. С. 106–112.
21. Егоров А.Г. Солнечный цикл и многолетняя барическая волна в приземной атмосфере Арктики // ДАН. 2003. Т. 393. № 3. С. 402–406.
22. Егоров А.Г. Солнечно обусловленные изменения приземного давления воздуха в Арктике и многолетние особенности распределения льдов в арктических морях России в летний период // Метеорология и гидрология. 2005. № 8. С. 14–24.
23. Федоров В.М., Бухаров О.Е., Боголюбов Д.П., Гребенников П.Б. Опыт среднесрочного прогнозирования изменения площади морских льдов в Северном полушарии на основе расчетов приходящей солнечной радиации и нейросетевого моделирования // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 3. С. 43–50.
24. Медведев И.П., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Лашин В.Б. Чандлеровские биения и полюсный прилив в Северном и Балтийском морях // Гелиогеофизические исследования. 2018. Вып. 18. С. 9–17.
25. 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.
26. Тимохов Л.А., Бородачев В.Е., Бородачев И.В., Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Янут М. Роль гидрометеорологических факторов и солнечной активности в межгодовых изменениях площади льдов Восточно-Сибирского моря // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 222–232.
27. Границы океанов и морей. № 9031. СПб.: ГУНиО МО, 2000. 208 с.
28. Электронный ресурс: <http://www.aari.ru/>. Официальный сайт ГНЦ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт».
29. Электронный ресурс: [http://wdc.aari.ru/vms/docs/atlas_ledyanih_obrazovaniy\(2019,AANII\).pdf](http://wdc.aari.ru/vms/docs/atlas_ledyanih_obrazovaniy(2019,AANII).pdf). Атлас ледяных образований. Под общей редакцией В.М. Смолянищкого. СПб.: ААНИИ, 2019. 232 с.
30. 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.
31. Электронный ресурс: <http://statsoft.ru/>. Официальный сайт представительства компании StatSoft Inc. на территории России и стран СНГ.
32. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск: ПИНРО, 2003. 129 с.
18. 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].
19. Fedorov V.M. *Solnechnaya radiaciya i klimat Zemli*. Solar insolation and Earth's climate. Moscow: Fizmatlit, 2017: 232 p. [In Russian].
20. Pudovkin M.I. Influence of solar activity on the state of the lower atmosphere and weather. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*. Soros Educational Journal. 1996, 10: 106–112. [In Russian].
21. Egorov A.G. The solar cycle and long-term baric wave in the near-ground atmosphere of the Arctic. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Russian Academy of Sciences. 2003, 393 (3): 402–406. [In Russian].
22. Egorov A.G. Solar-induced changes in surface air pressure in the Arctic and long-term features of ice distribution in the Arctic seas of Russia in summer. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2005, 8: 14–24. [In Russian].
23. Fedorov V.M., Bukharov O.E., Bogolyubov D.P., Grebennikov P.B. Experience of medium-term forecasting of changes in the area of sea ice in the Northern Hemisphere on the basis of calculations of incoming solar radiation and neural network modeling. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2016, 20 (3): 43–50. [In Russian].
24. 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*. Helio-geophysical Research. 2018, 18: 9–17. [In Russian].
25. Timokhov L.A., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Popov A.V. Seasonal and inter-annual variability of the ice cover in the Greenland Sea. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (1): 127–134. [In Russian].
26. Timokhov L.A., Borodachev V.E., Borodachev I.V., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Janout M. The role of hydro-meteorological factors and solar activity in interannual changes in the ice area of the East Siberian Sea. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (2): 222–232. [In Russian].
27. *Granicy okeanov i morej. № 9031*. Limits of Oceans and Seas. № 9031. St. Petersburg: GUNiO MO, 2000: 208 p. [In Russian].
28. <http://www.aari.ru/>. An official website of the State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute.
29. [http://wdc.aari.ru/vms/docs/atlas_ledyanih_obrazovaniy\(2019,AANII\).pdf](http://wdc.aari.ru/vms/docs/atlas_ledyanih_obrazovaniy(2019,AANII).pdf). Atlas of ice features. Under the editorship of V. Smolyanitsky. St. Petersburg: AARI, 2019: 232 p. [In Russian].
30. 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, 122 (8): 6630–6647. doi: 10.1002/2017JC013159.
31. <http://statsoft.ru/>. StatSoft Inc. company representative in Russia and CIS states.
32. 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].