

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-118-132>
УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Характерные типы ледовых условий к северу от архипелага Шпицберген

А.В. Весман^{1}, Б.В. Иванов^{1,2}*

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

² — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

**anna.vesman@aari.ru*

Резюме

В данной статье рассматривается изменчивость ледовых условий к северу от архипелага Шпицберген. Большую часть года к северу от архипелага наблюдается устойчивая полынья, которую принято называть «Залив Китобоев». На основании данных о сплоченности льда с 1978 г. по настоящее время все многообразие ледовых условий было объединено в четыре основных типа. Тип 1 — район к северу от арх. Шпицберген покрыт льдом, тип 2 — кромка льда проходит к северу от архипелага, 3 — полынья «Залив Китобоев», 4 — промежуточный тип, когда образуется «проход» в Баренцево море между кромкой льда и северным побережьем архипелага. Была проанализирована повторяемость каждого из типов, выделены основные периодичности и тенденции, дана оценка изменению потока тепла, поступающего из океана в атмосферу в исследуемом регионе.

Ключевые слова: атлантические воды, архипелаг Шпицберген, «Залив Китобоев», изменения климата, морской лед.

Для цитирования: *Весман А.В., Иванов Б.В.* Характерные типы ледовых условий к северу от архипелага Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 118–132. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-118-132>.

Поступила 16.05.2022

После переработки 06.06.2022

Принята 20.06.2022

Types of sea ice conditions north of Spitzbergen archipelago

Anna V. Vesman^{1}, Boris V. Ivanov^{1,2}*

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

² — Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

**anna.vesman@aari.ru*

Summary

Sea ice is an important part of the Arctic climate system. In the recent decade, rapid changes in the sea ice conditions have been observed: sea ice extent and sea ice thickness are declining; conversely, ice drift speed and deformations are increasing [1–10]. The main aim of this paper was to describe the variability of sea ice conditions north of the Svalbard archipelago and analyze the changes occurring there. For most of the year, a stable polynya is observed north of the archipelago, which is commonly called “Whalers Bay”. The prevailing wind direction (8–9 months out of 12) is north-east, thus, almost throughout the whole year, conditions persist that support the flow of warmer Atlantic waters (AW) to the surface. Stable upwelling, together with the observed increase in AW’s temperature, contributes to the formation of the quasi-stationary polynya “Whalers Bay”. The ice conditions north of the Spitsbergen archipelago are changing extremely dynamically. However, all their diversity can be grouped into four main types. Type 1 — the area to the north of the archipelago is covered with ice; type 2 — the ice edge moves to the north of the archipelago; 3 — “Whalers Bay” polynya; 4 — an intermediate type, when a “passage” is formed to the Barents Sea between the ice edge and the northern coast of the archipelago. This study showed that since the mid-1990s the frequency of type 1 has significantly decreased, conversely, type 3 has become predominant, and the frequency of occurrence of type 2 has also increased. The maximum area of the polynya was observed in February 2012 and 2014, when the ice edge reached 82,5°N and 50°E, and 83°N and 46°E respectively. The lightest ice conditions were observed in 2012, 2013 and 2016. The main periods of 2–3, 5–6 and 14 years were identified in open water area variability. The ice cover to the north of the archipelago is largely presented by the conditions similar to the marginal ice zone with an actively changing ice edge configuration and the combined influence of factors characteristic of open sea areas and ice-covered areas. It is here that intense heat exchange takes place between the ocean and the atmosphere. The heat fluxes directed from the ocean to the atmosphere in the area of the polynya have increased by about 4 TW over the past 40 years. The highest correlation between the heat flux and the area of open water is observed with a lag of 2 months.

Keywords: Atlantic waters, climate change, ice edge, sea ice cover, Spitsbergen, Whalers Bay.

For Citation: Vesman A.V., Ivanov B.V. Types of sea ice conditions north of Spitzbergen archipelago. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 118–132. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-118-132>.

Received 16.05.2022

Revised 06.06.2022

Accepted 20.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

Морской лед — это важная часть меняющейся арктической климатической системы. Наблюдаемое сокращение площади морского ледяного покрова является одним из наиболее ярких проявлений современного изменения климата [1–3]. Сокращается не только площадь морского льда, но и его толщина [4–8]. Существенно сокращается площадь многолетнего морского льда [9–11]. При этом продолжительность периода его таяния увеличивается [12], возрастает скорость дрейфа льда и интенсивность его деформации (торошения) [13]. Отмечается важный вклад повышения температуры атлантических вод (АВ) в сокращение площади морского ледяного покрова [14–16]. Сокращение наблюдается во все сезоны, но наиболее выражены эти потери в летний период в конце сезона таяния [5, 17]. Несмотря на то, что изменению площади льда в Арктике уделяется большое внимание и, особенно в последние годы, опубликован ряд статей, в которых рассматривается изменение ледяного покрова в зимний период или среднегодовые условия [11, 18–21], чаще всего исследования фокусируются на сокращении площади летнего ледяного покрова [22]. В то же время закономерности и особенности изменений и изменчивости характеристик ледяного покрова в зависимости от сезона или региона исследования остаются слабо изученными [22]. Понимание и корректное описание указанных

процессов в различных районах Арктики может быть использовано для улучшения климатических прогнозов для средних и высоких широт Северного полушария [23]. Известно, что различные регионы Арктики вносят неравный вклад в формирование аномалий крупномасштабной циркуляции атмосферы [24]. Таким образом, особенности региональных и сезонных характеристик ледяного покрова в Арктике требуют внимательного изучения.

Поскольку воды, омывающие архипелаг Шпицберген, частично находятся под воздействием теплых АВ, часть времени они остается свободными ото льда. Только на севере и востоке от архипелага Шпицберген большую часть года наблюдается морской ледяной покров. В данном исследовании основное внимание мы уделяем району к северу от архипелага Шпицберген, который известен под названием «Залив Китобоев». В данный район поступают наиболее теплые АВ, по сравнению с другими внутренними районами Арктического бассейна (АБ), и здесь наблюдается максимальная интенсивность энергомассообмена океана с атмосферой. Ряд исследований [18, 25–27] оценивают поток тепла из океана в атмосферу в зимний период в среднем в 200–500 Вт/м² и утверждают, что перемешивание между АВ и более холодными поверхностными водами обеспечивает достаточно тепла, чтобы поддерживать «Залив Китобоев» свободным ото льда [28].

«Залив Китобоев» — это устойчивая полынья, существование которой наблюдается круглый год. Международная номенклатура по морским льдам определила полынью как устойчивое пространство чистой воды среди или на границе неподвижных льдов [29]. Иногда полыньи с одной стороны ограничиваются берегом и тогда носят название прибрежных. «Залив Китобоев» принято называть шельфовой прибрежной полыньей, хотя он и не «закрыт» льдом со всех сторон. По механизму образования и последующей динамики полыньи традиционно разделяются на два класса: полыньи «явного» и «скрытого» тепла [30]. Полыньи явного тепла обусловлены термическим воздействием. Они появляются в результате поступления к поверхности океанического тепла достаточного, чтобы растопить ранее образовавшийся лед и минимизировать его дальнейшее образование в зоне возникшей полыньи. Таким образом, в районе полыней явного типа образуется мало льда, а площадь самой полыньи зависит от интенсивности и продолжительности поступления к поверхности теплых вод. Полыньи скрытого типа образуются механически в областях, где наблюдается дивергенция дрейфа льда из-за преобладающих ветров или океанических течений. Такие полыньи являются районами постоянного ледообразования [30]. «Залив Китобоев» подвержен совместному влиянию обоих описанных выше процессов. При преобладании южных и юго-восточных ветров лед относится от берега, образуя полынью, при этом тепло АВ приводит к таянию льда и предотвращению его дальнейшего образования. Активная теплоотдача из океана в атмосферу к северу от архипелага Шпицберген обуславливает трансформацию АВ в промежуточные арктические воды (ПАВ) [25]. Размер полыньи влияет на температуру атмосферы в приземном и пограничном слоях даже на расстоянии до 200 км к югу от полыньи и на эволюцию конвективного атмосферного пограничного слоя во время вторжений холодного воздуха из Центральной Арктики [31]. Основными задачами данной статьи было рассмотреть характеристики ледяного покрова к северу от архипелага Шпицберген, выделить и описать его основные закономерности и особенности, а также оценить факторы, которые могут оказывать влияние на формирования ледовых условий.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Непрерывный мониторинг морского ледяного покрова на ежедневной основе начался с запуска спутника SeaSat в июне 1978 г. и в октябре того же года спутника Nimbus 7. Оба имеют на борту радиометр SMMR (сканирующий многоканальный микроволновый радиометр) производства США. Это был первый спутниковый много-частотный микроволновый радиометр с двойной поляризацией. Он особенно хорошо подходил для мониторинга состояния и динамики морского льда. Этот радиометр до сих пор обеспечивает непрерывные наблюдения за морским льдом начиная с 1978 г.

Прикладной комплекс для спутникового мониторинга океана и морского льда (OSI SAF) — это часть Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников (EUMETSAT) для производства оперативной спутниковой продукции. Ледовые продукты OSI SAF в высоких широтах производятся совместно Норвежским метеорологическим институтом и Датским метеорологическим институтом. В данной статье используется объединенный ряд данных радиометров SMMR, SSM/I (специальный микроволновый датчик/имиджер) и SSMIS (специальный микроволновый датчик эхолот-имиджер) о сплоченности льда в Арктике с 1998 г. по настоящее время, с пространственным разрешением 25×25 км и временным разрешением — 1 месяц [32].

Площадь открытой воды рассчитывалась как сумма ячеек сетки, удовлетворяющих условию: сплоченность льда составляет менее 15 %. Параметр 15 % выбран, так как из-за относительно низкого разрешения датчиков ни один алгоритм на данный момент не может с достаточной точностью различить лед, если его сплоченность ниже данного значения [33, 34]. Площадь открытой воды рассчитывалась в пределах зоны, очерченной параллелями 79° и $82,5^\circ$ с. ш. и меридианами 5° и 40° в. д. (рис. 1).

Ледовые условия к северу от архипелага Шпицберген меняются крайне динамично. Однако все их многообразие можно объединить в четыре основных типа. Тип 1 — район к северу от арх. Шпицберген покрыт льдом, тип 2 — существование полыньи «Залив Китобоев», 3 — кромка льда проходит к северу от архипелага, 4 — промежуточный тип, когда образуется «проход» в Баренцево море между кромкой льда и северным побережьем архипелага (рис. 2).

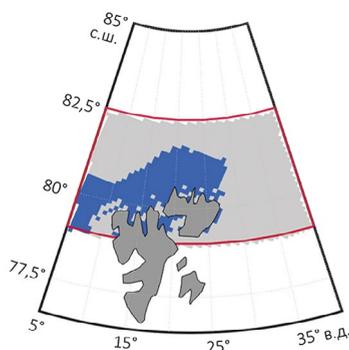


Рис. 1. Пример схемы расчета площади открытой воды к северу от архипелага Шпицберген. Серый цвет — лед сплоченностью более 15 %, синий — сплоченность менее 15 %, красная граница — зона расчета

Fig. 1. An example of a scheme for calculating the area of open water north of the Svalbard archipelago. Gray color — ice with concentration greater than 15 %, blue — ice concentration less than 15 %, red border — calculation zone

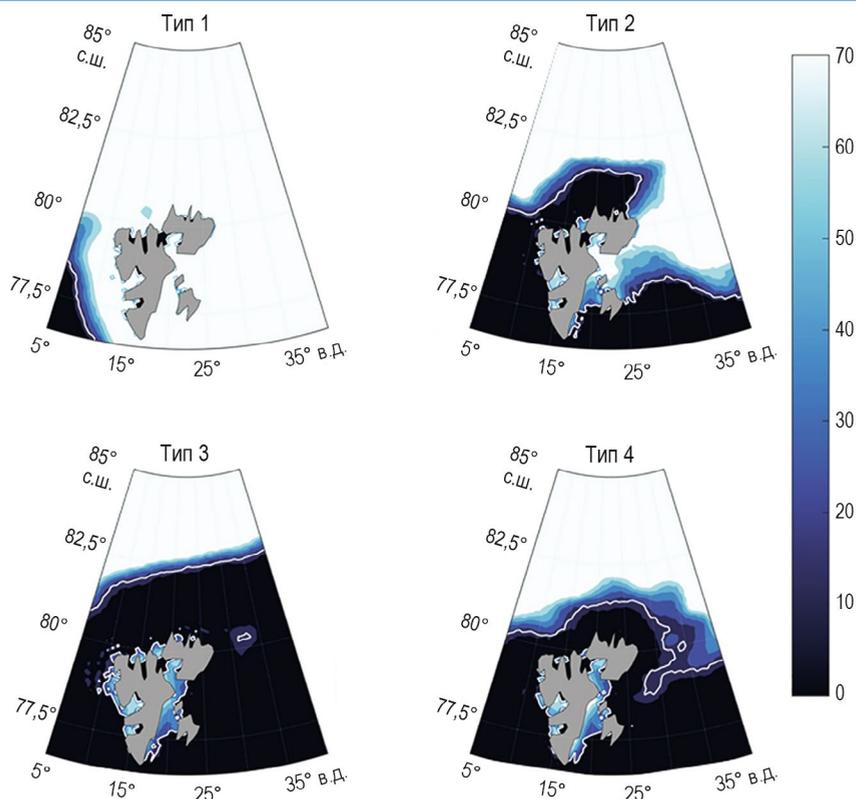


Рис. 2. Иллюстрации типичных ситуаций распространения морского ледяного покрова к северу от архипелага Шпицберген, цветовая шкала — сплоченность льда, %

Fig. 2. Illustrations of typical sea ice conditions north of the Svalbard archipelago, color scale — ice concentration, %

Разделение ледовых ситуаций по типам происходило в два этапа:

1. Кромка льда, соответствующая границе — сплоченность льда $> 15\%$, аппроксимировалась кривой второго порядка. В зависимости от формы полученной параболы (пересекала или нет полученная линия берег) и других вспомогательных параметров (коэффициентов, описывающих кривизну) ситуация автоматически относилась к одному из типов.

2. Результаты, полученные автоматически, просматривались визуально, если тип не соответствовал наблюдаемой картине, решение принималось на основе визуального анализа.

Для сравнения типа ледовых условий с приземной температурой воздуха (ПТВ) использованы сведения о среднемесячных значениях ПТВ на архипелаге Шпицберген, представляющие собой осредненные данные норвежских и российских метеорологических станций [35–40].

Также для совместного анализа использовались данные реанализа ERA5 о потоках тепла на границе океан — атмосфера [42]. При совместном анализе атмосферных, океанических и ледовых параметров использовались ряды данных, полученные только для периода регулярных спутниковых наблюдений [32].

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ К СЕВЕРУ ОТ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

На рис. 3 представлен график повторяемости типов ледовых условий. В начале ряда наиболее часто встречается тип 1 (кромка льда доходит до побережья архипелага). С 1997 г. можно отметить перестройку системы, когда преобладающим типом становится тип 2 (образуется полынья «Залив Китобоев»). Повторяемость этого типа растет со временем с некоторым снижением в последние 7 лет, в то время как повторяемость типа 1 существенно снижается с конца 80-х — начала 90-х. Середина 90-х также является переломным моментом, начиная с которого тип 3 (побережье свободно ото льда) начинает появляться регулярно. Повторяемость и продолжительность этого типа также растут. Тип 4 (переходный) наблюдается только в отдельные годы (1990, 1992, 2002, 2006, 2010, 2013, 2016–2018).

Если рассмотреть сезонный ход типов ледовых условий, то можно выделить следующие закономерности: наиболее часто воды к северу от архипелага покрыты льдом с марта по июнь и реже всего в сентябре (рис. 4). До 2007 г. данный тип наблюдается в «зимний» период с января по апрель, но с 2007 г. он чаще всего наблюдается в календарную весну в апреле–мае, иногда захватывая летние месяцы. В свою очередь, акватория обычно очищается ото льда в августе–октябре. В начале ряда наблюдений кромка льда не пересекает 82° с. ш., но со временем сдвигается дальше на север. Обычно кромка расположена южнее у западного побережья архипелага и севернее у восточного. В 2012 г. она уже пересекает 83° с. ш., а в сентябре 2013 г. достигает 84° с. ш. Полынья наблюдается вне зависимости от сезона, с максимумами повторяемости в декабре и январе. Максимальная площадь полыньи наблюдается в феврале 2012 и 2014 гг., когда кромка льда достигает $82,5^{\circ}$ с. ш. и 50° в. д. и 83° с. ш. и 46° в. д. соответственно. Переходный тип проявляется чаще всего в осенне-зимний период (в начале периода замерзания) с сентября по январь (рис. 4).

Площадь открытой воды к северу от архипелага Шпицберген обладает сильной внутригодовой изменчивостью. Наблюдается ярко выраженный положительный тренд (с 1978 по 2018 г.). Максимально легкие ледовые условия (максимальная площадь открытой воды) наблюдаются в 2012, 2013 и 2016 гг. Наиболее тяжелые ледовые условия наблюдаются в апреле, когда в среднем менее 20 % площади ре-

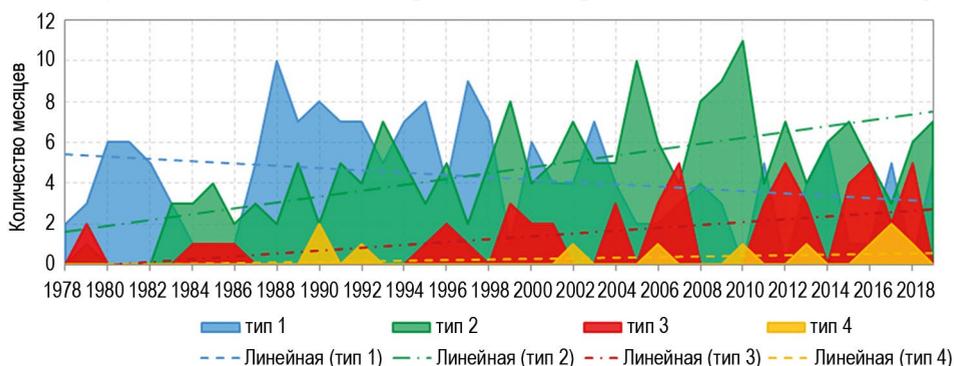


Рис. 3. Повторяемость типов положения ледяной кромки к северу от архипелага Шпицберген и тенденции повторяемости каждого из типов

Fig. 3. Recurrence of types of ice edge position north of the Svalbard archipelago and the recurrence tendencies for each type

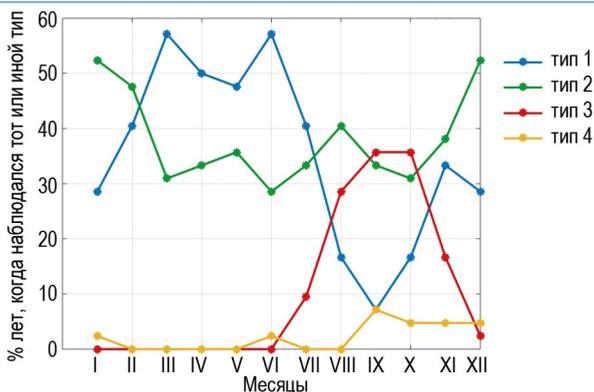


Рис. 4. Сезонный ход повторяемости типов ледяной кромки

Fig. 4. Seasonal changes of the recurrence of ice edge types

гиона свободны ото льда. Наиболее легкие условия наблюдаются в сентябре, когда в среднем 50 % площади очищается ото льда, в некоторые годы это значение превышает 90 % (рис. 5). В работе [42] отмечают, что сплоченность льда влияет на развитие апвеллинга АВ вдоль северного склона архипелага. При этом чем больше

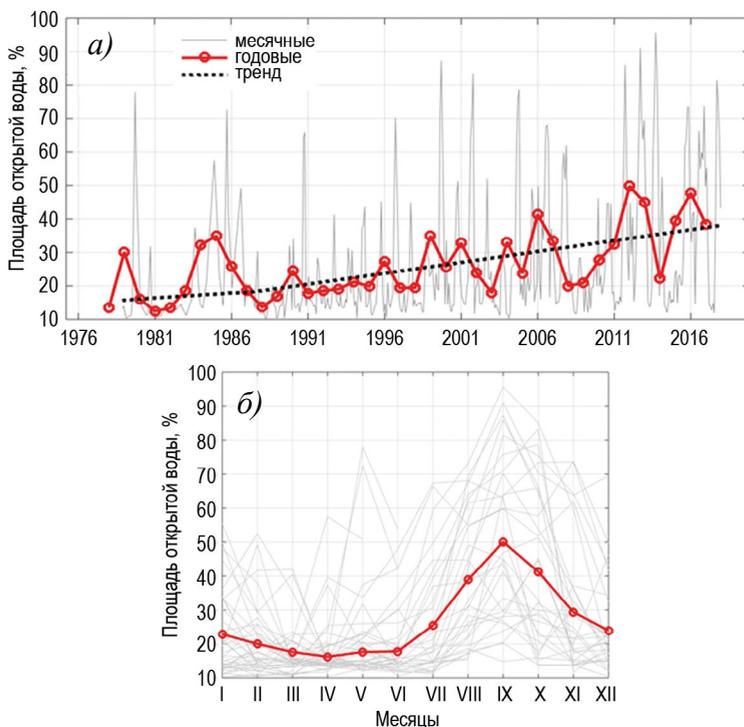


Рис. 5. Межгодовая изменчивость площади открытой воды (а), в процентах (%) от площади исследуемого района, сезонная изменчивость площади открытой воды (б), в % от площади исследуемого района

Fig. 5. Interannual variability of open water area (a), as a percentage (%) of the study area, seasonal variability of open water area, in % of the study area (b)

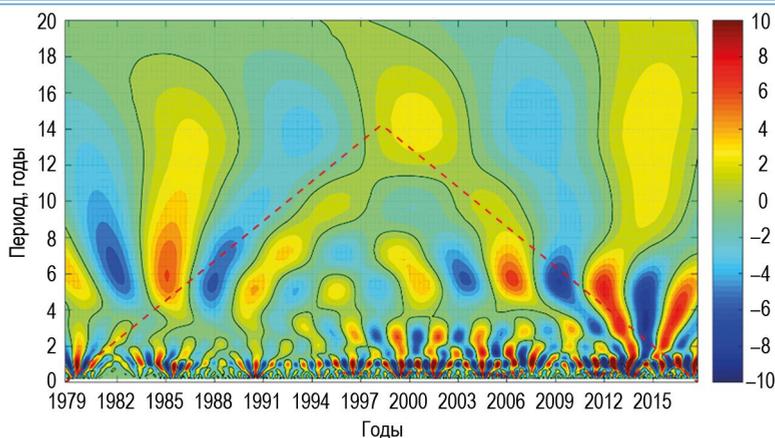


Рис. 6. Вейвлет-диаграмма, построенная для изменчивости площади открытой воды

Fig. 6. Wavelet diagram constructed for open water area variability

уменьшается площадь морского льда, тем интенсивнее будет развиваться апвеллинг. Это, в свою очередь, способствует поднятию на поверхность вод, богатых питательными веществами, что приводит к увеличению продуктивности поверхностных вод и привлечению новых видов организмов, характерных для более южных широт [42].

Помимо преобладающей тенденции к увеличению площади открытой воды к северу от архипелага Шпицберген (с 1978 по 2019 г. наблюдается положительный тренд $\sim 25\%$), можно выделить характерные колебания площади открытой воды с периодами, равными 2–3 и 5–6 годам (рис. 6), амплитуда которых увеличивается к концу ряда. Схожие периоды были выделены в работе [43] при анализе ледовитости Северо-Европейского бассейна (СЕБ). Также стоит отметить долгопериодную изменчивость, составляющую примерно 14 лет.

Временная изменчивость сплоченности льда к северу от архипелага Шпицберген имеет высокую связь с аналогичной изменчивостью ПТВ (коэффициент корреляции 0,72). Однако, анализируя данные о ПТВ, нельзя забывать о положительной обратной связи. В первом приближении повышение ПТВ ведет к сокращению площади льда, а соответствующее увеличение площади свободной ото льда водной поверхности способствует последующему увеличению ПТВ за счет теплоотдачи от океана в атмосферу. Таким образом, из-за очевидной взаимозависимости ПТВ не рассматривалась как основной воздействующий фактор. Пики, выделенные по результатам вейвлет-анализа, хорошо соответствуют периодичностям, выделенным по данным о температуре АВ в ядре Западно-Шпицбергенского течения [44]. В изменчивости температуры АВ и площади открытой воды наблюдается заметная степень согласованности (рис. 7), однако коэффициент корреляции остается невысоким и составляет 0,47. При этом его максимальные значения наблюдаются на временном сдвиге, равном 1 месяцу (появление максимальных площадей открытой воды запаздывает относительно наблюдаемых максимумов температуры АВ). В среднем это соответствует скорости распространения АВ, при учете, что данные о температуре АВ получены на $78,8^\circ$ с. ш.

Помимо выявленных особенностей, важную роль в формировании полыньи играет направление приземного ветра. В первом приближении в воздействии ветра можно выделить два основных механизма. Первым механизмом является непосред-

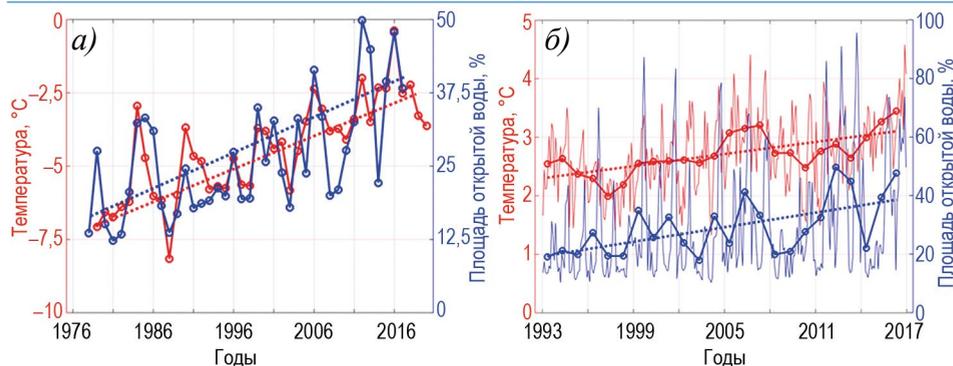


Рис. 7. Изменчивость площади открытой воды, температуры воздуха и температуры АВ: а) изменчивость среднегодовых значений температуры воздуха и площади открытой воды; б) среднемесячные и среднегодовые значения температуры АВ и площади открытой воды

Fig. 7. Variability of the open water area, air temperature and AW temperature: а) variability of mean annual air temperature and open water area; б) average monthly and average annual values of AW temperature and area of open water

ственный дрейф льда под воздействием ветра — ветра северных румбов способствуют выносу льда из АВ и приводят к «закрытию» полыни, в то время как ветра южных румбов приводят к смещению кромки льда в северном направлении. Вторым механизмом является преобладание ветров, способствующих образованию апвеллинга. В случае с северным побережьем архипелага Шпицберген было отмечено, что таким преобладающим направлением является северо-восточное, обеспечивающее практически на протяжении всего года условия, при которых поддерживается поступление более теплых АВ к поверхности. Практически постоянный апвеллинг, вместе с увеличением температуры АВ, способствуют поддержанию «Залива Китобоев» свободным ото льда. Помимо прямой взаимосвязи между ПТВ и площадью открытой воды/сплоченностью льда к северу от архипелага, при которой увеличение ПТВ способствует сокращению площади льда, наблюдается сильная обратная связь — с увеличением площади полыни и продолжительности ее существования

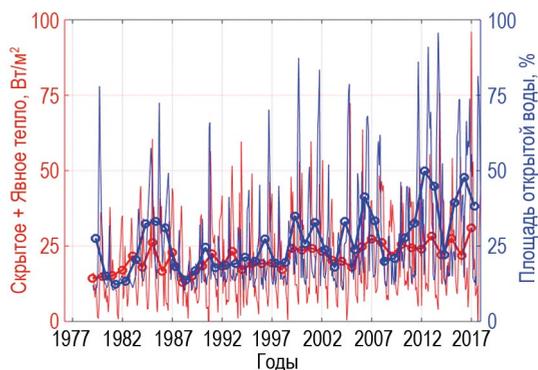


Рис. 8. Изменчивость величин потоков тепла из океана в атмосферу и площадей открытой воды (тонкие линии — среднемесячные данные, толстые — среднегодовые)

Fig. 8. Variability of the ocean-atmosphere heat flux and open water area (thin lines are monthly average data, thick lines are annual averages)

увеличивается суммарный поток тепла, направленный из океана в атмосферу, что способствует повышению ПТВ в регионе. В работе [22] отмечается, что значительное количество тепла, переносимое АВ, достигает поверхности океана. Таким образом, наблюдаемое в последние десятилетия увеличение температуры АВ [44] еще больше усиливает теплоотдачу из океана в атмосферу. С помощью реанализа ERA5 были рассчитаны величины межгодовой изменчивости потока тепла, направленного из океана в атмосферу в районе полыньи «Залив Китобоев». В полученных данных выделяется положительный тренд (4 ТВт за последние 40 лет). Максимальная корреляция (0,52) наблюдается на временном сдвиге в 2 месяца, при этом максимальные значения потоков тепла запаздывают относительно максимальных площадей открытой воды, что происходит вследствие постепенного увеличения градиента между температурой поверхности океана (растет за счет поступления теплых АВ на поверхность) и ПТВ. При годовом осреднении корреляция возрастает до 0,6. Изменчивость потоков тепла и площадей открытой воды представлена на рис. 8.

ВЫВОДЫ

– Середина 1990-х гг. является переломным моментом, когда повторяемость появления типа 1 (акватория к северу от Шпицбергена покрыта льдом) существенно снижается, а преобладающим становится тип 3 — «существование квазистационарной полыньи», а также растет повторяемость появления типа 2 — «побережье свободно ото льда».

– Переходный четвертый тип наблюдался только в отдельные годы: 1990, 1992, 2002, 2006, 2010, 2013, 2016–2018, чаще всего в осенне-зимний период (в начале периода замерзания) с сентября по январь.

– Изменчивость площади открытой воды характеризуется периодами колебаний равными 2–3, 5–6 и 14 годам.

– Потоки тепла, направленные из океана в атмосферу в районе полыньи «Залив Китобоев», увеличились примерно на 4 ТВт за последние 40 лет. Наибольшая взаимосвязь между потоком тепла и площадью открытой воды наблюдается на сдвиге в 2 месяца.

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках раздела 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» (проект 5.1 НИТР Росгидромета).

Competing interests. The authors have no conflicts of interests.

Funding. The work was carried out within the framework of section 5.1.4 “Monitoring of the state and pollution of the natural environment, including the cryosphere, in the Arctic basin and areas of the research station “Ice Base Cape Baranov”, the Tiksi Hydrometeorological Observatory and the Russian Scientific Center on the Svalbard Archipelago” (project 5.1 NITR Roshydromet).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // Global and planetary change. 2011. V. 77. № 1–2. С. 85–96.

2. *Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanitsky V.M., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V.* Arctic sea ice cover in connection with climate change // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. T. 51. № 9. С. 889–902.
3. *Тисленко Д.И., Иванов Б.В., Смоляницкий В.М., Священников П.Н., Весман А.В., Isaksen K., Gjeltén H.* Сезонные и многолетние изменения ледовитости в районе архипелага Шпицберген // Современное состояние природной среды архипелага Шпицберген: Коллективная монография, под общей редакцией д. г. н. Саватюгина Л.М. СПб.: ААНИИ, 2020. С. 95–103.
4. *Kwok R., Rothrock D.A.* Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // *Geophysical Research Letters*. 2009. V. 36. L15501. doi:10.1029/2009GL039035.
5. *Cavalieri D.J., Parkinson C.L.* Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *The Cryosphere*. 2012. V. 6. № 4. P. 881–889.
6. *Vinje T.* Anomalies and trends of sea-ice extent and atmospheric circulation in the Nordic Seas during the period 1864–1998 // *Journal of Climate*. 2001. V. 14. № 3. P. 255–267.
7. *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 // *Лед и Снег*. 2017. Т. 57. № 3. С. 381–390.
8. *Иванов Б.В.* Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 64. С. 407–434.
9. *Maslanik J.A., Fowler C., Stroeve J., Drobot S., Zwally J., Yi D., Emery W.* A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. L24501. doi: 10.1029/2007GL032043.
10. *Nghiem S.V., Rigor I.G., Perovich D.K., Clemente-Colón P., Weatherly J.W., Neumann G.* Rapid reduction of Arctic perennial sea ice // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. L19504. doi: 10.1029/2007GL031138.
11. *Юлин А.В., Вязигина Н.А., Егорова Е.С.* Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // *Российская Арктика*. 2019. № 7. С. 28–40.
12. *Stroeve J.C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A.* Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss // *Geophysical Research Letters*. 2014. V. 41. P. 1216–1225.
13. *Rampal P., Weiss J., Marsan D.* Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979–2007 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009. V. 114. C05013. doi: 10.1029/2008JC005066.
14. *Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundford A., Morison J., Rember R., Yulin A.* Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // *Science*. 2017. V. 356 (6335). P. 285–291. doi: 10.1126/science.aai8204.
15. *Аксенов П.В., Иванов Б.В.* «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018. Т. 64. № 1. С. 42–54.
16. *Selyuzhenok V., Bashmachnikov I., Ricker R., Vesman A., Bobylev L.* Sea ice volume variability and water temperature in the Greenland Sea // *The Cryosphere*. 2020. V. 14. № 2. P. 477–495.
17. *Serreze M. C., Holland M. M., Stroeve J.* Perspectives on the Arctic’s shrinking sea-ice cover // *Science*. 2007. V. 315. № 5818. P. 1533–1536.
18. *Иванов Б.В., Тимачев В.Ф., Священников П.Н., Макитас А.П., Бедненко В.М., Павлов А.К.* Энергомассообмен между океаном и атмосферой в районе зимней полыньи к северу от архипелага Шпицберген // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2013. Т. 2. № 96. С. 111–117.
19. *Тисленко Д.И., Иванов Б.В.* Долгопериодная изменчивость температуры атлантических вод во фьордах острова Западный Шпицберген в период первого (1920–1940 гг.) и современного потепления в Арктике // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. Т. 2. № 104. С. 93–100.

20. Шапкин Б.С., Рубченя А.В., Иванов Б.В., Ревина А.Д., Багрянцев М.В. Многолетние изменения ледовитости в районе архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа // Лед и Снег. 2021. Т. 61. № 1. С. 128–136.
21. Егоров А.Г. Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 124–143.
22. Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss // Journal of Climate. 2018. V. 31. № 12. P. 4917–4932.
23. Koenigk T., Caian M., Nikulin G., Schimanke S. Regional Arctic sea ice variations as predictor for winter climate conditions // Climate Dynamics. 2016. V. 46. № 1–2. P. 317–337.
24. Screen J.A. Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss // Journal of Climate. 2017. V. 30. № 11. P. 3945–3962.
25. Aagaard K., Foldvik A., Hillman S.R. The West Spitsbergen Current: disposition and water mass transformation // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1987. V. 92. № C4. P. 3778–3784.
26. Saloranta T.M., Haugan P.M. Northward cooling and freshening of the warm core of the West Spitsbergen Current // Polar Research. 2004. V. 23. № 1. P. 79–88.
27. Cokelet E.D., Tervalon N., Bellingham J.G. Hydrography of the West Spitsbergen current, Svalbard branch: autumn 2001 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2008. V. 113. C01006. doi: 10.1029/2007JC004150.
28. Onarheim I.H., Smedsrud L.H., Ingvaldsen R.B., Nilsen F. Loss of sea ice during winter north of Svalbard // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2014. V. 66 (1). 23933. doi: 10.3402/tellusa.v66.23933.
29. World Meteorological Organization (WMO). WMO sea-ice nomenclature: terminology, codes and illustrated glossary. WMO Publication. Secretary of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 2014. V. 259 (1). P. 121.
30. Maqueda M.A., Willmott A.J., Biggs N.R.T. Polynya dynamics: A review of observations and modeling // Reviews of Geophysics. 2004. V. 42. RG1004. doi: 10.1029/2002RG000116.
31. Tetzlaff A., Lüpkes C., Birnbaum G., Hartmann J., Nygård T., Vihma T. Brief Communication: Trends in sea ice extent north of Svalbard and its impact on cold air outbreaks as observed in spring 2013 // The Cryosphere. 2014. V. 8. № 5. P. 1757–1762. doi: 10.5194/tc-8-1757-2014.
32. EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. Global sea ice concentration reprocessing dataset 1978–2015: [Электронный ресурс] // Norwegian and Danish Meteorological Institutes. 2015. URL: <https://osi-saf.eumetsat.int/products/sea-ice-products> (дата обращения 26.06.2022) [база данных].
33. Hwang B.J., Barber D.G. Pixel-scale evaluation of SSM/I sea-ice algorithms in the marginal ice zone during early fall freeze-up // Hydrological Processes. 2006. V. 20. № 9. P. 1909–1927.
34. Goldstein M.A., Lynch A.H., Zsom A., Arbetter T., Chang A., Fetterer F. The step-like evolution of Arctic open water // Sci Rep. 2018. V. 8 (1). 16902. doi: 10.1038/s41598-018-35064-5.
35. Иванов Б.В., Священников П.Н., Уразильдеева А.В., Прохорова В.В., Весман А.В., Пантелеев В.В., Тисленко Д.И. Среднемесячная температура приземного слоя воздуха на архипелаге Шпицберген по данным норвежских и российских метеорологических станций за период 1898–2014 гг. (SAT). Свидетельство о государственной регистрации № 2016621093 от 10.08.2016 [база данных].
36. Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A. E., Isaksen K. Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012 // Polar Research. 2014. V. 33. 21349. <https://doi.org/10.3402/polar.v33.21349>.
37. Nordli Ø., Wyszynski P., Gjeltén H., Isaksen K., Łupikaszka E., Niedźwiedz T., Przybylak R. Revisiting the extended Svalbard Airport monthly temperature series, and the compiled corresponding daily series 1898–2018. URL: <http://repozytorium.umk.pl/handle/item/6323> (дата обращения 01.09.2021) [база данных].
38. Gjeltén H.M., Nordli Ø., Isaksen K., Førland E.J., Sviashchennikov P.N., Wyszynski P., Prokhorova U., Przybylak R., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V. Air temperature variations and gradients along the coast and fjords of western Spitsbergen // Polar Research. 2016. V. 35 (1). 29878. doi: 10.3402/polar.v35.29878.

39. Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Среднемесячная температура приземного слоя воздуха (восстановленный ряд) в поселке Баренцбург (архипелаг Шпицберген) за период 1911–2018 гг. (SAT_BBG_II). База данных. Свидетельство о государственной регистрации № 2020620164 от 29.01.2020.
40. Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Восстановление ряда приземной температуры воздуха на Российской станции в поселке «Баренцбург» (Шпицберген) // Российская Арктика. 2020. № 9. С. 3040.
41. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present: [Электронный ресурс] // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019 <https://doi.org/10.24381/cds.fl7050d7> (дата обращения 26.08.2021) [база данных].
42. Falk-Petersen S., Pavlov V., Berge J., Cottier F., Kovacs K.M., Lydersen C. At the rainbow's end: high productivity fueled by winter upwelling along an Arctic shelf // Polar Biology. 2015. V. 38. № 1. P. 5–11.
43. Зубакин Г.К. Крупномасштабная изменчивость состояния ледяного покрова морей Северо-Европейского бассейна. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 160 с.
44. Vesman A.V., Ivanov B.V., Volkov V.A. Changes in thermohaline system on the west Spitsbergen shelf since 1950 to present time // Czech Polar Reports. 2017. T. 7. № 1. С. 62–73.

REFERENCES

1. Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and planetary change*. 2011, 77 (1–2): 85–96.
2. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanitsky V.M., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V. Arctic sea ice cover in connection with climate change. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015, 51 (9): 889–902.
3. Tislenko D.I., Ivanov B.V., Smolianitskii V.M., Sviashchennikov P.N., Vesman A.V., Isaksen K., Gjellen H. *Sezonnye i mnogoletnie izmeneniia ledovitosti v raione arhipelaga Shpitsbergen*. Seasonal and long-term changes in ice cover in the area of the Spitsbergen archipelago. The current state of the natural environment of the Spitsbergen archipelago: a collective monograph, under the general editorship of Dr. Savatyugin L.M. St. Petersburg: AARI, 2020: 95–103. [In Russian].
4. Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008. *Geophysical Research Letters*. 2009, 36: L15501. doi: 10.1029/2009GL039035.
5. Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *The Cryosphere*. 2012, 6 (4): 881–889.
6. Vinje T. Anomalies and trends of sea-ice extent and atmospheric circulation in the Nordic Seas during the period 1864–1998. *Journal of Climate*. 2001, 14 (3): 255–267.
7. 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]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390>.
8. Ivanov V.V. Modern changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with the reduction of sea ice cover. *Gidrometeorologiya i ekologiya. Hydrometeorology and Ecology*. 2021, 64: 407–434. [In Russian].
9. Maslanik J.A., Fowler C., Stroeve J., Drobot S., Zwally J., Yi D., Emery W. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss. *Geophysical Research Letters*. 2007, 34: L24501. doi: 10.1029/2007GL032043.
10. Nghiem S.V., Rigor I.G., Perovich D.K., Clemente-Colón P., Weatherly J.W., Neumann G. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice. *Geophysical Research Letters*. 2007, 34: L19504. doi: 10.1029/2007GL031138.

11. Yulin A.V., Vyazigina N.A., Egorova E.S. Interannual and seasonal variability of ice area in the Arctic Ocean according to satellite observations. *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2019, (7): 28–40. [In Russian].
12. Stroeve J.C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophysical Research Letters*. 2014, 41: 1216–1225.
13. Rampal P., Weiss J., Marsan D. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979–2007. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009, 114: C05013. doi: 10.1029/2008JC005066.
14. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundford A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *Science*. 2017, 356 (6335): 285–291. doi: 10.1126/science.aai8204.
15. Aksenov P.V., Ivanov V.V. “Atlantification” as a Possible Cause for Reducing of the Sea-Ice Cover in the Nansen Basin in winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 42–54. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54.
16. Selyuzhenok V., Bashmachnikov I., Ricker R., Vesman A., Bobylev L. Sea ice volume variability and water temperature in the Greenland Sea. *The Cryosphere*. 2020, 14 (2): 477–495.
17. Serreze M.C., Holland M.M., Stroeve J. Perspectives on the Arctic’s shrinking sea-ice cover. *Science*. 2007, 315 (5818): 1533–1536.
18. Ivanov B.V., Timachev V.F., Sviashchennikov P.N., Makshtas A.P., Bednenko V.M., Pavlov A.K. Energy and mass transfer between the ocean and the atmosphere in the area of the winter polynya to the north of the Spitsbergen archipelago. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2013, 2 (96): 111–117. [In Russian].
19. Tislenko D.I., Ivanov B.V. Long-term variability of the temperature of the Atlantic waters in the fjords of the island of West Spitsbergen during the first (1920–1940) and modern warming in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2015, 2 (104): 93–100. [In Russian].
20. Shapkin B.S., Rubchenya A.V., Ivanov B.V., Revina A.D., Bagryantsev M.V. Long-term changes in ice cover in the area of the Svalbard and Franz Josef Land archipelagos. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (1): 128–136. [In Russian].
21. Egorov A.G. Change in the age composition and thickness of the winter ice cover of the Arctic seas of Russia at the beginning of the XXI century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 124–143. [In Russian].
22. Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss. *Journal of Climate*. 2018, 31 (12): 4917–4932.
23. Koenigk T., Caian M., Nikulin G., Schimanke S. Regional Arctic sea ice variations as predictor for winter climate conditions. *Climate Dynamics*. 2016, 46 (1–2): 317–337.
24. Screen J. A. Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss. *Journal of Climate*. 2017, 30 (11): 3945–3962.
25. Aagaard K., Foldvik A., Hillman S.R. The West Spitsbergen Current: disposition and water mass transformation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1987, 92 (C4): 3778–3784.
26. Saloranta T.M., Haugan P.M. Northward cooling and freshening of the warm core of the West Spitsbergen Current. *Polar Research*. 2004, 23 (1): 79–88.
27. Cokelet E.D., Tervalon N., Bellingham J.G. Hydrography of the West Spitsbergen current, Svalbard branch: autumn 2001. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008, 113: C01006. doi: 10.1029/2007JC004150.
28. Onarheim I.H., Smedsrud L.H., Ingvaldsen R.B., Nilsen F. Loss of sea ice during winter north of Svalbard. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2014, 66 (1): 23933. doi: 10.3402/tellusa.v66.23933.

29. *World Meteorological Organization (WMO)*. WMO sea-ice nomenclature: terminology, codes and illustrated glossary. WMO Publication. Secretary of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 2014. V. 259 (1). 121 p.
30. *Maqueda M.A., Willmott A.J., Biggs N.R.T.* Polynya dynamics: A review of observations and modelling. *Reviews of Geophysics*. 2004, 42: RG1004. doi: 10.1029/2002RG000116.
31. *Tetzlaff A., Lüpkes C., Birnbaum G., Hartmann J., Nygård T., Vihma T.* Brief Communication: Trends in sea ice extent north of Svalbard and its impact on cold air outbreaks as observed in spring 2013. *The Cryosphere*. 2014, 8 (5): 1757–1762. doi: 10.5194/tc-8-1757-2014.
32. EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. Global sea ice concentration reprocessing dataset 1978-2015 [Electronic resource]. Norwegian and Danish Meteorological Institutes. 2015. v1.2 <https://osi-saf.eumetsat.int/products/sea-ice-products> (date of access 10.08.2021) [database].
33. *Hwang B.J., Barber D.G.* Pixel-scale evaluation of SSM/I sea-ice algorithms in the marginal ice zone during early fall freeze-up. *Hydrological Processes*. 2006, 20 (9): 1909–1927.
34. *Goldstein M.A., Lynch A.H., Zsom A., Arbetter T., Chang A., Fetterer F.* The step-like evolution of Arctic open water. *Sci Rep*. 2018, 8 (1): 16902. doi: 10.1038/s41598-018-35064-5.
35. *Ivanov B.V., Sviashchennikov P.N., Urazgil'deeva A.V., Prokhorova U.V., Vesman A.V., Panteleev V.V., Tislenko D.I.* Monthly mean surface air temperature in the Svalbard archipelago according to data from Norwegian and Russian meteorological stations for the period 1898–2014 (SAT) database. Certificate of state registration No. №2016621093 dated 10/08/2016 [database].
36. *Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A. E., Isaksen K.* Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898-2012. *Polar Research*. 2014, 33: 21349. <https://doi.org/10.3402/polar.v33.21349>.
37. *Nordli Ø., Wyszynski P., Gjeltén H., Isaksen K., Łupikasza E., Niedźwiedz T., Przybylak R.* Revisiting the extended Svalbard Airport monthly temperature series, and the compiled corresponding daily series 1898–2018. Available at: <http://repozytorium.umk.pl/handle/item/6323> (date of access 01.09.2021).
38. *Gjeltén H.M., Nordli Ø., Isaksen K., Førland E.J., Sviashchennikov P.N., Wyszynski P., Prokhorova U., Przybylak R., Ivanov B.V., Urazgil'deeva A.V.* Air temperature variations and gradients along the coast and fjords of western Spitsbergen. *Polar Research*. 2016, 35 (1): 29878. doi: 10.3402/polar.v35.29878.
39. *Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D.* Monthly average temperature of the surface air layer (restored series) in the Barentsburg settlement (Spitsbergen archipelago) for the period 1911–2018. (SAT_BBG_II) database. Certificate of state registration No. 2020620164 dated 01/29/2020.
40. *Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D.* Restoration of the series of surface air temperature at the Russian station “Barentsburg” settlement (Svalbard). *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2020, 9: 3040. [In Russian].
41. *Hersbach H.* ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present [electronic resource] // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019 <https://doi.org/10.24381/cds.fl7050d7> (date of access 26.08.2021) [database].
42. *Falk-Petersen S., Pavlov V., Berge J., Cottier F., Kovacs K.M., Lydersen C.* At the rainbow's end: high productivity fueled by winter upwelling along an Arctic shelf. *Polar Biology*. 2015, 38 (1): 5–11.
43. *Zubakin G.K.* *Krupnomasshtabnaia izmenchivost' sostoiianiia 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].
44. *Vesman A.V., Ivanov B.V., Volkov V.A.* Changes in thermohaline system on the west Spitsbergen shelf since 1950 to present time. *Czech Polar Reports*. 2017, 7 (1): 62–73.