

Многолетние изменения ледовитости в районе архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа

© 2021 г. Б.С. Шапкин^{1*}, А.В. Рубченя¹, Б.В. Иванов^{2,1,3}, А.Д. Ревина^{2,3}, М.В. Богрянцев⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия; ²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия; ³Институт физики атмосферы РАН, Москва, Россия;

⁴Государственный университет морского и речного флота, Санкт-Петербург, Россия

*shap99boris@gmail.com

Long-term changes in ice coverage in the area of the Svalbard (Spitsbergen) and Franz Josef Land archipelagos

B.S. Shapkin^{1*}, A.V. Rubchenia¹, B.V. Ivanov^{2,1,3}, A.D. Revina^{2,3}, M.V. Bogryantsev⁴

¹Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; ²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia; ³Institute of Atmospheric Physic, Russian Academy of Science, Moscow, Russia; ⁴State University of Maritime and River Fleet, St. Petersburg, Russia

*shap99boris@gmail.com

Received April 13, 2020 / Revised October 14, 2020 / Accepted December 22, 2020

Keywords: *changes in ice coverage, variability, ice condition, ice extent, Franz Joseph Land, Spitsbergen.*

Summary

A comparative analysis of inter-annual changes in ice coverage and time scales of its variability in the waters surrounding the Svalbard and Franz Josef Land archipelagos has been performed. The analysis was carried out for the selected quasi-homogeneous regions. Open sources of information (satellite observations) collected by the Arctic and Antarctic Research Institute were used. Seasonal and inter-annual changes in ice coverage were studied over the period 1979–2019, since the uniform series of the satellite data were available for this period. The change of a relatively stable type of ice regime to a regime with a high level of inter-annual variability, which occurred in 2004–2006, was established. A significant negative trend in the change in ice coverage, characteristic of the waters surrounding both archipelagos, was revealed. Correlation and spectral analyses were used to estimate possible periods of cyclic fluctuations in ice coverage (taking into account the limited duration of the observation series), which amounted about 5–6 years. An efforts were made to establish possible relationships between the ice coverage fluctuations and the main atmospheric and oceanic indices. Essentially, no statistical connection with the main atmospheric indices (Arctic and North Atlantic Oscillations) was found, but the feedback with the Atlantic Multi-decadal Oscillation index had been established. The maximum correlation coefficients for Spitsbergen are observed in the winter season, while in the area of Franz-Joseph Land this takes place in summer, which may be attributed to the final velocity of the Atlantic Multidecadal Oscillation signal.

Citation: Shapkin B.S., Rubchenia A.V., Ivanov B.V., Revina A.D., Bogryantsev M.V. Long-term changes in ice coverage in the area of the Svalbard (Spitsbergen) and Franz Josef Land archipelagos. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2021. 61 (1): 128–136. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421010076.

Поступила 13 апреля 2020 г. / После доработки 14 октября 2020 г. / Принята к печати 22 декабря 2020 г.

Ключевые слова: *сезонные и межгодовые изменения ледовитости, изменчивость, архипелаги Земля Франца-Иосифа и Шпицберген.*

На основе спутниковых данных выполнен сравнительный анализ ледовых условий в водах, омывающих архипелаги Земля Франца-Иосифа и Шпицберген. Исследуются сезонная и многолетняя изменчивость ледовых условий, изменение ледовой обстановки, а также связь ледовых условий с основными океаническими и атмосферными индексами за 1979–2019 гг.

Введение

В последнее время внимание климатологов и исследователей льда приковано к сокращению площади распространения и толщины арктического ледяного покрова. Как известно, начиная с 1980–90-х годов происходит потепление климата, которое охватило не только приземную атмосферу, но и проявилось в изменении состоя-

ния морского ледяного покрова – составной части полярной климатической системы. Наиболее выраженные изменения климата наблюдаются в окраинных морях Арктики, в том числе в Северо-Европейском бассейне Северного Ледовитого океана [1, 2]. Один из основных индикаторов потепления в арктических широтах – сокращение ледовитости, которое наблюдается с конца 1980-х – начала 1990-х годов [3]. Под ледовито-

стью понимается «доля площади, занятой льдом любой сплочённости, по отношению к общей площади моря или какого-нибудь большого географического района; этот район может быть глобальным, включающим площадь морей целого полушария, или какой-либо частью океана или моря» [4]. Выражается ледовитость в соответствии с принятой международной практикой в процентах [4, 5]. С конца 1990-х годов отмечается ускорение сокращения площади морских льдов в Северном Ледовитом океане. Установлены последовательно рекордные минимумы летней площади морского ледяного покрова (2007, 2012, 2016, 2019 гг.) с абсолютным минимумом в сентябре 2012 г. В зимний период морские льды распространяются к югу на опреснённые акватории морей континентального шельфа [6]. Летом льды сохраняются в центральной части Арктического бассейна и частично в прилегающих районах арктических морей [7].

Спутниковые наблюдения – основа мониторинга ледяного покрова в Арктике. Они позволяют получать сведения о состоянии морского льда и изменении ледовых условий. Кроме того, они дают возможность оценивать произошедшие изменения и на основе полученной информации разрабатывать прогнозы различной степени заблаговременности и сценарии возможных будущих изменений. Возможности и ограничения методов дистанционного зондирования при мониторинге ледяного покрова зависят от используемого спектрального диапазона средств измерений, типа зондирования (активное или пассивное), а также от параметров съёмки и технических свойств аппаратуры [8].

Особенности распространения морского ледяного покрова в районе архипелага *Земля Франца-Иосифа* связаны с его географическим положением, а также с циркуляцией океана и атмосферы. Важнейшую роль в формировании ледовых условий к северу от архипелага играет вынос старых (многолетних, двухлетних, остаточных [4]) льдов из центральной части Арктического бассейна и однолетних льдов из северной части Карского моря (в результате Трансарктического дрейфа льда). Атлантические воды, проникающие в Баренцево море, оказывают заметное тепляющее влияние на районы к югу от архипелага [9]. Сезонные изменения в распространении морского ледяного покрова в целом схожи с ледовым режимом арктических морей Сибирского шельфа.

Одни из главных особенностей района архипелага *Земля Франца-Иосифа* – образование припая в проливах между островами и вдоль побережья, а также наличие заприпайных полыней [9].

Ледовые условия в водах, омывающих архипелаг *Шпицберген*, также определяются особенностями океанической и атмосферной циркуляции. Вдоль западного побережья архипелага (район пролива *Фрама*) отсутствие или минимальное количество дрейфующих льдов на протяжении практически всего года связано с тепляющим влиянием Западно-Шпицбергенского течения. На ледовитость северо-восточных и восточных районов архипелага главное воздействие оказывают многолетние льды, выносимые Восточно-Шпицбергенским течением, а также поступающие из центральных районов Арктического бассейна в пролив *Фрама* [10].

Наибольшая межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости в районе архипелагов *Шпицберген* и *Земля Франца-Иосифа* наблюдается с мая по октябрь. Максимальные колебания площади распространения ледяного покрова отмечаются в августе–сентябре. В эти месяцы площадь его распространения минимальна. Отметим, что в последние годы всё чаще наблюдается полное очищения ото льда района *Земли Франца-Иосифа* в августе–сентябре [9]. Авторами работ [9, 11] выполнено предварительное исследование сезонной и межгодовой изменчивости ледовитости в районе обоих архипелагов. Установлено, что с ноября по апрель в водах, омывающих *Шпицберген* [11], наблюдается максимальная изменчивость ледовых условий, тогда как в районе *Земли Франца-Иосифа* [9] эта изменчивость – наименьшая. В период с августа по сентябрь в районе *Шпицбергена* разница максимального и минимального значений ледовитости в два раза меньше, чем в районе *Земли Франца-Иосифа*. В то же время отмечены некоторые особенности, характерные для обоих районов. Например, очень близкий характер имеет временная структура межгодовых изменений ледовитости, что может указывать на общую внешнюю причину наблюдаемых процессов.

Задачи настоящей работы – изучить региональные особенности сезонных и межгодовых изменений ледовых условий в районе архипелагов *Земля Франца-Иосифа* и *Шпицберген*, а также провести сравнительный анализ изменений ледовых условий в этих смежных районах. Для реализации указанной цели сформулирован ряд задач:

1) выделить однородные районы в водах, омывающих архипелаги Земля Франца-Иосифа и Шпицберген, а также характерные сезоны изменения ледовитости;

2) определить особенности развития ледовитости для каждого района в выделенные сезоны;

3) провести сравнительный анализ структуры колебаний ледовитости в районе архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа.

Материалы и методы

Анализ особенностей межгодовых и сезонных изменений ледовитости выполнен на основе расчётной информации, полученной в Мировом центре данных по морскому льду Арктического и Антарктического научно-исследовательского института [12]. Источник информации для расчётов – матрицы оценок общей сплочённости Северной полярной области (севернее 45° с.ш.) с дискретностью 1–2 дня, полученные на основе обработанных по алгоритму NASATEAM данных многоканальных микроволновых радиометров SSMR-SSM/I-SSMIS Национального центра данных по снегу и льду США за период

с 26 октября 1978 г. по настоящее время. Пространственное разрешение анализируемых спутниковых данных – 25 × 25 км, что накладывает определённые ограничения на возможности их использования. В частности, это позволяет проводить исследования в региональном масштабе, но не даёт возможности анализировать морфометрические характеристики ледяного покрова.

Квазиоднородные районы выделяли на основе анализа значений повторяемости встречи со льдом в зимний (ноябрь–май) и летний (июнь–сентябрь) сезоны, а также в месяцы максимального (март) и минимального (сентябрь) развития ледяного покрова. Объективность выделения районов подтверждена анализом сезонных изменений ледовитости, показавшим значимые различия в сезонной динамике и абсолютных величинах ледовитости.

В данной работе акватория вокруг архипелага Земля Франца-Иосифа разделена на *три квазиоднородных района* (рис. 1). Первый район – восточный, на который значительно влияют льды, выносимые из Карского моря. Второй район – южный, подверженный воздействию атлантических вод, распространяющихся в северо-восточной части Баренцева моря. Третий район – северный, на-

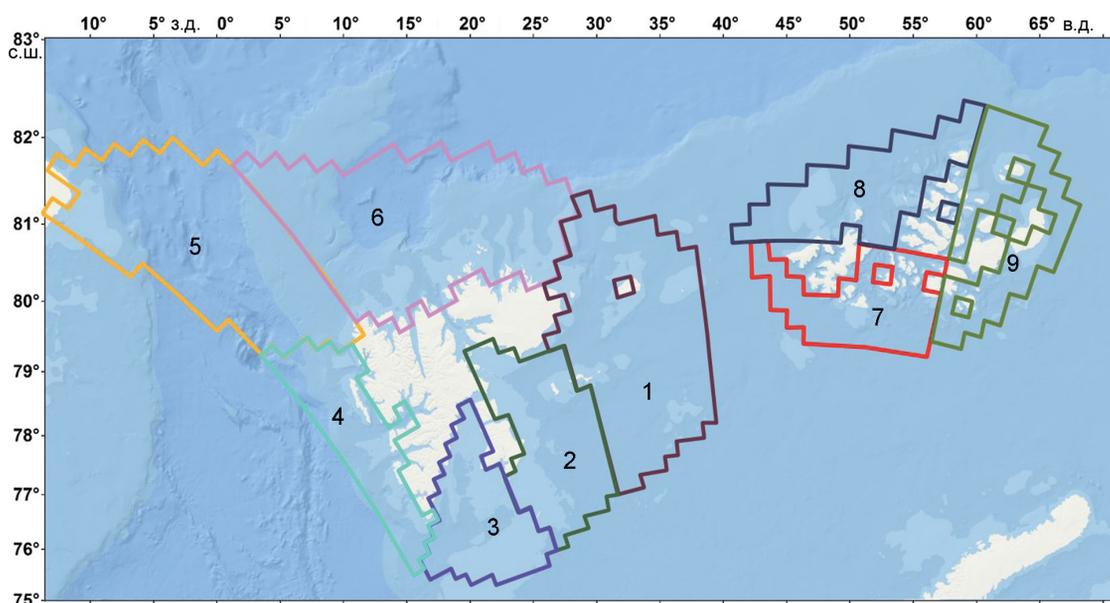


Рис. 1. Районирование акватории морей в районе архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа: районы Шпицбергена: 1 – восточный, 2 – баренцевоморский, 3 – южный, 4 – западный, 5 – пролив Фрама, 6 – северный; районы Земли Франца-Иосифа: 7 – южный, 8 – северный, 9 – восточный

Fig. 1. Areas around the Svalbard and Franz Josef Land:

Svalbard: 1 – Eastern, 2 – Barents Sea region, 3 – Southern, 4 – Western, 5 – Fram Strait, 6 – Northern; Franz Josef Land: 7 – Southern, 8 – Northern, 9 – Eastern

ходящийся под влиянием выноса старых льдов из центральной части Арктического бассейна. Результаты расчёта временных серий величин ледовитости по указанным трём районам непосредственно доступны на сервере Мирового центра данных по морскому льду в каталоге <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/>.

В работе [11] предложено разделить акватории вокруг архипелага Шпицберген на шесть районов, имеющих следующую общегеографическую специфику: 1 – Восточный Шпицберген, 2 – Баренцево-морский, 3 – Южный Шпицберген, 4 – Западный Шпицберген, 5 – пролив Фрама, 6 – Северный Шпицберген («Китовая бухта»). Аналогичное деление используется и в данной работе (см. рис. 1). Также мы будем придерживаться понятий зимнего (ноябрь–апрель) и летнего (май–октябрь) сезонов года, что соответствует наблюдаемым в Арктике природным условиям и используется в многочисленных работах российских исследователей [2, 5–9, 13–16]. Отметим, что включение мая и октября в летний сезон сделано авторами исключительно для данного района приатлантической Арктики

и не может использоваться для других акваторий Северного Ледовитого океана.

Полученные результаты

На рис. 2 представлены сезонные и многолетние изменения ледовитости в *южном* (номер 7), *северном* (номер 8) и *восточном* (номер 9) районах акватории Земли Франца-Иосифа. Отметим, что в последние годы произошло заметное сокращение ледовитости во всех трёх районах. С 2004 г. в сентябре южный район Земли Франца-Иосифа практически всегда свободен ото льда (исключение составляет 2014 г.), в то время как в северном и восточном районах подобная ситуация наблюдается крайне редко. В южном районе акватории архипелага Земли Франца-Иосифа наблюдается максимальная изменчивость сезонного хода ледовитости, что объясняется, по-видимому, воздействием атлантических вод. До 2006 г. ледяной покров в районе архипелага в зимний сезон занимал практически всю площадь выделенных

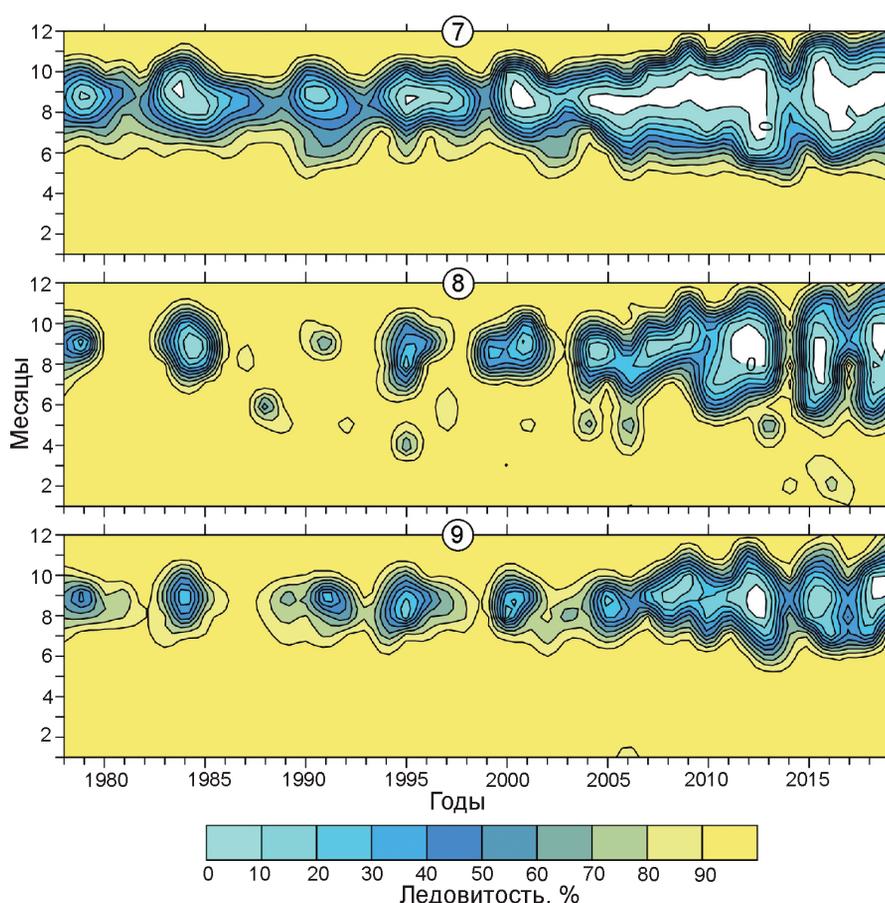


Рис. 2. Временное распределение среднемесячных значений ледовитости в южном (7), северном (8) и восточном (9) районах акватории архипелага Земли Франца-Иосифа (белым цветом отмечено отсутствие льда)

Fig. 2. Temporal distribution of mean month ice values the Southern (7), Northern (8) and Eastern (9) areas of the Franz Josef Land (white color indicates the absence of ice)

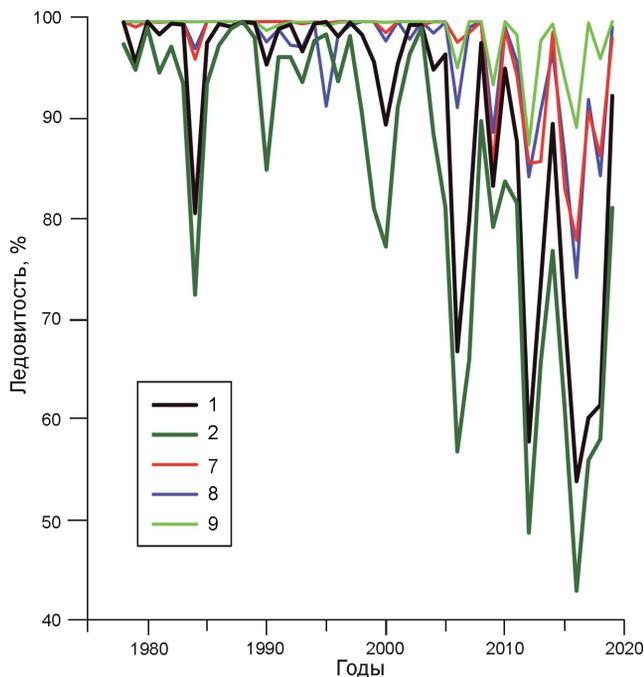


Рис. 3. Межгодовой ход изменений зимней ледовитости в районе восточного Шпицбергена (1) и баренцевоморском районе (2), а также в южном (7), северном (8) и восточном (9) районах архипелага Земли Франца-Иосифа в период с 1978 по 2019 г.

Fig. 3. Changes of winter ice extent in the in the region of Eastern Svalbard (1) and Barents Sea region (2) Svalbard, and Southern (7), Northern (8) and Eastern (9) areas of Franz Josef Land during 1978 to 2019

районов. Однако, как следует из рис. 3, с 2006 г. начались значительные межгодовые колебания ледовитости, что, по нашему мнению, может свидетельствовать о смене характера ледового режима на данной акватории.

Аналогичная ситуация зафиксирована в районах 1 и 2 к востоку от архипелага Шпицберген. Здесь также отмечаются значительные межгодовые колебания ледовитости, начиная с 2004–2006 гг. (см. рис. 3). В то же время в других районах Шпицбергена этого не наблюдается [11]. Возможная причина таких изменений в ледовом режиме – потепление атлантических вод. Так, в работе [13] отмечается, что потепление атлантических вод могло быть одной из причин, вызвавших соответствующие изменения климата в районе архипелага Шпицберген в 2006 г.

На рис. 4, а представлены графики межгодовых колебаний зимней ледовитости в районе архипелагов Шпицберген (среднее значение для районов 1, 2, 3, 6) и Земли Франца-Иосифа (среднее значение для районов 7–9), а на рис. 4, б – характер взаимосвязи этих процессов (линейная регрессия) для всего периода наблюдений. Районы 4 и 5 вблизи Шпицбергена исключены из сравнительного анализа, поскольку изменения ледовитости в них определяются иными внешними причинами по сравнению с внутренними районами

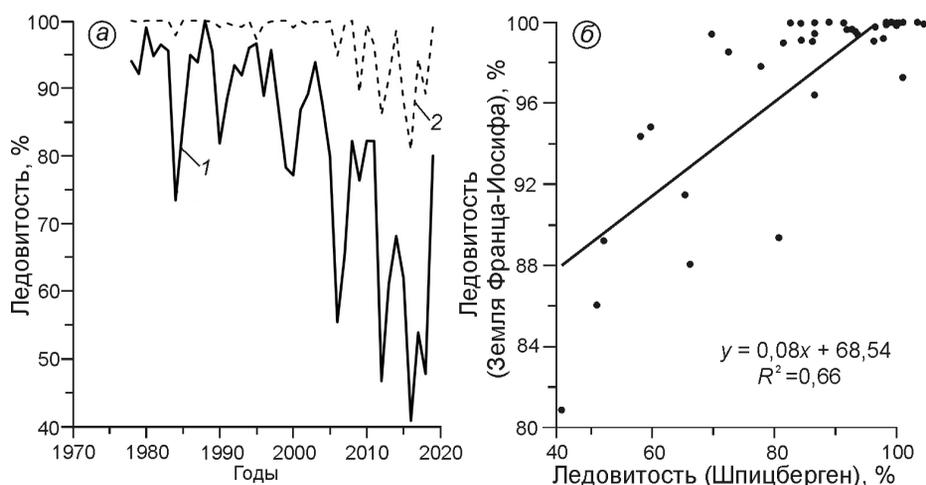


Рис. 4. Межгодовой ход изменений ледовитости (а) в районе архипелагов Шпицберген (среднее значение для районов 1, 2, 3, 6) и Земли Франца-Иосифа (среднее значение для районов 7–9) и взаимосвязь между этими величинами (б) в период с 1978 по 2019 г.:

1 – Шпицберген; 2 – Земля Франца-Иосифа

Fig. 4. Changes of ice extent in winter season (а) in the area of the Svalbard (average value for regions 1, 2, 3, 6) and Franz Josef Land (average value for regions 7–9) and the relationship between these quantities (б) from 1978 to 2019:

1 – Spitsbergen; 2 – Frantz Joseph Land

Баренцева моря. Из рис. 4 следует, что колебания ледовитости в зимний сезон происходят синхронно, что указывает, по нашему мнению, на общие внешние факторы, влияющие на данный процесс. Коэффициент корреляции, равный 0,81, позволяет предположить высокий уровень взаимосвязи между изменениями ледовитости в районе архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген, а сама линейная регрессия описывает более 65% общей дисперсии процесса. Аналогичный анализ проведён и для значений летней и среднегодовой ледовитости. В обоих случаях коэффициенты корреляции находятся в пределах 0,78–0,82.

В таблице приведены характерные периоды колебаний ледовитости в районе Шпицбергена и Земли Франца-Иосифа, полученные на основе расчёта автокорреляционных функций и функций спектральной плотности для каждого района и сезона года. В целом характерный период колебаний составляет около 5–6 лет. В зависимости от района и сезона выявленный период может незначительно изменяться (± 1 год). Исключение составляет район 5 архипелага Шпицберген, где зафиксированы колебания с периодом 6–8 лет.

Заметим, что анализ колебаний ледовитости для Северного Ледовитого океана в целом и отдельно для Баренцева моря проводили многие исследователи. Так, согласно работе [17], колебания с периодами менее 10 лет в основном обусловлены особенностями атмосферной циркуляции и взаимодействия океана и атмосферы. Авторы работы [14] отмечают зависимость таких колебаний ледовитости не только от долгопериодных процессов в океане и атмосфере, но и от астрофизических факторов, к которым могут относиться: 11-летний цикл солнечной активности; 6–7-летний цикл колебаний положения полюса вращения Земли; изменения в скорости вращения Земли. Значительный вклад в колебания ледовитости в Баренцевом море вносит и нутационная вариация ледовитости [18], которая возникает в результате наложения 14-месячной волны «полюсного прилива» на сезонные изменения циркуляции морских вод, причём период таких многолетних колебаний ледовитости может изменяться от 5 до 8 лет.

Полициклический характер колебаний ледовитости морей Сибирского шельфа отмечен также в ряде работ специалистов ААНИИ [15, 19]. Астрофизические причины указаны авторами как

Характерные временные масштабы (число лет) временной изменчивости ледовитости в районе архипелагов Шпицберген (районы 1–6) и Земли Франца-Иосифа (районы 7–9) в зимний и летний сезоны

Район	Зимний сезон (число лет)	Летний сезон (число лет)
1	4–5	5–6
2	4–5	5–6
3	6–7	5–6
4	6–7	5–6
5	7–8	6–7
6	6–7	6–7
7	3–4	5–6
8	3–4	5–6
9	3–4	5–6

наиболее важные для формирования долгопериодных (порядка 60 лет и более) колебаний ледовитости. Взаимодействия в системе «океан–морской лёд–атмосфера» ответственны в большей степени за колебания с периодами порядка 10 лет и менее. При этом для ледовитости морей Западной Арктики (Гренландское, Баренцево, Карское) статистически значимы колебания как с периодами 60, так и 5–7 лет. В работе [16] по виду автокорреляционных функций установлены характерные периоды межгодовых колебаний ледовитости для осенне-зимних (период 2–3 года) и весенне-летних сезонов (периоды 4–5 и 7–9 лет) в Баренцевом море. Близкая по характеру картина колебаний отмечена и в рамках наших исследований, причём в акватории архипелага Земля Франца-Иосифа эти процессы более выражены по сравнению с районом Шпицбергена.

Для оценки влияния крупномасштабных атмосферных и океанических процессов на ледовые условия в исследуемых районах были рассчитаны коэффициенты корреляции значений ледовитости и следующих глобальных индексов: индекса Арктического колебания (Arctic Oscillation – AO) [20]; индекса Североатлантического колебания (North Atlantic Oscillation – NAO) [21]; индекса Атлантического мультидекадного колебания (Atlantic Multidecadal Oscillation – AMO) [22]. Для работы были использованы среднемесячные значения ледовитости и сумма исходных среднемесячных значений AO, NAO и AMO за период с 1979 по 2019 г. К сожалению, ожидаемых значимых связей с индексами AO и NAO мы не обнаружили, несмотря на то, что ряд исследователей в своих работах ссылается на выявленные взаимосвязи между ледовы-

ми условиями в Баренцевом море и особенностями атмосферной циркуляции [23–27].

С индексом АМО ещё более сложная ситуация. Для района Шпицбергена обратную (отрицательную) связь мы обнаружили в зимний сезон. В то же время в районе Земли Франца-Иосифа аналогичная картина наблюдается летом. Поскольку индекс АМО характеризует тепловой режим поверхности воды в Северной Атлантике (аномалии температуры поверхности океана), можно предположить, что приток более тёплых поверхностных вод в акваторию Баренцева моря и в район исследуемых архипелагов вызывает уменьшение ледовитости в целом. Причины выявленной оппозиции пока недостаточно ясны, однако в ряде работ указывается на конечную скорость распространения этого сигнала из района Северной Атлантики [23–27] как возможную причину уменьшения ледовитости в различных районах в разные сезоны года. Предположительная причина выявленных нами квазициклических колебаний ледовитости с периодом 5–6 лет – короткопериодная составляющая АМО [28], имеющая именно такой период колебаний. Непосредственной физической причиной в этом случае могут быть короткопериодные изменения термической структуры Северо-Атлантического течения и влияние этих изменений на атмосферные процессы.

Выводы

На основе актуальной спутниковой информации, включая данные за 2019 г., получены оценки долгопериодных изменений ледовитости и временных масштабов её изменчивости в районах архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Полученные результаты, подтверждая общий отрицательный тренд ледовитости в Арктическом бассейне, тем не менее, указывают на сложный механизм взаимодействия между Северной Атлантикой и Западной Арктикой, обусловленный атмосферным и океаническим форсингом и в первую очередь, вероятно, короткопериодной составляющей Атлантического мультидекадного колебания. С конца 1990-х – начала 2000 годов происходит смена режима этого колебания, что соотносится со сменой ледового режима в исследуемом регионе, которая хорошо проявляется с середины 2000-х годов.

Приведём основные результаты выполненных исследований:

1) подтверждено наличие отрицательного тренда в изменении ледовитости в исследуемых районах за период спутниковых наблюдений (1979–2019 гг.), что соответствует наблюдаемой глобальной тенденции потепления климата;

2) выявлено заметное увеличение межгодовых колебаний ледовитости с 2004–2006 гг. в районе архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, указывающее на крупномасштабную смену ледового режима в Западной Арктике, что, вероятно, свидетельствует о перестройке атмосферной и океанической циркуляции;

3) установлены циклические колебания ледовитости с периодом порядка 5–6 лет, наблюдаемые в различные сезоны в районе архипелага Земля Франца-Иосифа, а также в районах к востоку и северу от архипелага Шпицберген, причиной которых, по нашему мнению, служат короткопериодные изменения в структуре Северо-Атлантического течения;

4) обнаружена обратная связь ледовитости с индексом Атлантического мультидекадного колебания, при которой максимальные значения коэффициентов корреляции для района Шпицбергена наблюдаются в зимний сезон, а для района Земли Франца-Иосифа – в летний, что можно объяснить конечной скоростью распространения сигнала Атлантического мультидекадного колебания.

Благодарности. Работа выполнена в соответствии с планом НИТР/ОПР Росгидромета (проект 24, раздел 5.1.4 «Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара «Ледовая база Мыс Баранова», Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген») при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования грант № 05.616.21.0109 (075-15-2019-1487) (RFMEFI61619X0109) и российско-норвежского «Соглашения в области анализа климатических данных и данных по морскому льду в северной части Баренцева моря» (2019–2020 гг.).

Acknowledgments. This work was carried out in accordance with the Roshydromet project «Monitoring of

the state and pollution of the environment, including the cryosphere, in the Arctic basin and in the areas of the research base «Ice Base Cape Baranova», Tiksi Hydrometeorological Observatory and the Russian Science Center at Svalbard Archipelago». This study

was supported by Ministry of Science and Higher education grant № 05.616.21.0109 (075-15-2019-1487) (RFMEFI61619X0109) and Russian-Norwegian «Agreement in area of analysis of climate and sea ice data in the North part of Barents Sea» (2019–2020).

Литература

References

1. Борзенкова И.И. История оледенения Арктического бассейна: взгляд из прошлого для оценки возможных изменений в будущем // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 2. С. 221–234. doi: 10.15356/20766734-2016-2-221-234.
2. Гудкович З.М., Захаров В.Ф., Аксенов Е.О., Позднышев С.П. Взаимосвязь современных климатических изменений в атмосфере, океане и ледяном покрове // Тр. ААНИИ. 1997. Т. 437. С. 7–17.
3. AMAP A. Climate Change Update 2019: An Update to Key Findings of Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017 // Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 2019. 12 с.
4. Крутских Б.А. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 56 с.
5. <http://wdc.aari.ru/wmo/nomen/volume1.html> – Номенклатура ВМО по морскому льду // ВМО/ОММ/ВМО. 2014. № 259. V. 1. Edition 1970–2014.
6. Захаров В.Ф. Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 213 с.
7. Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М., Кузьмина С.И., Иванов Н.Е. Изменения площади морских льдов северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 723–735. doi: 10.1134/S0001433809060012.
8. Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 28–41.
9. Жичкин А.П. Ледовые условия в районе архипелага Земля Франца-Иосифа // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2014. № 4. С. 82–89.
10. Иванов Б.В., Павлов А.К., Андреев О.М., Журавский Д.М., Священников П.Н. Исследования снежно-ледяного покрова залива Грён-фьорд (арх. Шпицберген): исторические данные, натурные исследования, моделирование // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 43–54.
11. Тисленко Д.И., Иванов Б.В., Смоляницкий В.М., Священников П.Н., Исаксен К., Гьетлен Н. Сезонные и многолетние изменения ледовитости в районе архипелага Шпицберген за период 1979–2015 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. Т. 3. № 109. С. 50–59.
12. Электронный ресурс: <http://wdc.aari.ru/datasets/> – Мировой центр данных по морскому льду ААНИИ.
13. Walczowski W., Piechura J., Goszczko I., & Wieczorek P. Changes in Atlantic water properties: an important factor in the European Arctic marine climate // ICES
1. Borzenkova I.I. History of the sea ice in the Arctic basin: lessons from the past for future. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (2): 221–234. doi: 10.15356/20766734-2016-2-221-234. [In Russian].
2. Gudkovich Z.M., Zaharov V.F., Aksenov E.O., Pozdnyshv S.P. Interrelation of modern climatic changes in the atmosphere, ocean and ice cover. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI. 1997, 437: 7–17. [In Russian].
3. AMAP A. Climate Change Update 2019: An Update to Key Findings of Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 2019: 12.
4. Krutskikh B.A. Mezhdunarodnaya simbolika dlya morskikh ledovykh kart i nomenklatura morskikh ldov. Symbols for Nautical Ice Charts and Sea Ice Nomenclature. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 56 p. [In Russian].
5. <http://wdc.aari.ru/wmo/nomen/volume1.html> – Номенклатура ВМО по морскому льду. WMO Sea-Ice Nomenclature Terminology // WMO/OMM/BMO, 2014, 259:1, Edition 1970–2014. [In Russian].
6. Zaharov V.F., Morskije ldy v klimaticheskoy sisteme. Sea ice in the climate system. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1996: 213 p. [In Russian].
7. Alekseev G., Danilov A.I., Kattsov V.M., Kuzmina S.I., Ivanov N.E. Changes in the climate and sea ice of the Northern Hemisphere in the 20th and 21st centuries from data of observations and modelling. *Izvestiya Ross. Akad. Nauk. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the RAS. Physics of Atmosphere and Ocean. 2009, 45 (6): 723–735. doi: 10.1134/S0001433809060012. [In Russian].
8. Shalina E.V., Bobylev L.P. Change of ice conditions in the Arctic according to satellite observations. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2017, 14 (6): 28–41. [In Russian].
9. Zhichkin A.P. Ice conditions in the Franz Josef Land region. *Trudy Kolskogo nauchnogo centra RAN*. Proc. of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. 2014, 4: 82–89 [In Russian].
10. Ivanov B.V., Pavlov A.K., Andreev O.M., Zhuravskii D.M., Svyashchennikov P.N. Investigation of snow and ice cover in Grönfjorden (Spitsbergen): historical data, in situ observations and modelling. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2012, 2 (92): 43–54. [In Russian].
11. Tislenko D.I., Ivanov B.V., Smolyanitsky V.M., Svyashchennikov P.N., Isaksen K., Herdis M. Seasonal and long-term changes of sea ice extent in the Svalbard archipelago area during 1979–2015. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2016, 3 (109): 50–59. [In Russian].
12. <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi> – AARI World Data Center for Sea Ice.
13. Walczowski W., Piechura J., Goszczko I., & Wieczorek P. Changes in Atlantic water properties: an important

- Journ. of Marine Science. 2012. V. 69. № 5. P. 864–869. doi: 10.1093/icesjms/fss068.
14. Тимохов Л.А., Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Юлин А.В. Климатические изменения сезонных и долгопериодных колебаний ледовитости Гренландского и Баренцева морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 2. С. 148–168. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168.
 15. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 149–160.
 16. Зубакин Г.К., Бузин И.В., Скутина Е.А. Сезонная и многолетняя изменчивость состояния ледяного покрова Баренцева моря // Ледяные образования морей Западной Арктики. 2006. С. 10–26.
 17. Гудкович З.М., Карклин В.П., Миронов Е.У., Иванов В.В., Лосев С.М., Дымент Л.Н., Смоляницкий В.М., Фролов С.В., Юлин А.В., Усольцева Е.А. Развитие ледовых и метеорологических условий в арктике в период 2007–2013 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 90–102
 18. Максимов И.В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 447 с.
 19. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovaliev E.G., Smolyanitsky V.M. Climate change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Springer-Praxis Books. ISBN 978-3-540-85874-4. 2009. P. 165.
 20. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml.
 21. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>.
 22. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>.
 23. Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в Баренцевом море и их предсказуемость // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 38–56.
 24. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 43–63.
 25. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 1. С. 106–123.
 26. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 381–390. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-381-390.
 27. Alekseev G., Kuzmina S., Bobilev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming // Intern. Journ. of Climatology. 2019. V. 39. № 8. P. 3582–3592. doi.org/10.1002/joc.6040.
 28. Электронный ресурс: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atlantic-multi-decadal-oscillation-amo>.
 - factor in the European Arctic marine climate. ICES Journ. of Marine Science. 2012, 69 (5): 864–869. doi:10.1093/icesjms/fss068.
 14. 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*. Problems of Arctic and Antarctic. 2019, 65 (2): 148–168. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168. [In Russian].
 15. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovaliev YE.G., Smolyanitsky V.M. Climatic changes of ice conditions in the arctic seas of the euroasian shelf. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2007, 75: 149–160. [In Russian].
 16. Zubakin G.K., Buzin I.V., Skutina E.A. Seasonal and long-term variability of the state of the ice cover of the Barents Sea. *Ledyanye obrazovaniya morey Zapadnoy Arktiki*. Ice formations of the Western Arctic seas. 2006: 10–26. [In Russian].
 17. Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Mironov E.U., Ivanov V.V., Losev S.M., Dymant L.N., Smolyanitskiy V.M., Frolov S.V., Yulin A.V., Usolceva E.A. Development of ice and weather conditions in the arctic during 2007–2013. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2013, 2 (96): 90–102. [In Russian].
 18. Maksimov I.V. *Geofizicheskie sily i vody okeana*. Geophysical forces and ocean waters. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970: 447 p. [In Russian].
 19. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin B.P., Kvalev E.G., Smolyanitsky V.M. Climate change in Eurasian Arctic Shelf Seas, Springer-Praxis Books. ISBN 978-3-540-85874-4, 2009: 165 p.
 20. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.
 21. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>.
 22. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>.
 23. Alekseev G.V., Glok N.I., Smirnov A.V., Vyazilova A.E. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2016, 8: 38–56. [In Russian].
 24. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Urazgildeeva A.V., Bobilev L.P. The influence of atmospheric transport of heat and moisture to enhance the warming in the Arctic in winter. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2016, 1: 43–63. [In Russian].
 25. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I. Influence of temperature anomalies of the ocean surface in low latitudes on the atmospheric heat transport to the Arctic. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2017, 1: 106–123. [In Russian].
 26. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V. Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 381–390. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-381-390.
 27. Alekseev G., Kuzmina S., Bobilev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. Intern. Journ. of Climatology. 2019, 39 (8): 3582–3592. doi.org/10.1002/joc.6040.
 28. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atlantic-multi-decadal-oscillation-amo>.