УДК 551.326. 12/13:551.58(268.4) DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЗОННЫХ И ДОЛГОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛЕДОВИТОСТИ ГРЕНЛАНДСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ

Л.А. ТИМОХОВ, Н.А ВЯЗИГИНА, Е.У. МИРОНОВ, А.В. ЮЛИН*

[1] — *ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

**naty_vyazik@mail.ru*

CLIMATIC CHANGES OF SEASONAL AND INTER-ANNUAL VARIABILITY OF THE ICE COVER OF THE GREENLAND AND BARENTS SEAS

L.A. TIMOKHOV, N.A. VYAZIGINA, E.U. MIRONOV, A.V. YULIN*

[1] — *State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

**naty_vyazik@mail.ru*

Received January, 28, 2019 *Accepted June, 17, 2019*

Keywords: Barents Sea, Greenland Sea, classification of seasonal cycles, ice cover, seasonal and inter-annual variability.

Summary

The structure of the long-period variability of the ice cover of the Barents and Greenland Seas over a long series of observations from 1930 to 2017 is analyzed. In both seas, there is a significant negative linear trend of ice cover for both the winter and summer seasons. Average for the period of 1950–2016 intra-annual changes in ice coverings demonstrate the conjugacy of the seasonal cycles of the Greenland and Barents Seas, but with certain differences. Three homogeneous groups with a similar character of intra-annual changes in the ice area are identified for each sea. Identified succession in a state of ice cover for 2 years.

The conjugacy of changes in the average decadal values of sea ice cover in April and August with the average decadal indices of atmospheric circulation AO, AD, PNA, NAO and the index of the thermal state of the North Atlantic AMO is shown. Spectral analysis of the winter and summer ice cover of the Greenland and Barents Seas for the period 1930–2016 confirmed earlier received cyclical fluctuations of 22, 9–11 and 6–7 years.

Citation: *Timokhov L.A., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Yulin A.V.* Climatic changes of seasonal and inter-annual variability of the ice cover of the Greenland and Barents Seas. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 2: 148–168. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168.

Cross-correlation analysis established a close relationship between the longitudinal changes in the ice cover and the average annual values of the following astrogeophysical parameters, the longitude coordinate of the Earth pole position Y, the Earth axis nutation indices dEps and dPsi, the Earth rotation speed index lod (length of day), Sun solar activity index (annual Wolf number) , the average for six months, the distance from the Sun to Earth in the summer SX-III and the winter SX-III periods. Significant correlation coefficients are quite large (R = |0,30| – |0,56|) for both seas, comparable to the correlation coefficients between the ice cover and average annual air temperature T, show the reality of the ice cover mediated reaction to changes in astrophysical factors. Statistical equations relating the sea ice cover to hydrometeorological and astrogeophysical factors were obtained by multiple correlation. The overall correlation coefficient varies from R = 0,80 to R = 0,87 AT. The Greenland Sea, the share of astrogeophysical factors in the long-term changes in the ice cover of both the winter and summer seasons exceeded the contribution of hydrometeorological factors by 3–4 times. In the Barents Sea, the contribution to the total dispersion of astrogeophysical factors in the winter period is somewhat less than that of hydrometeorological factors, and in the summer period they exceed only 1.4 times. The authors' approach opens up the possibility of using it to obtain statistical equations for the diagnosis and forecast of long-term and climatic changes in sea-ice cover.

Поступила 28 января 2019 г. *Принята к печати 17 июня 2019 г.*

Ключевые слова: Баренцево море, Гренландское море, ледовитость, ледяной покров, сезонная и межгодовая изменчивость.

В статье проанализирована структура долгопериодной изменчивости ледяного покрова Баренцева и Гренландского морей за длительные ряды наблюдений. С помощью кластерного анализа для каждого моря выделены несколько однородных групп с близким характером внутригодовых изменений площади льдов. Выявлена преемственность в состоянии ледяного покрова в течение двух лет. Проанализированы временное распределение аномалий относительно тренда изменчивости ледяного покрова и возможные причины формирования периодов преобладания однонаправленных изменений площади льдов. Получены статистические уравнения связи ледовитости с гидрометеорологическими и астрогеофизическими факторами. Определены доли вклада астрогеофизических факторов в долгопериодные изменения ледовитости Баренцева и Гренландского морей, которые демонстрируют существование различия формирования ледового режима в Гренландском и Баренцевом морях.

ВВЕДЕНИЕ

В Северо-Европейском бассейне наблюдаются наибольшие сезонные и многолетние изменения площади морских льдов, и в этом районе морские льды особо чувствительны к климатическим изменениям [1, 2]. Баренцево и Гренландское моря играют большую роль в процессах взаимодействия Северо-Европейского бассейна с Арктическим бассейном, являясь важной частью Арктической климатической системы. Через их акваторию теплые и соленые воды Северо-Атлантического течения поступают в арктические моря и Арктический бассейн, и в обратном направлении Восточно-Гренландское течение транспортирует морские льды и холодные и относительно распресненные воды в Северную Атлантику [3, 4]. Гренландское море и, прежде всего, Баренцево море являются акваториями круглогодичного судоходства, а также регионами интенсивного рыболовства и добычи нефти и газа. Поэтому изучение ледового и гидрологического режима морей является актуальной задачей как для науки, так и для практики.

Исследования ледяного покрова Гренландского и Баренцева морей имеют давнюю историю. Первыми наиболее важными обобщающими работами стали две монографии В.Ю. Визе, в которых дано описание ледового режима Гренландского и Баренцева морей и сформулированы методические основы прогнозирования

ледовых условий [5–7]. Значительный вклад в раскрытие закономерностей пространственно-временной изменчивости ледовых условий, механизмов формирования аномальных ледовых процессов в приатлантической Арктике внесли работы А.А. Лебедева, Н.С. Уралова [8–10]. Г.К. Зубакин [2] в своей монографии представил анализ крупномасштабных черт изменчивости состояния ледяного покрова морей Северо-Европейского бассейна. Е.У. Миронов [3] выполнил обобщение особенностей и закономерностей сезонной и многолетней изменчивости основных характеристик ледового режима Гренландского и Баренцева морей, а также разработал новые методы долгосрочных ледовых прогнозов, позволяющие предсказывать крупные аномалии ледовитости и распределение ледяного покрова [3].

По мере накопления данных по ледовитости и их анализа был опубликован ряд статей, посвященных отдельным аспектам ледового режима морей Северо-Европейского бассейна. В статье М.В. Трегубова и др. [11] описывается динамика ледовитости Гренландского моря за период 1979–2008 гг. и отмечается значительное уменьшение ледовитости в последнее десятилетие. В статьях [11–14] акцентировано внимание на низкочастотную изменчивость ледовитости и термохалинных характеристик Баренцева моря и установлена их связь с изменениями Североатлантического колебания (САК) и Атлантической мультидекадной осцилляцией (АМО). В работе [15] на основе длинных рядов наблюдений исследованы колебания внутригодовой и межгодовой изменчивости площади льдов Гренландского моря и получены численные оценки вклада гидрометеорологических факторов и предыстории состояния ледяного покрова в изменение летней и зимней площади льдов. Следует отметить, что подобные оценки отсутствуют для Баренцева моря, также остается неосвещенным вопрос о схожести и различии колебаний ледовитости в Гренландском и Баренцевом морях.

Целью настоящего исследования является совместный анализ ледовитости Гренландского и Баренцева морей и установление сопряженности изменений ледовитости в морях в зависимости от внешних факторов, а также выявление их связи с климатическими изменениями в регионе. Подчеркнем, что изучение эмпирических закономерностей долгопериодных колебаний ледовитости и их причин имеют важное значение для понимания процесса формирования ледового режима и могут быть использованы при построении статистических моделей диагноза и сверхдолгосрочного прогноза ледовитости арктических морей.

ДАННЫЕ И МЕТОД АНАЛИЗА

В исследовании были использованы среднемесячные значения ледовитости морей, полученные на основе авиационных ледовых разведок (до 1986 г.) и спутниковых данных с 1986 г. по настоящее время [3, 16]. Для ледовитости Гренландского и Баренцева морей в августе (L_{GrVIII}, L_{BarVIII}) и апреле (L_{GrIV}, L_{BarIV}) в нашем распоряжении был временной ряд с 1930 по 2018 г., а для всех двенадцати месяцев данные по ледовитости доступны с 1950 г. по настоящее время. Отметим, что в качестве меры ледовитости используют площадь льдов в границах моря (обычно кв. км) или отношение площади льдов к площади моря (%). Границы арктических морей и их площади приведены в Атласе Арктики [20].

В анализе использовались среднегодовые гидрометеорологические и астрогеофизические индексы, а также гидрометеорологические индексы, осредненные за полугодия IV–IX (апрель–сентябрь) и X–III (октябрь–март). Здесь и далее будут использованы англоязычные обозначения гидрометеорологических и астрогеофизических индексов.

Для оценки влияния крупномасштабных гидрометеорологических процессов на долгопериодную изменчивость площади льдов были отобраны наиболее важные и часто используемые характеристики:

– атмосферный индекс, Арктическое колебание (AO, Arctic Oscillation), характеризующий вариации атмосферного давления над уровнем моря севернее 20° с. ш., который определяется как первая мода разложения на естественные ортогональные функции аномалий высоты поверхности 1000 гПа [17];

– индекс атмосферной циркуляции, представляющий собой вторую моду разложения приземного атмосферного давления от широты 60º до полюса по эмпирическим ортогональным функциям [18];

– тихоокеанское-северо-американское колебание (PNA, Pacific-North American) определяется как вторая мода разложения на естественные ортогональные функции аномалий высоты поверхности 1000 гПа;

– индекс Североатлантического колебания (NAO, North Atlantic Oscillation), рассчитываемый как разница атмосферного давления на уровне моря между пунктами в Исландии (64° с.ш., 24° з.д.) и вблизи Азорских островов (39° с.ш., 24° з.д.) (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/);

– атлантическое мультидекадное колебание (AMO, Atlantic multidecadal oscillation), представляющее собой аномалию температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике относительно среднего значения за период с 1930 по 2016 г. (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/). Исходные среднемесячные значения подвергались осреднению за полугодия и год.

При анализе долгопериодных изменений использовались также астрофизические индексы, взятые с указанных далее сайтов: долготная координата положения полюса Земли Y (ftp://hpiers.obspm.fr/iers/series/opa/eopc04); параметры нутации оси Земли dEps и dPsi (https://datacenter.iers.org/eop/-/somos/5Rgv/latest/38); величина скорости вращения Земли, представленная величиной продолжительности дня lod (length of day) (https://astro.ukho.gov.uk/nao/lvm/#tabs-d3); величина солнечной активности Sun или среднегодовое число Вольфа (https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt); среднее за шесть месяцев расстояние от Солнца до Земли в летнее $S_{IV\text{-}IX}$ и зимнее $S_{X\text{-}III}$ полугодия (https://soft-ok.net/226-astroprocessor-zet-9-lite.html).

Статистический анализ включал выделение линейного тренда, кросс-корреляцию, спектральный и мультирегрессионный анализы, которые выполнялись с использованием стандартных пакетов программ СТАТИСТИКА [19].

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Важной особенностью Гренландского и Баренцева морей является то, что, в отличие от других арктических морей, акватории этих морей в зимний период не покрываются льдом полностью. Площади морей примерно одинаковые, однако глубины имеют существенное различие. Средняя глубина Гренландского моря 1400 м, тогда как в Баренцевом море преобладают глубины около 600 м и располагается большая шельфовая зона. В соответствии с климатическим районированием [20], акватории исследуемых морей относятся к южному району Атлантической области Арктики. В холодный период года в этой области сильно воздействие циклонической циркуляции, и отмечается максимальная для Арктической зоны межсуточная изменчивость метеорологических элементов; температура воздуха выше, облачность и осадки больше, ветры сильнее, чем в других областях Арктики. В теплый период атмосферная циркуляция ослабевает, межсуточные

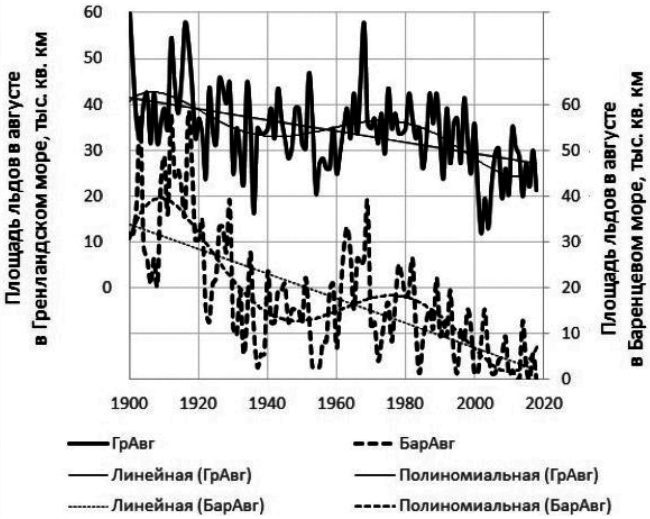

Рис. 1. Межгодовые изменения ледовитости Гренландского (пунктирные линии) и Баренцева (жирные линии) морей в зимние (сплошные линии, левая ордината) и летние периоды (пунктирные линии, правая ордината) с нанесенной линией тренда в период 1930–2016 гг.

Fig. 1. Interannual changes in the ice cover of the Greenland (thin lines) and Barents Seas (heavy lines) in the winter (solid lines, left ordinate) and summer periods (dotted lines, right ordinate) with a trend line in the period 1930–2016.

колебания метеорологических элементов уменьшаются; температура воздуха низкая, особенно на севере области, облачность большая, часты туманы [3].

Существующая в Северо-Европейском бассейне (СЕБ) система устойчивых теплых и холодных течений играет решающую роль в формировании метеорологических и ледовых условий и обуславливает межгодовые и многолетние изменения гидрологического и ледового режима Гренландского и Баренцева морей [3].

Временной ход зимней (апрель) и летней (август) ледовитости Гренландского и Баренцева морей за период с 1930 по 2016 г. приведен на рис. 1. Тенденция климатических изменений площади льдов в обоих морях одинакова: в межгодовых изменениях выделяется значимый отрицательный линейный тренд ледовитости, как для зимнего, так и для летнего сезона. Для зимнего периода тренд более значителен: в Баренцевом море за 85 лет площадь льдов уменьшилась на 47 тыс. км^2 и в Гренландском — на 29 тыс. км^2. В летний период за исследуемый период площадь льдов уменьшилась в Баренцевом море на 6 тыс. км^2, а в Гренландском — на 8 тыс. км^2.

Средние за период 1950–2016 гг. внутригодовые изменения ледовитости, представленные на рис. 2, демонстрируют сопряженность сезонных циклов Гренландского (ГМ) и Баренцева (БМ) морей. Однако наблюдаются определенные различия в величинах максимальной, средней и минимальной ледовитости и в сроках их наблюдений. Представление о пределах межгодовых вариаций сезонных циклов дают тонкие сплошные и пунктирные линии на рис. 2, которые представляют собой области, ограниченные значениями плюс-минус среднеквадратическое отклонение ($\pm\Delta$).

В годовом цикле максимальная площадь льдов в ГМ составляет 53,5 тыс. км^2 и в среднем наблюдается феврале, а в БМ максимум ледовитости составляет 58,9 тыс. км^2 и в среднем наблюдается в апреле.

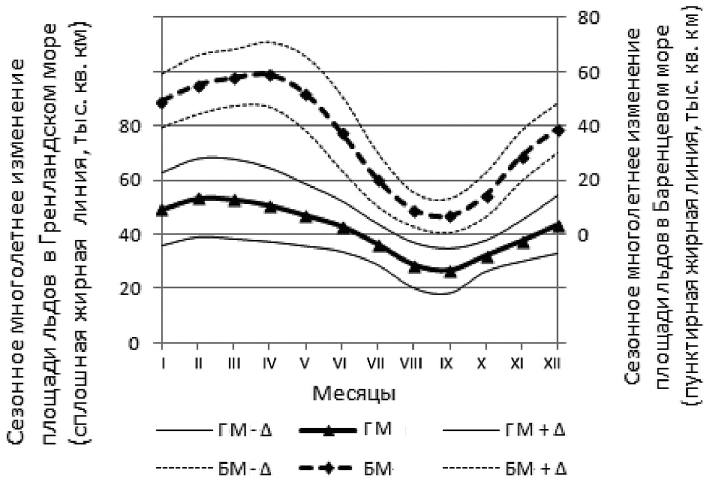

Рис. 2. Сезонный ход и диапазон изменчивости площади льдов в Гренландском и Баренцевом морях (тонкие линии указывают диапазоны изменчивости в пределах среднеквадратического отклонения Δ)

Fig. 2. Seasonal variation and range of variability of ice area in the Greenland and Barents Seas (thin lines indicate ranges of variability within ± Δ)

СЕЗОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Внутригодовые величины ледовитости площади льдов значительно меняются от года к году. Наибольшие вариации ледовитости в ГМ приходятся на март (среднеквадратическое отклонение Δ наблюдается в среднем в сентябре), при этом амплитуда внутригодовых колебаний площади 4,7 тыс. км^2, а в БМ — на июнь (Δ = 14,0 тыс. км^2). Минимальные ледовитости в Баренцевом море в 1,9 раза больше, чем в Гренландском море: амплитуда ледовитости составляют 4,7 и 8,8 тыс.км^2 соответственно для ГМ и БМ. Скорость сокращения площади льдов в результате таяния оценивается в 0,67 и 1,76 тыс. км^2/месяц, а скорость увеличения ледовитости в результате нарастания льда оценивается в 0,94 и 1,26 тыс. км^2/месяц соответственно для ГМ и БМ. Приведенные оценки показывают, что сезонное уменьшение ледовитости в Гренландском море происходит медленнее, чем в Баренцевом, а увеличение площади льдов, наоборот, происходит быстрее в ГМ по сравнению с БМ.

Наименьшая величина площади льдов (см. табл. 1) наблюдалась преимущественно в сентябре в Баренцевом море в 58 % случаях и в Гренландском море — в 67 %. Наибольшая площадь льдов в Баренцевом море фиксировалась чаще всего в апреле (46 % случаев), тогда как в Гренландском наиболее часто максимум ледовитости приходится на март — 46 %. Средняя скорость изменения площади льдов *C* рассчитывалась по формуле $C_i = (L_{i+1} - L_{i-1})/2$.

Величины стандартных отклонений для обоих морей в зимний период (13–14·10^3 км^2) почти в два раза больше, чем в летний период (6–7·10^3 км^2). При этом минимальные значения стандартного отклонения для Баренцева моря приходятся на август–сентябрь, что соответствует периоду наименьшей площади льда. Тогда как в Гренландском море минимум стандартных отклонений приходится на октябрь–ноябрь, сдвигаясь относительно наименьшей ледовитости. Степень вариаций, пред-

Таблица 1

Статистические характеристики внутригодовых изменений площади льдов

Месяц	Максимальная площадь льдов, %		Минимальная площадь льдов, %		Средне-многолетняя площадь льдов, 10^3 км^2		Средне-квадратичное отклонение площади льдов, 10^3 км^2		Скорость изменения, 10^3км^2/месяц	
	Моря		Моря		Моря		Моря		Моря	
	БМ	ГМ	БМ	ГМ	БМ	ГМ	БМ	ГМ	БМ	ГМ
Январь	4	9	–	–	49,3	47,7	9,9	13	8,8	4,1
Февраль	20	25	–	–	55,2	51,1	11,0	13,1	4,7	2,1
Март	26	42	–	–	58,6	51,9	11,5	14,1	2,5	–0,9
Апрель	46	17	–	–	60,2	49,2	13,0	12,3	–3,0	–3,3
Май	3	6	–	–	52,7	45,4	13,4	10,2	–10,9	–3,9
Июнь	–	1	–	–	38,4	41,5	13,6	8,46	–16,1	–4,6
Июль	–	–	–	2	20,6	36,2	9,7	7,91	–14,4	–6,3
Август	–	–	38	26	9,6	29	6,4	8,88	–6,8	–5,0
Сентябрь	–	–	58	67	7,1	26,3	6,0	8,47	2,3	1,3
Октябрь	–	–	4	5	14,2	31,5	7,7	5,53	10,1	5,3
Ноябрь	–	–	–	–	27,2	36,8	9,6	7,19	11,7	5,7
Декабрь	–	–	–	–	37,6	42,9	9,6	10,8	11,1	5,5

ставляющая собой отношение стандартного отклонения к средней площади льдов (см. табл. 1), возрастает в летние месяцы и уменьшается в осенний период, достигая минимума зимой, затем вновь увеличивается в весенний период.

Наибольшая скорость увеличения площади льдов, рассчитанная по формуле $C_i = (L_{i+1} - L_{i-1})/2$, отмечается в октябре–декабре как для Гренландского, так и для Баренцева моря (10,3–13,0·10^3 км^2 и 5,5–6,0·10^3 км^2 в месяц соответственно). Наибольшая скорость сокращения площади льдов наблюдается в июне в Баренцевом море (18,0·10^3 км^2 в месяц) и в июле в Гренландском (7,7·10^3 км^2 в месяц). Причем как сокращение, так и увеличение площади льдов в Баренцевом море проявляется более интенсивно, чем в Гренландском, а скорость изменения площади льдов в 2–3 раза больше.

Несмотря на большую внутригодовую изменчивость площадей льдов, удается выделить классы (кластеры) подобных сезонных циклов. Для их классификации использовались два метода: метод Уорда и К-средних. В качестве критерия близости при использовании метода К-средних было выбрано Евклидово расстояние [19]. В результате как для Гренландского, так и для Баренцева морей были выделены 3 кластера, в которые вошли группы лет подобных сезонных циклов, представленные в табл. 2.

Годовые циклы каждого кластера были осреднены, и получены графики (рис. 3). В кластер К1 вошли годы с наибольшей площадью льдов как в зимний, так и в летний периоды. Кластер К2 объединил годы средней ледовитости, а в кластер К3 вошли годы с наименьшей ледовистостью Гренландского и Баренцева морей. Из анализа лет, вошедших в кластеры К1–К3 для обеих акваторий, следует, что подобие сезонных циклов на фоне малой и большой ледовитости сохраняется от одного сезона до 4 лет. Причем для Гренландского моря установленная закономерность справедлива

Таблица 2

Группы лет подобных сезонных циклов трех кластеров для Баренцева и Гренландского морей

Кластер	Баренцево море	Гренландское море
Кластер 1	1962–1963, 1965–1966, 1969, 1978–1979, 1980–1981	1950–1954,1965, 1967–1969
Кластер 2	1950–1953, 1956–1962, 1963–1965, 1966–1978, 1979–1980, 1981–1994, 1995–2000, 2001–2004, 2008–2009, 2010–2011	1955–1957, 1961, 1963–1964, 1966, 1970–1973, 1975, 1977–1982, 1986–1989, 1996–1998
Кластер 3	1953–1956, 1994–95, 2000–2001, 2004–2008, 2009–2010, 2011–2015	1958–1960, 1962, 1974, 1976, 1983–1985, 1990–1995, 1999– 2016

для всех выделенных кластеров, а для Баренцева моря закономерность справедлива для периодов малой ледовитости. На фоне средней ледовитости в Баренцевом море подобие циклов может сохраняться до 8–12 лет. Для группы лет 1-го и 2-го кластеров максимальное развитие площади льдов наступало асинхронно: в ГМ среднем в феврале, а в БМ в апреле. Минимальная площадь льдов в среднем для обеих акваторий наблюдалась в сентябре.

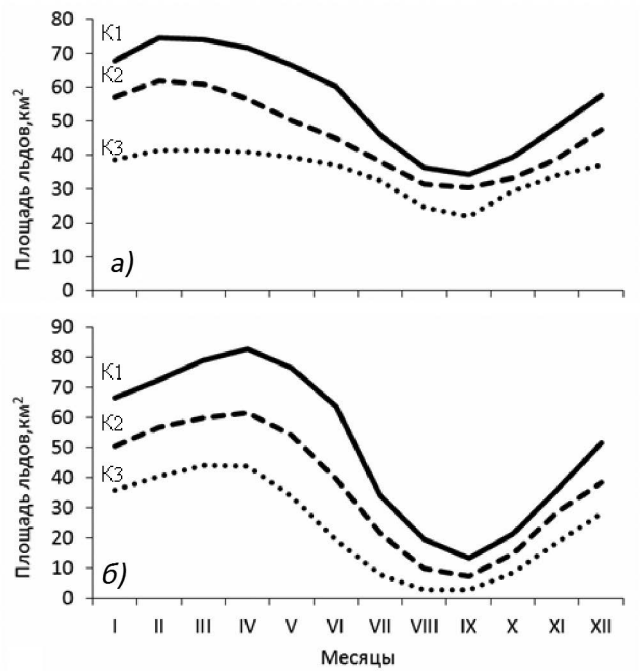

Рис. 3. Сезонные изменения площади льдов Гренландского (*а*) и Баренцева (*б*) морей, полученные осреднением месячных данных лет, входящих в кластеры К1–К3

Fig. 3. Seasonal changes in the area of ice of the Greenland (*a*) and Barents (*б*) Seas, obtained by averaging the monthly data of the years included in the K1–K3 clusters

До 1969 г. в Гренландском море и до 1980 г. в Баренцевом море сезонные циклы формировались на фоне большой и средней ледовитости. В период с 1969 г. до 1998 г. (ГМ) и с 1981 г. по 1994 г. (для БМ) сезонные циклы развивались на фоне средней ледовитости в обеих акваториях, а с 1999 г. в ГМ и с 1995 г. в БМ сезонные циклы протекали на фоне малой ледовитости моря. Очевидно, что наблюдается генеральное сходство выделенных периодов групп лет с некоторым запаздыванием для Баренцева моря относительно Гренландского.

Корреляционный анализ позволил установить влияние зимнего и летнего состояния ледяного покрова на площадь льдов в последующие месяцы. Результаты расчетов (табл. 3) показывают, что зима (февраль–март для Гренландского и апрель–май для Баренцева морей) имеет значимую связь (при уровне значимости 0,05) со всеми месяцами до конца текущего календарного и последующего года. В Гренландском море связь зимней ледовитости с последующими сезонами уменьшается до августа, после чего возрастает, достигая максимума $R = 0{,}66$ для ледовитости в декабре-январе (табл. 3). В Баренцевом море корреляционная связь несколько иная: связь ледовитости в апреле–мае вначале уменьшается до $R = 0{,}25$ для октября–ноября, а затем увеличивается до $R = 0{,}58$ для ледовитости в феврале–марте следующего года (табл. 3).

Статистическая связь летнего состояния ледяного покрова с ледовитостью последующих сезонов несколько отличается в ГМ и БМ. Значение коэффициента

Таблица 3

Коэффициенты корреляции *R* между изменениями площади льдов зимой* и летом и изменениями площади льдов в последующие пары месяцев текущего года, последующего года*** и следующего за ним года******

Пары месяцев	Коэффициенты корреляции			
	Гренландское море		Баренцево море	
	в феврале–марте	в августе–сентябре	в апреле–мае	в августе–сентябре
Февраль–март	1	–	–	–
Апрель–май	0,83±0,12	–	1	–
Июнь–июль	0,7±0,12	–	0,86	–
Август–сентябрь	0,52±0,12	1	0,58	1
Октябрь–ноябрь	0,54	0,73	0,25	0,55
Декабрь–январь	0,66	0,67	0,52	0,52
Февраль–март (+1 год)	0,59	0,57	0,58	0,46
Апрель–май (+1 год)	0,55	0,57	0,52	0,38
Июнь–июль (+1 год)	0,37	0,53	0,52	0,46
Август–сентябрь (+1 год)	0,42	0,54	0,50	0,63
Октябрь–ноябрь (+1 год)	0,54	0,51	0,37	0,45
Декабрь–январь (+1 год)	0,61	0,58	0,39	0,29
Февраль–март (+2 года)	0,45	0,55	0,29	0,28
Апрель–май (+2 года)	0,49	0,56	0,33	0,29
Июнь–июль (+2 года)	0,36	0,39	0,37	0,31
Август–сентябрь (+2 года)	–	–	0,28	0,28

Примечания. Для всех коэффициентов корреляции критерий Стьюдента равен ±0,21 при уровне значимости 0,05; * — февраль–март (Гренландское море) и апрель–май (Баренцево море); ** — август–сентябрь (Гренландское и Баренцево моря); *** — +1 год; **** — +2 года.

корреляции летней площади льдов (август–сентябрь) Гренландского моря с площадью льдов последующих месяцев уменьшается до июня–июля следующего года, затем несколько увеличивается до $R = 0{,}54$ в период август–сентябрь последующего года и после уменьшения достигает максимума $R = 0{,}58$ в декабре–январе последующего года (см. табл. 3). В Баренцевом море значение коэффициента корреляции летней площади льдов (август–сентябрь) с площадью льдов последующих месяцев уменьшается до апреля–мая следующего года, а затем достигает максимума $R = 0{,}63$ в августе–сентябре следующего года (см. табл. 3). Таким образом, летняя ледовитость морей сохраняет свое влияние на состояние ледяного покрова летом следующего года, причем влияние несколько больше, чем влияние зимы на лето.

Результат корреляционного анализа согласуется с результатами кластерного анализа. Как отмечалось выше, подобие внутригодовых циклов может сохраняться в среднем 2–3 года. В этом случае можно говорить о приемственности состояния ледяного покрова внутри годового цикла, когда предыстория состояния ледяного покрова, в определенной мере, определяет текущую фазу.

Установленная эмпирическая закономерность имеет важное значение для понимания процесса формирования ледового режима и может быть использована при построении статистических моделей диагноза и прогноза ледовитости морей.

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЛЕДОВИТОСТИ

Характер декадных изменений ледовитости морей демонстрирует рис. 4, на котором приведены аномалии ледовитости морей относительно тренда за период 1930–2016 гг., осредненные за десятилетия для зимнего и летнего периодов.

Пики значительного уменьшения ледовитости приходятся на 1930–1950-е и 2000–2010-е гг., а период значительного увеличения ледовитости отмечается в 60–80-х гг. прошлого столетия и несколько меньшее увеличение — в 1990-е гг. Знак аномалий ледовитости в морях преимущественно совпадал. Но в зимний период в 1940-х и 1950-х годах и в летний период в 1940-х гг. знаки аномалий ледовитости были противоположными. Также зимой (апрель) в 1980-е гг. знаки аномалий ледовитости не совпадали (см. рис. 4). Из анализа следует, что преимущественная сопряженность декадных изменений ледовитости Гренландского и Баренцева морей эпизодически прерывается оппозиционными изменениями.

Чтобы определить роль гидрометеорологических факторов в формировании климатических стадий ледовитости, нами были построены гистограммы гидрометеорологических индексов, осредненных за периоды климатических стадий. Как видно из рис. 5, в период уменьшения ледовитости (2003–2015 гг.) индексы AMO (синий), AD (арктический диполь, серый) и PNA (красный) имеют большие положительные значения, незначительные величины индекса AO (зеленый) и глубокая отрицательная фаза NAO (желтый). Последнее приводит к усилению адвекции теплых атлантических вод, как в Баренцево, так и в Гренландское море. Притом наблюдается усиление субтропического максимума давления и углубление Исландского минимума, возникают зоны больших градиентов между этими атмосферными образованиями и, соответственно, увеличивается частота и сила ветров, несущих с Атлантики теплый и влажный воздух в Западную Арктику. Усиливается антициклоническая деятельность субтропического происхождения над Европой. При положительных фазах AD и PNA наблюдается понижение давления над Карским морем и морем Лаптевых и его повышение над Канадским архипелагом, а также ослабление зональной со-

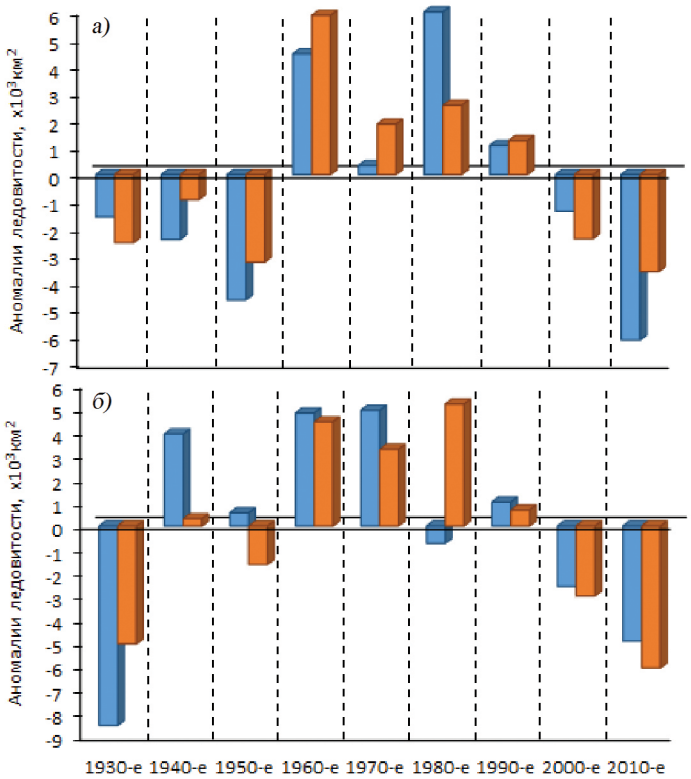

Рис. 4. Аномалии ледовитости Гренландского (*а*) и Баренцева (*б*) морей в апреле (синяя колонка) и августе (красная колонка) относительно тренда за период 1930–2016 гг., осредненные за десятилетия

Fig. 4. Anomalies of the ice cover of the Greenland (*a*) and Barents (*б*) Seas in April (blue column) and August (red column) relative to the trend for the period 1930–2016, averaged over 10 years

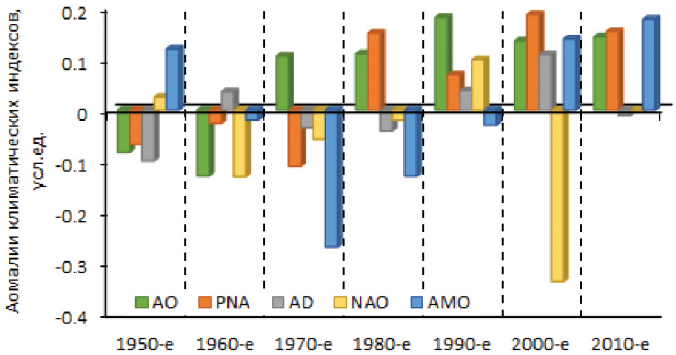

Рис. 5. Гистограмма осредненных за периоды величин глобальных климатических индексов AMO (синий), PNA (красный), AO (зеленый), AD (серый), NAO (желтый)

Fig. 5. The histogram of the averaged over the periods of the global climate indices AMO (blue), PNA (red), AO (green), AD (gray), NAO (yellow)

ставляющей и усиление меридионального переноса, учащение антициклонической деятельности. Увеличение продолжительности этих процессов приводит к значительному и длительному уменьшению ледовитости.

На периоды увеличения площади льдов (1950–1954, 1964–1969, 1976–1981 гг.) приходятся либо отрицательные, либо слабо положительные значения индекса АМО. Приток теплых атлантических вод в данные периоды был ослаблен. Глубокая отрицательная фаза индексов AO и AD создает области повышенного давления в районе Центральной Арктики, что препятствует проникновению теплого и влажного воздуха со стороны Северной Атлантики, несет холодные воздушные массы из северной части Тихоокеанского сектора и вызывает аномально холодные температуры воздуха, что приводит к резкому нарастанию льда. В исследованиях зарубежных авторов [22–24] также подчеркивается важность аномалий температуры воздуха в крупномасштабной атмосферной циркуляции и циклонической активности. Выявленные факторы являются очень важным аспектом в понимании формирования ледового режима Баренцева и Гренландского морей и возможности прогнозирования.

ЦИКЛИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ЛЕДОВИТОСТИ ГРЕНЛАНДСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ

В работе [25] указывается, что межгодовые изменения площади льдов в арктических морях носят полициклический характер. Нами выполнен спектральный анализ зимней и летней ледовитости Гренландского и Баренцева морей за период 1930–2016 гг. При длине ряда 87 лет статистически значимые величины периодов находятся в пределах 2–22 года.

На рис. 6 приведены графики спектральной плотности в условных единицах как функции частоты колебаний (1/год) для обоих морей в летний (август) и зимний (апрель) сезоны. Для наглядности на пиках спектральной плотности цифрами указаны периоды цикличностей в годах. Циклические колебания в высокочастотной части спектра с периодами меньше 3 лет вызваны, по мнению авторов работы [25], влиянием атмосферной циркуляции и взаимодействия океана и атмосферы. Эта часть спектра Гренландского моря отличается от аналогичной части спектра Баренцева моря. Меняются спектры и от сезона к сезону, что можно объяснить сезонным ходом метеорологических процессов и внутригодовым изменением взаимодействия атмосферы и океана в присутствии ледяного покрова в данном регионе.

В низкочастотной части спектра колебаний в обоих морях выделяются циклические колебания 22, 9–11 и 6–7 лет. В Гренландском море спектральная плотность колебаний 22, 9–11 и 6–7 лет отличается от спектральной плотности этих колебаний в Баренцевом море. Но также низкочастотный спектр в Гренландском море в летний период значительно не похож на спектр зимнего сезона. Спектральная плотность отмеченных колебаний в Баренцевом море летом подобна таковой в зимний период. Однако, несмотря на указанные различия, можно предположить, что циклические колебания 22, 9–11 и 6–7 лет индуцируются некими общими для обоих морей глобальными причинами.

По мнению многих авторов (см. обзор в монографии [25]), долгопериодные колебания ледовитости зависят не только от гидрометеорологических процессов, но и от астрогеофизических факторов. В качестве аргумента приводится совпадение циклических колебаний ледовитости и циклических вариаций геофизических и астрономических индексов. Эта концепция нашла воплощение в обобщающей

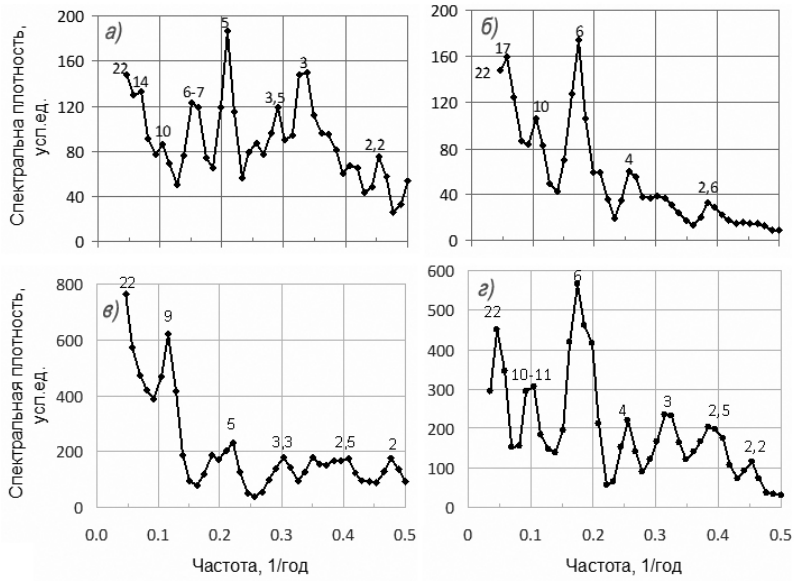

Рис. 6. Спектральные плотности колебаний ледовитости Гренландского (*а*, *в*) и Баренцева (*б*, *г*) морей за период 1930–2016 гг. в летний (август, *а* и *б*) и зимний (апрель, *в* и *г*) сезоны. Цифрами на графиках в точках указаны периоды циклических колебаний в годах.

Fig. 6. Spectral densities of fluctuations in the ice cover of the Greenland (*а*, *в*) and Barents (*б*, *г*) Seas for the period 1930–2016 in the summer (August, *а* and *б*) and winter (April, *в* and *г*) seasons. The numbers on the graphs in the points indicate the periods of cyclical fluctuations in years.

работе И.В. Максимова [26], где был предложен компонентно-гармонический метод расчета и прогноза ледовитости, учитывающий солнечно-обусловленный 11-летний цикл, 6–7-летний цикл колебания положения полюса Земли и 19-летний цикл, связанный с действием долгопериодного лунного деклинационного прилива в океане. Б.А. Слепцов-Шевлевич и А.М. Баяринов [27] акцентировали внимание на, возможно, недооцененной роли скорости вращения Земли в долгопериодных изменениях уровня океана и ледовитости морей. И.Е. Фролов и др. [25] полагают, что низкочастотные колебания многих гидрометеорологических характеристик, включая ледовитость морей, обусловлены циклическим 50–60 лет изменением расстояния между Землей и Солнцем вследствие диссимметрии солнечной системы. Поскольку суммарный поток солнечной радиации, достигающий поверхности Земли, обратно пропорционален квадрату расстояния до Солнца, то в результате эффекта диссимметрии формируется 50–60-летнее колебание притока суммарной солнечной радиации, отражающееся в изменениях состояния атмосферы и океана [28].

Нами был выполнен кросс-корреляционный анализ связи межгодовых изменений ледовитости и средних годовых значений следующих астрогеофизических параметров: долготная координата положения полюса Земли Y, индексы нутации оси Земли dEps и dPsi, индекс скорости вращения Земли lod (length of day), индекс солнечной активности Sun (среднегодовое число Вольфа), среднее за шесть месяцев расстояние от Солнца до Земли в летний $S_{X\text{-}III}$ и зимний $S_{X\text{-}III}$ периоды. Ледовитость и все переменные были сглажены трехлетним скользящим осреднением. Парные коэффициенты

корреляции приведены в табл. 4, где в скобках указан также временной сдвиг в годах. Отрицательное значение временного сдвига означает, что астрогеофизический параметр опережает изменение ледовитости. На диаграммах кросс-корреляции пики значимых коэффициентов корреляции могут располагаться на нескольких временных лагах; в табл. 6 представлены значимые коэффициенты корреляции с временным лагом не более 5 лет. Коэффициенты корреляции ниже уровня значимости или равные нулю обозначены символом < *R*. В нижней строке табл. 4 приведены значимые периоды цикличности астрогеофизических индексов, которые близки к выделенным цикличностям 22, 9–11 и 6–7 в изменениях ледовитости Гренландского и Баренцева морей с учетом точности расчета периодов как минимум ±1 год.

Из оценок, приведенных в табл. 4, следует, что сопряженность колебаний ледовитости и движения полюса Земли Y, нутации оси вращения Земли dEps, расстояния от Солнца до Земли $S_{IV\text{-}IX}$ и $S_{X\text{-}III}$ достаточно высокая для обоих морей. Для сравнения в таблице приведены коэффициенты корреляции между ледовитостью и средней годовой температурой воздуха *T* (табл. 4). Как видим, корреляционная связь отмеченных астрогеофизических параметров с ледовитостью сравнима с коэффициентами корреляции между ледовитостью и температурой воздуха *T*.

Связь ледовитости и скорости вращения Земли одинаково проявляется в летний период (табл. 4) как в ГМ, так и в БМ, но отсутствует в зимний период. Причина этого состоит, вероятно, в механизме влияния скорости вращения Земли на долгопериодные изменения площади льдов, но сам механизм прямого или косвенного воздействия на динамику площади льдов в летний и зимний периоды пока неизвестен.

Связь ледовитости с индексом солнечной активности, представляемой числами Вольфа, оказалась отрицательной для зимних сезонов ГМ (табл. 4) и отутствует для летнего сезона. В БМ коэффициенты корреляции ледовитости с индексом солнечной активности оказались меньше уровня значимости.

Таблица 4

Парные значимые коэффициенты корреляции между ледовитостью Гренландского и Баренцева морей в апреле и августе и астрофизическими параметрами

Район, месяц	$T_{I\text{-}XII}$	Y	dEps	lod	Sun	$S_{IV\text{-}IX}$	$S_{X\text{-}III}$
ГМ_апр	–0,38(0) –0,41(–2)	–0,34(0) –0,45(–4)	+0,56(0) +,57(–1)	< *R*	–0,24(–2)	+0,40(0) +0,42(–5)	–0,46(–1) –0,48(–5)
ГМ_авг	–0,52(–1)	–0,35(–1) –0,41(–7)	+0,33(–2)	+0,37(0)	< *R*	+0,32(–4)	–0,25(0) –0,31(–4)
БМ_апр	–0,44(0) –0,47(–1)	–0,30(0) –0,36(–4)	+0,51(0)	< *R*	< *R*	+0,37(–1) +0,40(–5)	–0,42(–2) –0,46(–5)
БМ_авг	–0,42(–1) –0,44 (–2)	–0,35(–1) –0,38(–8)	+0,32(0)	+0,34(0)	< *R*	+0,27(–7)	–0,24(–2) –0,32(–7)
Цикличности предикторов, годы	7–8	6–7	17–20,11	17–20,14	11	4, 12	4, 12

Примечания. В скобках указан временной сдвиг (годы) между ледовитостью и астрофизическими параметрами. Символом < *R* обозначены коэффициенты корреляции ниже уровня значимости или равные нулю. В нижней строке таблицы приведены значимые периоды астрогеофизических индексов L_{GrIV}, L_{BarIV}, L_{GrVIII}, $L_{BarVIII}$. Для всех коэффициентов корреляции критерий Стьюдента равен ±0,21 при уровне значимости 0,05.

Таким образом, большие значимые коэффиценты корреляции между ледовитостью и астрогеофизическими факторами свидетельствуют о реальности существования реакции ледовитости на изменения астрофизических факторов. При этом реакция имеет различия в ГМ и БМ.

Выполненные расчеты дают основание полагать, что космогеофизические факторы играют важную роль в долгопериодной и климатической изменчивости ледовитости Гренландского и Баренцева морей. Однако остается открытым вопрос о механизме воздействия астрофизических процессов на долгопериодную динамику площади льдов: реализуется ли этот механизм непосредственным воздействием или опосредовано через цепочку причинно-следственных связей.

МНОЖЕСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДОВИТОСТИ ГМ И БМ СОВМЕСТНО С ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ И АСТРОГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

Поскольку из множества проанализированных нами факторов, влияющих на ледовитость, нельзя выделить один доминирующий фактор и необходимо учитывать влияние нескольких факторов, то для получения уравнения связи с несколькими независимыми переменными используем множественную регрессию. С помощью многомерного статистического анализа был выполнен поиск связи ледовитости морей Гренландского L_{GrIV}, L_{GrVIII} и Баренцева L_{BarIV}, L_{BarVIII} для апреля и августа с гидрометеорологическими индексами и астрогеофизическими параметрами. В качестве переменных (предикторов) использовались: атмосферные индексы AO(k), $\mathrm{PNA}_{i-j}(k)$, $\mathrm{NAO}_{i-j}(k)$, $T_{i-j}(k)$, $\mathrm{AMO}_{i-j}(k)$, где i–j — месяцы периода осреднения и k — временной лаг в годах; а также среднегодовые астрогеофизические параметры, указанные в табл. 4. Укажем, что ряды ледовитости, гидрометеорологических индексов и астрогеофизических параметров были подвергнуты трехлетнему скользящему осреднению. Процедура осреднения позволила в определенной мере сгладить высокочастотную часть спектра колебаний ледовитости и метеорологических индексов.

Мультирегрессионный анализ из пакета программ СТАТИСТИКА путем перебора предикторов и выбора значимых и неколлинеарных факторов позволил получить следующие статистические уравнения связи.

Для зимнего сезона (апрель):

$$L_{\mathrm{GrIV}} = -4{,}847\cdot T_{\mathrm{I-XII}}(-1) - 0{,}905\cdot \mathrm{AMO}_{\mathrm{X-III}}(-4) - 5{,}029\cdot \mathrm{NAO}_{\mathrm{X-III}}(0) + 1542\cdot \mathbf{dEps}_{\mathbf{I-XII}}(-1) + 51{,}631, \quad (1)$$

$$L_{\mathrm{BarIV}} = -6{,}76\cdot T_{\mathrm{I-XII}}(-1) - 12{,}373\cdot \mathrm{AMO}_{\mathrm{I-XII}}(-5) - 4{,}71\cdot \mathrm{NAO}_{\mathrm{X-III}}(0) - 11{,}68\cdot \mathrm{AO}_{\mathrm{IV-IX}}(-1) + 931\cdot \mathbf{dEps}_{\mathbf{I-XII}}(-1) + 59{,}702. \quad (2)$$

Для летнего сезона (август):

$$L_{\mathrm{GrVIII}} = -3{,}87\cdot T_{\mathrm{I-XII}}(-1) - 0{,}51\cdot \mathrm{AMO}_{\mathrm{IV-IX}}(-3) - 3{,}73\cdot \mathrm{NAO}_{\mathrm{IV-IX}}(0) + 4{,}01\cdot \mathrm{AO}_{\mathrm{X-III}}(-1) + 798{,}6\cdot \mathbf{dEps}_{\mathbf{I-XII}}(0) + 2{,}75\cdot \mathbf{lod}_{\mathbf{I-XII}}(-1) + 25{,}20, \quad (3)$$

$$L_{\mathrm{BarVIII}} = -3{,}00\cdot T_{\mathrm{I-XII}}(-1) - 10{,}08\cdot \mathrm{AMO}_{\mathrm{I-XII}}(-5) - 3{,}36\cdot \mathrm{NAO}_{\mathrm{-X-III}}(0) + 3{,}74\cdot \mathrm{NAO}_{\mathrm{-IV-IX}}(-1) - 9{,}88\cdot \mathrm{AO}_{\mathrm{-IV-IX}}(-1) + 367{,}6\cdot \mathbf{dEps}_{\mathbf{-I-XII}}(0) - 20{,}34\cdot \mathbf{Y}_{\mathbf{-I-XII}}(-1) + 16{,}00\cdot \mathbf{S}_{\mathbf{-X-III}}(0) - 75{,}04. \quad (4)$$

В уравнениях (1) – (4) полужирным шрифтом выделены переменные, относящиеся к астрогеофизическим факторам. Достоверность полученных уравнений обычно оценивается статистической значимостью, p-level, которая представляет

Таблица 5

Оценки статистических характеристик переменных правой части уравнений (1) – (4)

Предиктор	Уровень значимости, *p*-level	Частный коэффициент корреляции *r*	Вклад, %
Зимний сезон (апрель)			
Ледовитость Гренландского моря в апреле, L_{GrIV}, общий коэффициент корреляции $R = 0{,}87$; $R^2 = 0{,}76$			
$T_{I–XII}(–1)$	0,003	–0,23	26/20
$AMO_{X–III}$(–4)	< 0,001	–0,28	
$NAO_{X–III}(0)$	0,001	–0,22	
$dEps_{I–XII}(0)$	< 0,001	0,71	74/56
Ледовитость Баренцева моря в апреле, L_{BarIV}, общий коэффициент корреляции $R = 0{,}80$; $R^2 = 0{,}64$			
$T_{I–XII}(–1)$	< 0,001	–0,36	51/33
$AMO_{I–XII}(–5)$	0,014	–0,20	
$NAO_{X–III}$	< 0,001	–0,24	
$AO_{IV–IX}(–1)$	0,018	–0,16	
$dEps_{I–XII}(0)$	< 0,001	0,49	49/31
Летний сезон (август)			
Ледовитость Гренландского моря в августе, L_{GrVIII}, общий коэффициент корреляции $R = 0{,}84$; $R^2 = 0{,}70$			
$T_{I–XII}(–1)$	0,001	–0,38	20/14
$AMO_{IV–IX}$(–3)	0,016	–0,18	
$NAO_{IV–IX}(0)$	0,002	–0,24	
$dEps_{I–XII}(0)$	< 0,001	0,55	80/56
$S_{X–III}(0)$	0,001	0,52	
$S_{IV–IX}(0)$	0,002	0,50	
$lod_{I–XII}(–1)$	<0,001	0,41	
Ледовитость Баренцева моря в августе, $L_{BarVIII}$, общий коэффициент корреляции $R = 0{,}81$; $R^2 = 0{,}66$			
$T_{I–XII}(–1)$	0,002	–0,31	41/27
$AMO_{I–XII}(–5)$	<0,001	–0,32	
$NAO_{X–III}(0)$	<0,001	–0,33	
$NAO_{IV–IX}(–1)$	<0,001	0,31	
$AO_{IV–IX}(–1)$	0,001	–0,27	
$dEps_{I–XII}(0)$	0,002	0,38	59/39
$S_{X–III}(0)$	<0,001	0,63	
$Y_{I–XII}(–1)$	<0,001	–0,49	

собой вероятность ошибки, участвующей в принятии результата как действительного. Обычно считается, что результаты достоверно отражают общую картину, если значение *p*-level меньше 0,05 (т.е. 5%). Результаты на уровне $p \leq 0{,}01$ обычно считаются статистически значимыми. По результатам расчетов в табл. 5 приведены статистические характеристики переменных правой части уравнений. Из оценок *p*-level видно, что все переменные, вошедшие в уравнения (1) – (4), статистически значимые и достоверно отражают характер связи ледовитости с предикторами. Другой важной

характеристикой является частный коэффициент корреляции r, квадрат которого интерпретируется как доля дисперсии ледовитости, т.е. измеряет индивидуальный вклад переменной в объяснение ледовитости. В графе «Вклад в %» в числителе доля гидрометеорологических и геофизических факторов в общую дисперсию расчетной по уравнениям (1–4) ледовитости, а в знаменателе — вклад в общую дисперсию фактических изменений ледовитости.

Структура уравнений связи ледовитости с предикторами в зимний период для Гренландского моря (уравнение (1)) схожа с таковой для Баренцева моря (уравнение (2)). Долгопериодные колебания площади льдов в зимний период обоих морей связаны с обратным знаком с температурой воздуха $T_{\text{I-XII}}$, тепловым состоянием атлантических вод $\text{AMO}_{\text{X-III}}$ и $\text{AMO}_{\text{I-XII}}$, режимом атмосферной циркуляции, представляемым индексом $\text{NAO}_{\text{X-II}}$, а также с нутацией Земли, представленной параметром $\text{dEps}_{\text{I-XII}}$. Небольшое различие вносит присутствие метеорологического индекса Арктическое колебание, $\text{AO}_{\text{IV-IX}}$, в уравнении (2) для зимней ледовитости Баренцева моря.

При переходе к летнему сезону характер связи ледовитости с предикторами меняется значительно, число предикторов возрастает. Дополнительно к индексу нутации Земли dEps появляется связь с положением полюса Земли (координата долготы $\text{Y}_{\text{I–XII}}$) и расстоянием от Солнца до Земли в зимний $\text{S}_{\text{X-III}}$и летний $\text{S}_{\text{IV-IX}}$периоды, а также скоростью вращения Земли $\text{lod}_{\text{I-XII}}$ для L_{GrVIII}.

Поскольку квадрат частного коэффициента корреляции r измеряет индивидуальный вклад переменной в объяснение ледовитости, можно оценить вклад гидрометеорологических и астрогеофизических параметров в общую дисперсию долгопериодных колебаний ледовитости. Из графы «Вклад» табл. 5 следует, что в рамках полученных моделей (1), (3) в Гренландском море за весь климатический период 1931–2015 гг. доля вклада астрогеофизических факторов в долгопериодные изменения ледовитости как зимнего, так и летнего сезона превосходила вклад гидрометеорологических факторов в 3–4 раза.

В Баренцевом море вклад в общую дисперсию астрогеофизических факторов в зимний период несколько меньше вклада гидрометеорологических факторов, а в летний период превосходит его всего лишь в 1,4 раза. Этот результат еще раз демонстрирует существование различия формирования ледового режима в Гренландском и Баренцевом морях.

Многомерный подход к установлению связи долгопериодных колебаний ледовитости с гидрометеорологическими и астрогеофизическими предикторами и получение вероятностных моделей (1) – (4) открывает возможности использовать разработанный подход для получения статистических уравнений диагноза и прогноза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании архивных данных и новой информации о среднемесячных значениях ледовитости исследованы климатические изменения сезонных и межгодовых колебаний площади ледяного покрова и установлены общие черты и различия колебаний ледовитости морей Северо-Европейского бассейна.

Выделены 3 кластера внутригодовых циклов ледового режима Гренландского и Баренцева морей, объединившие годы с наибольшей площадью льдов как в зимний, так и в летний периоды, годы средней ледовитости и годы с наименьшей ледовистостью.

Корреляционный анализ подтвердил установленное ранее влияние зимнего и летнего состояния ледяного покрова на площадь льдов в последующие месяцы.

Показана сопряженность изменения средних десятилетних величин ледовитости морей в апреле и августе со средними декадными индексами атмосферной циркуляции AO, PNA, NAO и индексом теплового состояния Северной Атлантики AMO.

Выполнен анализ структуры циклических колебаний зимней и летней ледовитости в морях. В Гренландском море спектральная плотность колебаний 22, 9–11 и 6–7 лет отличается от спектральной плотности этих колебаний в Баренцевом море. В летний период в Гренландском море спектр в значительной степени отличается от такового в зимний сезон. Спектральная плотность колебаний в Баренцевом море летом подобна таковой в зимний период.

Установлена связь межгодовых изменений ледовитости и средних годовых значений таких астрогеофизических параметров, как долготная координата положения полюса Земли Y, индексы нутации оси Земли dEps и dPsi, индекс скорости вращения Земли lod (length of day), индекс солнечной активности Sun (среднегодовое число Вольфа), среднее за шесть месяцев расстояние от Солнца до Земли в летний $S_{X\text{-}III}$ и зимний $S_{X\text{-}III}$ периоды. Значимые парные коэффициенты корреляции достаточно большие (R = |0,30|–|0,56|) для обоих морей, сравнимые с коэффициентами корреляции между ледовитостью и средней годовой температурой воздуха T, свидетельствуют о реальности существования реакции ледовитости на изменения астрофизических факторов.

Впервые получены статистические уравнения связи долгопериодных колебаний ледовитости с гидрометеорологическими и астрогеофизическими факторами. Общий коэффициент корреляции варьирует в пределах R = 0,80–0,87. В Гренландском море доля вклада астрогеофизических факторов в долгопериодные изменения ледовитости как зимнего, так и летнего сезона превосходит вклад гидрометеорологических факторов в 3–4 раза. В Баренцевом море вклад в общую дисперсию астрогеофизических факторов в зимний период несколько меньше вклада гидрометеорологических факторов, а в летний период превосходит всего лишь в 1,4 раза.

Авторский подход к исследованию климатических изменений сезонных и долгопериодных колебаний ледовитости в Гренландском и Баренцевом морях может быть использован для анализа долгопериодных колебаний ледовитости других арктических морей. Использование физико-статистического подхода для получения прогностических уравнений долгопериодных и климатических изменений ледовитости требует дополнительных исследований и верификации с учетом региональных особенностей каждого моря.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта — RFMEFI61617X0076).

Acknowledgments. This work was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (the unique identifier of the project —RFMEFI61617X0076).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Захаров В.Ф.* Льды Арктики и современные природные процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 96 с.

2. *Зубакин Г.К.* Крупномасштабная изменчивость состояния ледяного покрова морей Северо-Европейского бассейна. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 160 с.

3. *Миронов Е.У.* Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ААНИИ, 2004. 319 с.

4. *Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О.* Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 269 с.

5. *Визе В.Ю.* Климат морей Советской Арктики. М.; Л.: Изд-во Главсевморпути, 1940. 124 с.

6. *Визе В.Ю.* Колебания солнечной активности и ледовитости полярных морей: Доклады юбилейной сессии Арктического института. Л.: Изд-во Главсевморпути, 1944. 7 с.

7. *Визе В.Ю.* Основы долгосрочных ледовых прогнозов. М.: Изд-во Главсевморпути, 1944. 273 с.

8. *Лебедев А.А.* Крупные аномалии ледовитости Северо-Европейского бассейна // Тр. ААНИИ. 1994. Т. 432. С. 63–83.

9. *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.

10. *Лебедев А.А.* Особенности структуры и закономерности многолетней изменчивости ледовитости североатлантических морей // Тр. ААНИИ. 1985. Т. 396. С. 122–133.

11. *Трегубова М.В., Прокофьев О.М., Мухина А.В.* Многолетняя динамика ледовитости Гренландского моря в условиях современных климатических изменений // Символ науки. 2015. Вып. 5. С. 265–267.

12. *Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Денисов В.В., Жичкин А.П., Моисеев Д.В.* Учет вековой динамики климата Баренцева моря при планировании морской деятельности // Труды Кольского научного центра РАН. Серия «Океанология». 2013. Вып. 1 (14). С. 56–71.

13. *Жичкин А.П.* Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. Вып. 1 (20). С. 55–64.

14. *Крашенинникова С.Б., Крашенинникова М.А.* Причины и особенности долговременной изменчивости ледовитости Баренцева моря // Лед и Снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 112–122.

15. *Тимохов Л.А., Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Попов А.В*. Особенности сезонной и межгодовой изменчивости ледяного покрова Гренландского моря // Лед и Снег. 2018. Т. 58 (1). С. 127–134. doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-127-134.

16. Единая система информации об обстановке в Мировом океане. URL: http://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php (дата обращения 24.06.2019).

17. *Thompson D.W.J. , Wallace J.M.* The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. № 9. P. 1297–1300. doi:10.1029/98GL00950.

18. *Janout M., AksenovY., Hölemann J., Rabe B., Schauer U., Polyakov I., Bacon S., Coward A., Karcher M., Lenn Y.D., Kassens H., Timokhov L.* Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43 (1). P. 264–272. doi 10.1002/2015GL066565.

19. Теория вероятностей и математическая статистика. URL: http://statistica.ru/theory/ (дата обращения 24.06.2019).

20. Атлас Арктики. М.: ГУ Геодезии и картографии, 1985. 204 с.

21. *Dese C., Teng H.* Evolution of Arctic Sea ice concentration trends and the role of atmospheric circulation forcing, 1979–2007 // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. L02504. doi:10.1029/2007GL032023.

22. *Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I.* Barents Sea multidecadal variability // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. L19604. doi:10.1029/2009GL039847.

23. *Sorteber A., Kvingedal B.* Atmospheric forcing on the Barents Sea winter ice cover. // Journal of Climate. 2006. V. 19. P. 4772–4784.

24. *Zhang X., Sorteber A., Zhang J., Gerdes R., Comiso J.C.* Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. L22701. doi:10.1029/2008GL035607.

25. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 135 с.

26. *Максимов И.В.* Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 447 с.

27. *Слепцов-Шевлевич Б.А., Баяринов А.М.* Солнечный ветер, вращение Земли и климат. СПб., 2002. 159 с.

28. *Медведев И.П., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Лапшин В.Б.* Чандлеровские биения и полюсный прилив в Северном и Балтийском морях // Гелиогеофизические исследования. 2018. Вып. 18. С. 9 –17.

REFERENCES

1. *Zakharov V.F. L'dy Arktiki i sovremennye prirodnye protsessy.* Arctic ice and modern natural processes. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976: 96 p. [In Russian].

2. *Zubakin G.K. Krupnomasshtabnaia izmenchivost' sostoianiia ledianogo pokrova morei Severo-Evropeiskogo 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].

3. *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].

4. *Nikiforov EG, Shpayher A.O. Zakonomernosti formirovaniia krupnomasshtabnykh kolebanii 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].

5. *Wiese V.Yu. Klimat morei Sovetskoi Arktiki.* Climate of the Seas of the Soviet Arctic, Moscow; Leningrad: Glavsevmorput Publishing, 1940: 124 p. [In Russian].

6. *Wiese V.Yu. Kolebaniia solnechnoi aktivnosti i ledovitosti poliarnykh morei. Doklady iubileinoi sessii Arkticheskogo instituta.* Oscillations of solar activity and ice cover of polar seas. Reports of the jubilee session of the Arctic Institute, Leningrad: Glavsevmorput Publishing, 1944: 7 p. [In Russian].

7. *Wiese V.Yu. Osnovy dolgosrochnykh ledovykh prognozov.* Fundamentals of long-term ice forecasts, Moscow: Glavsevmorput Publishing, 1944: 274 p. [In Russian].

8. *Lebedev A.A.* Large-scale anomalies of the ice cover of the North European Basin. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI. 1994, 432: 63–83. [In Russian].

9. *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].

10. *Lebedev A.A.* Features of the structure and regularities of the long-term variability of the ice cover of the North Atlantic seas. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta.* Proc. of AARI. 1985, 396: 122–133. [In Russian].

11. *Tregubova M.V., Prokofyev O.M., Mukhina A.V.* The long-term dynamics of the ice cover of the Greenland Sea in the context of current climate change. *Simvol nauki*. Symbol of Science. 2015, 5: 265–267. [In Russian].

12. *Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Denisov V.V., Zhichkin A.P., Moiseev D.V.* Taking into account the century-old climate dynamics of the Barents Sea when planning maritime activities. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriia «Okeanologiia»*. Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series "Oceanology". 2013, 1 (14): 56–71. [In Russian].

13. *Zhichkin A.P.* Dynamics of interannual and seasonal anomalies in the ice cover of the Barents and Kara seas. *Vestnik Kolskogo nauchnogo centra RAN*. Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015, 1 (20): 55–64. [In Russian].

14. *Krasheninnikova S.B., Krasheninnikova M.A.* Causes and features of the long-term variability of the ice cover of the Barents Sea. *Led i sneg.* Ice and Snow. 2019, 59, 1: 112–122. doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-112-122 [In Russian].

15. *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. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-127-134 [In Russian].

16. Unified system of information about the situation in the oceans. Available at: http://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php (accessed 13.06.2019).

17. *Thompson D.W.J., Wallace J.M.* The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. Geophysical Research Letters. 1998, 25, 9: 1297–1300. doi:10.1029/98GL00950.

18. *Janout M., AksenovY., Hölemann J., Rabe B., Schauer U., Polyakov I., Bacon S., Coward A., Karcher M., Lenn Y. D., Kassens H., Timokhov L.* Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations. Geophysical Research Letters. 2016, 43(1): 264–272. doi 10.1002/2015GL066565.

19. *Teoriia veroiatnostei i matematicheskaia statistika.* Theory of Probability and Mathematical Statistics. Available at: http://statistica.ru/theory/ (accessed 13.06.2019).

20. *Atlas Arktiki.* Atlas of the Arctic. Moscow: Central Directorate for Geodesy and Cartography, 1985: 204 p. [In Russian].

21. *Dese C., Teng H.* Evolution of the Arctic Sea ice concentration trends, 1979–2007. Geophysical Research Letters. 2008, 35. L02504, doi: 10.1029 / 2007GL032023.

22. *Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I.* Barents Sea multidecadal variability. Geophysical Research Letters. 2009, 36. L19604. doi:10.1029/2009GL039847.

23. *Sorteber. A., Kvingedal B.* Atmospheric for ice coverings. Journal of Climate, 2006. 19: 4772–4784.

24. *Zhang X., Sorteber A., Zhang J., Gerdes R., Comiso J.C.* Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system. Geophysical Research Letters. 2008, 35. L22701, doi: 10.1029 / 2008GL035607.

25. *Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitsky V.M. Nauchnye issledovaniia v Arktike. T. 2. Klimaticheskie izmeneniia ledianogo pokrova Evraziiskogo shel'fa.* Scientific research in the Arctic. V. 2. Climatic changes in the ice cover of the Eurasian shelf. St. Petersburg: Science, 2007: 135 p. [In Russian].

26. *Maksimov I.V. Geofizicheskie sily i vody okeana.* Geophysical forces and ocean waters. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970: 447 p. [In Russian].

27. *Sleptsov-Shevlevich B.A., Bayarinov A.M. Solnechnyi veter, vrashchenie Zemli i klimat.* Solar wind, Earth's rotation and climate. St. Petersburg, 2002: 159 p. [In Russian].

28. *Medvedev I.P., Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Lapshin V.B.* Chandler beats and polar tide in the North and Baltic seas. *Geliogeofizicheskie issledovaniia.* Heliogeophysical studies issue. 2018, 18: 9–17. [In Russian].