

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-71-86>

УДК 551.467



Айсберговая опасность в морях Арктической зоны Российской Федерации в условиях современных климатических изменений

И.А. Бычкова✉, В.Г. Смирнов, С.В. Михальцева, Е.В. Платонова

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия*

✉bychkova@aari.ru

ИАБ, 0009-0005-9736-1930; СВМ, 0009-0004-0732-3467; ЕВП, 0009-0000-2628-6543

Аннотация. Исследованы особенности айсбергообразования у основных архипелагов Российской Арктики — Земли Франца-Иосифа, Северной Земли и Новой Земли — за последнее десятилетие, отличавшееся высокой климатической изменчивостью. Для мониторинга айсбергов использованы некоммерческие спутниковые изображения видимого спектрального диапазона спутников Landsat-7, 8 и Sentinel-2, а также радиолокационные снимки Sentinel-1. Показана связь интенсивности айсбергообразования, включая количество айсбергов, ежегодно откальвающих от выводных ледников, с аномалиями температуры приповерхностного воздуха в Арктике. Максимальная айсберговая активность ледников наблюдалась в рекордно теплом для Арктики 2020 г., размер наибольшего образовавшегося айсберга в этом году составил 5 км.

Ключевые слова: айсберги, Арктика, видимый диапазон, изменения климата, ледники, спутниковый мониторинг, спутниковый радиолокатор

Для цитирования: Бычкова И.А., Смирнов В.Г., Михальцева С.В., Платонова Е.В. Айсберговая опасность в морях Арктической зоны Российской Федерации в условиях современных климатических изменений. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024; 70(1): 71–86. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-71-86>

Поступила 06.11.2023

После переработки 11.12.2023

Принята 28.12.2023

Iceberg danger in the seas of the Russian Federation Arctic Zone under modern climate change conditions

Irina A. Bychkova✉, Vladimir G. Smirnov, Svetlana V. Mikhaltseva,
Eugenia V. Platonova

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

✉bychkova@aari.ru

ORCID IAB, 0009-0005-9736-1930; SVM, 0009-0004-0732-3467; EVP, 0009-0000-2628-6543

Abstract. The aim of the research was to study the relationship between the intensity of iceberg formation in the Russian Arctic including the number of icebergs calving annually from outlet glaciers and surface air temperature anomalies. The research was carried out on the basis of satellite monitoring using non-commercial, freely distributed satellite information from optical-electronic satellites Landsat-8 (spatial resolution 15 m) and Sentinel-2 (spatial resolution 10 m) and the radar satellite Sentinel-1 (pixel size 20×40 m). To achieve the aim, an iceberg detection technique was used based on statistical criteria for searching for gradient zones in the analysis of two-dimensional fields of satellite images. Based on the analysis of satellite data of the visible spectral range of the Landsat-8 and Sentinel-2 satellites and Sentinel-1 radar data the maximum spatial dimensions of icebergs formed by the outlet glaciers of Severnaya Zemlya, Franz Josef Land (ZFI) and Novaya Zemlya in 2012–2022 were estimated. Satellite monitoring of the Severnaya Zemlya region was carried out using visible range images in the spring season (March–May), characterized by the best observation conditions in terms of cloudiness, natural light, and monitoring of icebergs most of which are located in fast ice at this time. Monitoring of the ZFI area was carried out using radar data in the period August–September, corresponding to the minimal ice cover conditions. Satellite monitoring of the Novaya Zemlya region was carried out using visible images in the summer season. In total, about 500 satellite images were analyzed. The discusses the dependence of the intensity of the iceberg formation process on the ice shelf and outlet glaciers with a floating edge on the surface air temperature and the maximum thickness of fast ice. It is shown that the abnormally warm weather that set in 2020 during the period of ice melting led to a sharp intensification of the process of glacier melting in the Russian Arctic and the formation of almost 8,000 icebergs near Severnaya Zemlya, more than 6,600 icebergs near ZFI and over 1,000 icebergs near the western coast of Novaya Zemlya. For all the areas of the Russian Arctic studied in the period 2012–2022 an increase was noted in the maximum observed sizes of icebergs calving from glaciers. The largest iceberg, whose length was 5 km, broke off in 2020 from the Matusevich ice shelf.

Keywords: Arctic, glaciers, icebergs, satellite monitoring, visible spectral range, satellite radar, climate change

For citation: Bychkova I.A., Smirnov V.G., Mikhaltseva S.V., Platonova Eu.V. Iceberg danger in the seas of the Russian Federation Arctic Zone under modern climate change conditions. *Arctic and Antarctic Research*. 2024; 70 (1): 71–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-71-86>

Received 06.11.2023

Revised 11.12.2023

Accepted 28.12.2023

Введение

Наблюдающийся в настоящее время рост грузопотока в Арктике, обусловленный необходимостью использования альтернативных маршрутов доставки грузов из-за введенных против РФ экономических санкций, повышает риск воздействия на безопасность судоходства опасных ледяных образований, прежде всего айсбергов. Средняя вероятность столкновения с айсбергом на трассах Северного морского пути (СМП) составляет сейчас, по оценке специалистов Крыловского государственного

научного центра, 1,4 % [1]. Однако эта оценка не учитывает изменчивость плотности распределения айсбергов в разные годы, отличающиеся по климатическим условиям. Наблюдается ускорение процесса отступления ледников с разрушением их фронтальных частей и образованием большого количества айсбергов. В последнее десятилетие в Арктике произошли заметные климатические изменения, сопровождавшиеся сокращением ледяного покрова на арктических архипелагах и увеличением безледного периода на акваториях морей. В результате активизировались процессы таяния ледников. Одновременно наблюдается усиление волнения, возрастает повторяемость осенних штормов [2], что приводит к усилению ветро-волновой нагрузки на выводные ледники и, соответственно, ускорению процесса откола айсбергов. Также увеличилась повторяемость туманов, ограничивающих видимость на судоходных трассах. Все эти факторы привели к возрастанию айсберговой угрозы на Северном морском пути (СМП) и в районах добычи углеводородов на прибрежном шельфе. В работе [2] отмечен рост за последнее десятилетие количества айсбергов, их кусков и обломков, наблюдающихся по трассе СМП, причем айсберги фиксируются как по спутниковым данным, так и по данным визуальных наблюдений с судов. Кроме этого, авторами [3] отмечено смещение южной границы распространения айсбергов и их обломков к югу, вплоть до береговой черты.

Основными источниками айсбергов в морях Российской Арктики являются архипелаги Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), Новая Земля и Северная Земля. Начиная с 2010 г. общей тенденцией в динамике ледников основных архипелагов Арктической зоны РФ, связанной с климатическими изменениями, стало постепенное сокращение их покровного оледенения, одновременно возрос объем айсбергового стока. Изменилась интенсивность айсбергообразования в зависимости от сокращения или увеличения площади подвижного фронта выводных ледников.

Первую попытку описать плотность распределения айсбергов в морях Российской Арктики предпринял В. Абрамов, обобщивший данные наблюдений ледовой авиаразведки 2-й половины XX в. [4]. С тех пор в связи с климатическими изменениями в Арктике данные Атласа Абрамова перестали быть актуальными, появилась необходимость в новых исследованиях айсбергообразования и распространения айсбергов в Арктической зоне РФ. В 2011–2014 гг. в рамках 7-й научной программы Евросоюза и Российской Федерации по проекту MAIRES («Мониторинг ледников и морских льдов Арктики с использованием российских и европейских спутников») разрабатывались методы мониторинга арктических айсбергов [5]. В проекте MAIRES участвовали: Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена (NERSC, Норвегия), Фонд «Нансен-центр» (Россия); университет прикладных наук Joanneum Research (Австрия); Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК).

Работы по проекту MAIRES позволили получить по снимкам оптического радиометра ASTER ИСЗ Terra плотность распределения айсбергов, наблюдавшихся в марте–апреле 2012 г. в Баренцевом и Карском морях вблизи выводных ледников архипелагов Земля Франца-Иосифа и Северная Земля. При оценках использовались 3 видимых канала (разрешение 15 м) и 1 ближний ИК (разрешение 30 м). Идентификация айсбергов проводилась экспертами вручную на основе использования следующих дешифровочных признаков: наличие тени; наличие яркой полосы на солнечной стороне айсберга; характерная текстура крупных столообразных айсбергов; наличие трещин во льдах вблизи айсберга, вызванных движением относительно льда.

Полученные по спутниковым данным результаты сравнивались с данными ледовой авиаразведки по этим районам, приведенными в Атласе арктических айсбергов В. Абрамова [4]. Как оказалось, локализация максимальной плотности распределения айсбергов в районах исследования, полученная исполнителями проекта MAIRES, аналогична локализации, указанной в работе [4]. Однако в численном выражении айсбергов в 2012 г. стало намного больше, чем в конце XX в. В марте 2012 г. по району прибрежной зоны Земли Франца-Иосифа было проанализировано 34 снимка ASTER, обнаружено 2600 айсбергов, размерами 15 м и выше. Наибольшая плотность айсбергов была отмечена у острова Хоффмана из архипелага Земля Франца-Иосифа. Здесь она превысила 1000 объектов для квадрата 100×100 км. По данным [4] в марте в области максимальной концентрации айсбергов отмечалось в среднем 500 айсбергов, по данным проекта MAIRES — 1200. Различие в количестве обнаруженных айсбергов авторы [5] связали с тем, что в Атласе айсбергов приведены данные, осредненные за несколько лет наблюдений, а в их исследовании — данные лишь за один год.

Анализируя данные видимого диапазона, полученные с ИСЗ Landsat, Aster, «Монитор-Э», авторы [5] пришли к выводу о возможности обнаружения, при благоприятных метеоусловиях (безоблачная погода, светлое время суток), айсбергов, имеющих размеры 2–3 пикселя (60–90 м — для перечисленных выше спутников) и более.

Данные проекта MAIRES характеризуют условия айсбергообразования лишь за один год.

В российской компании СКАНЭКС по спутниковым данным среднего и высокого пространственного разрешения оптических спутников EROS-B, SPOT-4,5 и радиолокационных Radarsat-1,2 за июль–сентябрь 2011–2013 гг. получена оценка распределения айсбергов и определены размеры айсбергов в одном локальном районе — проливе Вилькицкого у Северной Земли. Всего проанализировано 130 спутниковых изображений [6]. Айсберги, обнаруженные авторами работы [6], дрейфовали на открытой воде.

В настоящей работе предпринята попытка исследовать особенности айсбергообразования в районах основных архипелагов Российской Арктики за последнее десятилетие, отличавшееся высокой климатической изменчивостью. Целью работы является получение оценки влияния климатических факторов на интенсивность айсбергообразования в морях Российской Арктики на основании использования некоммерческой спутниковой информации, как радиолокационной, так и с аппаратуры видимого диапазона.

Методика исследований и материалы наблюдений

При спутниковом мониторинге айсбергов выделяют три основные ситуации их нахождения: айсберги в припае, айсберги в дрейфующем льду и айсберги на открытой воде. Наиболее сложный для мониторинга вариант — айсберги в дрейфующих льдах, особенно если айсберги имеют малые размеры. В этой ситуации за айсберги могут быть ошибочно приняты отдельные льдины. Айсберги на открытой воде обнаруживаются легко, благодаря их более высокой яркости и иной текстуре по сравнению с окружающей водой и ледяными полями. Однако при малых размерах айсбергов, сопоставимых с пространственным разрешением используемой для наблюдения спутниковой аппаратуры, один и тот же айсберг сложно идентифицировать на последовательных снимках. Это обстоятельство приводит при подсчете общего количества айсбергов

в регионе к массовым случаям двойного (и тройного...) учета одного и того же айсберга. Айсберги в припае — самый легкий для обнаружения случай, так как айсберги в течение сезона неподвижны, находятся в одной точке и отбрасывают длинные тени, а также образуют линейные подветренные следы после метелей, хорошо различимые на снимках видимого диапазона на фоне ледяного покрова.

В работе для обнаружения айсбергов использована методика анализа двумерных полей яркости спутниковых изображений, основанная на статистических критериях поиска градиентных зон, реализованная в виде авторской программы Iceberg2 [7]. При анализе распределения айсбергов по пространственным размерам использовалась номенклатура WMO, согласно которой айсберги подразделяют на обширные (длиной более 200 м), крупные (длиной 121–200 м), средние (61–120 м), мелкие (15–60 м) [8].

Исследование современных изменений процессов айсбергообразования в Арктике в настоящей работе проводилось по некоммерческой спутниковой информации, доступной в сети интернет. Применялись снимки оптико-электронной аппаратуры OLI ИСЗ Landsat-7,8 (канал 0,5–0,68 мкм, пространственное разрешение 15 м), снимки 8-го канала MSI ИСЗ Sentinel-2 (канал 0,785–0,900 мкм, разрешение 10 м) за 2011–2023 гг., а также радиолокационные изображения Sentinel-1 (режим сверхширокой полосы обзора EW, размер пикселя 20×40 м) за 2015–2021 гг. Всего было проанализировано более пятисот снимков с сайта USGS Global Visualization Viewer (GloVis) и с сайта программы Copernicus Европейского космического агентства.

При анализе снимков учитывались объекты, образующиеся при отколе от выводных ледников, с размерами более 30 м — для снимков видимого диапазона и более 50 м — для радиолокационных изображений. Куски и обломки айсбергов, меньшие по величине, не принимались во внимание.

Для спутникового мониторинга айсбергов в районе Северной Земли был выбран весенний период (март–май). Этот сезон характеризуется лучшими условиями наблюдения как по облачной ситуации (наибольшее количество ясных дней за год), так и по мониторингу айсбергов, большинство из которых находятся в это время в припае и имеют при низких углах Солнца длинные, демаскирующие их тени. В то же время подсчет обнаруженных в припае айсбергов характеризует, по сути, айсберговую активность предыдущего года. Для исключения из анализа айсбергов, образовавшихся в районе мониторинга в предшествующие годы (это айсберги, годами циркулирующие в полузамкнутой акватории или сидящие на мели, во фьорде Матусевича, пр. Красной Армии, бухте Ковалевской и пр.), привлекались данные мониторинга айсбергов за конец предыдущего года. Всего за 2011–2023 гг. по району Северной Земли было проанализировано около 300 снимков Landsat-7,8 и Sentinel-2.

Для мониторинга айсбергов в районе архипелага Земля Франца-Иосифа применить методику обнаружения айсбергов в припае по весенним снимкам видимого диапазона сложно, так как в данное время в районе этого высокоширотного архипелага низкий уровень естественной освещенности, что не позволяет получить достаточное количество снимков для анализа. Поэтому при анализе для мониторинга был выбран летний период, август–сентябрь, когда море освобождается ото льда, количество дрейфующих льдов минимально и фиксируется максимальный айсберговый сток [9, 10]. Так как летом для района ЗФИ характерен высокий процент облачности, в работе основным источником информации для этого архипелага стали всепогодные радиолокационные снимки. Были использованы радиолокационные

данные ИСЗ Sentinel-1 (А,В), режим Extra-Wide Swath Mode (пиксель 40×20 м, полосо обзора 400 км) за 2015–2022 гг. и, в качестве вспомогательной информации, снимки видимого диапазона аппаратуры OLI (панхроматическая съемка, разрешение 15 м, кадр 185×185 км), полученные со спутника Landsat-8 в дни с благоприятной по облачности ситуацией. Всего по району ЗФИ было проанализировано 85 радиолокационных снимков и более 60 снимков Landsat-8.

Спутниковый мониторинг айсбергов в районе баренцевоморского побережья Новой Земли осуществлялся по материалам снимков Landsat-8 за летний период (июль–сентябрь) 2014–2021 гг. Доступные радиолокационные снимки Sentinel-1 (с разрешением 40 м) для анализа не привлекались из-за преобладания в этом районе айсбергов с размерами ниже элемента спутникового пространственного разрешения. Всего использовано 89 снимков видимого диапазона, полученных со спутников Landsat-8 и Sentinel-2. Для обеспечения меньшей вероятности возможного двойного учета одного и того же айсберга на разных снимках использовалась специальная стратегия подбора снимков. Близкие по датам оптические снимки (с разницей в несколько дней) относились, как правило, либо к разным районам архипелага, либо соответствовали району, закрытому облачностью на предыдущем снимке и открывшемуся на новом. Если на двух близких снимках были перекрывающиеся области, причем свободные от облачности, то обнаружение айсбергов проводилось по более контрастному снимку. Также были случаи, когда за 2 дня (например, 7–9 июля 2018 г.) произошел сброс айсбергов с ледника. То есть эти айсберги 7 июля еще не могли быть обнаружены, а 9 июля откол айсбергов произошел, и потребовалось дополнительно проанализировать снимок и за эту дату.

Результаты и обсуждение

Для оценки айсберговой опасности в морях Российской Арктики в условиях происходящих климатических изменений была исследована связь летней температуры приповерхностного воздуха на станциях в районе СМП с интенсивностью разрушения ледников, с количеством ежегодно образующихся у ледников арктических архипелагов айсбергов и с длиной наибольшего айсберга, отколовшегося в год наблюдения. Анализ проводился по данным измерений последнего десятилетия.

Разрушение ледников

Повышение летних температур воздуха, отмечающееся в Арктике в последнее десятилетие, вызывает ускоренное таяние ледников и их деградацию. Особенно этот процесс характерен для шельфовых ледников, находящихся на плаву, и выводных ледников с плавучим фронтальным языком. Под влиянием более теплого воздуха и более теплой морской воды происходит сравнительно быстрое таяние ледника на его верхней и нижней поверхностях. В результате ледник теряет устойчивость и прочность, в нем возникают трещины, а в дальнейшем по этим трещинам происходит откол айсбергов. Разрушение наблюдается у многих шельфовых ледников Арктики в данный климатический период. Например, крупнейший шельфовый ледник Арктики, ледник № 79 в Гренландии, в июле аномально теплого 2020 г. потерял при разрушении площадь в 125 км². Разрушение ледника привело к массовому образованию мелких айсбергов¹. Аналогичная ситуация наблюдается и в Российской

¹ Spalte breaks up. 15.09.2020. URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/09/Spalte_breaks_up (дата обращения: 01.10.2023).

Арктике, где в последние годы отмечается ускоренное разрушение крупнейшего шельфового ледника, расположенного во фьорде Матусевича на Северной Земле. Шельфовый ледник Матусевича — это плавучий ледник, образованный выводными ледниками, стекающими с ледниковых куполов Русанова и Карпинского во фьорд Матусевича (рис. 1).

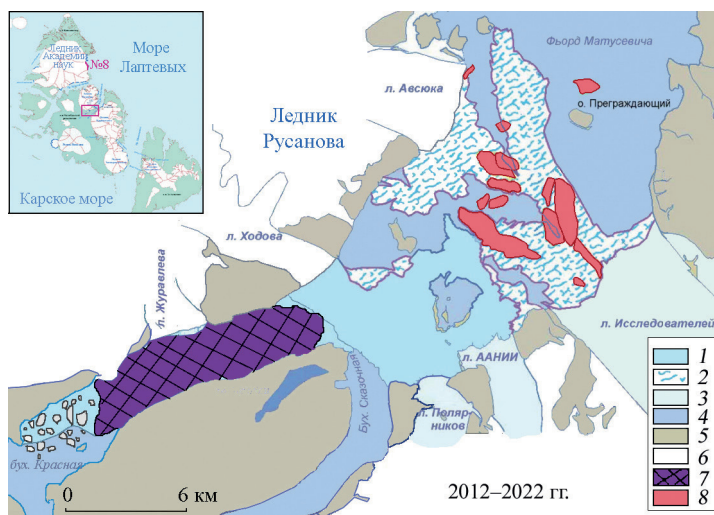


Рис. 1. Разрушение шельфового ледника фьорда Матусевича в 2012–2022 гг. с образованием крупных айсбергов. По данным спутниковых снимков Landsat-7, 8.

1 — шельфовый ледник по состоянию на конец 2012 г.; 2 — утраченная за 2012 г. часть шельфового ледника; 3 — выводной ледник; 4 — открытая морская поверхность; 5 — суша; 6 — ледниковый купол; 7 — шельфовый ледник в границах 2020–2022 гг.; 8 — крупные айсберги, образовавшиеся в результате откола от шельфового ледника в 2012 г. Местоположение ледника показано прямоугольником на карте архипелага (врезка слева)

Fig. 1. Decay of the Matusevich fjord ice shelf in 2012–2022 with the formation of large icebergs. According to satellite images Landsat-7, 8.

1 — ice shelf as of the end of 2012; 2 — part of the ice shelf lost in 2012; 3 — outlet glacier; 4 — open sea surface; 5 — land; 6 — ice dome; 7 — ice shelf within the boundaries of 2020–2022; 8 — large icebergs that formed as a result of breaking off from the ice shelf in 2012. The location of the glacier is shown as a rectangle on the map of the archipelago (inset on the left)

На начало 2011 г. площадь шельфового ледника Матусевича, измеренная по снимку Landsat-7, составляла около 160 км². 2011 год был с теплым, дождливым и ветреным летом; в итоге ледник начал ускоренно разрушаться. За год ледник потерял в результате откола айсбергов, их кусков и осколков, а также вследствие таяния часть своей поверхности площадью 17,4 км² [7]. Теплее нормы был и 2012 г., когда потери ледника при разрушении составили уже 60 км² (рис. 2, 3a).

В последующие пять лет процесс распада ледника продолжался, но темпы разрушения замедлились [7]. Лето 2014 г. оказалось аномально холодным, средняя летняя температура воздуха, по данным полярной станции «Остров Голомянный», была отрицательной [11]. В результате ледяной покров во фьорде Матусевича в этот год разрушен не был, не претерпел разрушений и шельфовый ледник. В 2013–2015 гг. в Арктике зимние температуры воздуха были достаточно низкие, благодаря чему

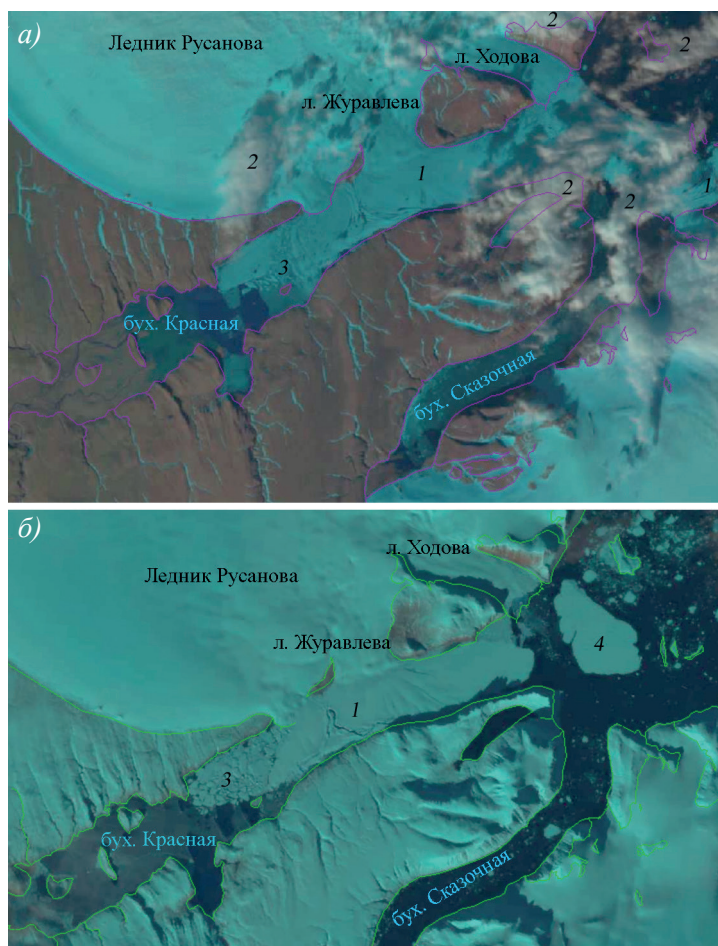


Рис. 2. Шельфовый ледник во фьорде Матусевича на композитных снимках в естественных цветах (2-й, 3-й, 4-й каналы аппаратуры OLE) Landsat-8 за 27 августа 2013 г. (а) и за 11 сентября 2022 г. (б).

1 — шельфовый ледник; 2 — облака; 3 — айсберги, заблокированные ледником в бухте Красная; 4 — айсберг длиной 5 км. Положение фрагментов снимков обозначено прямоугольником на врезке к рис. 1

Fig. 2. Shelf glacier in Matusevich fjord on composite images in natural colors (2nd, 3rd, 4th channels of OLE equipment) Landsat-8 for August 27, 2013 (a) and September 11, 2022 (b).

1 — shelf glacier; 2 — clouds; 3 — icebergs blocked by glacier in Krasnaya Bay; 4 — iceberg 5 km long. The position of the fragments of the images is indicated by a rectangle in the inset to Fig. 1

максимальная толщина припая у побережья сибирских морей достигала 180 см [12], превышая уровень 2012 г. на 20 см (рис. 3б). В итоге, хотя в 2016 г. летняя температура воздуха на станциях в районе СМП повысилась (рис. 3а), существенного разрушения шельфового ледника не произошло, что, по-видимому, связано с предшествующим холодным трехлетием.

2020 г. стал рекордно теплым по температуре приземного воздуха во всем Северном полушарии. В апреле 2020 г. средняя температура воздуха в морской Ар-

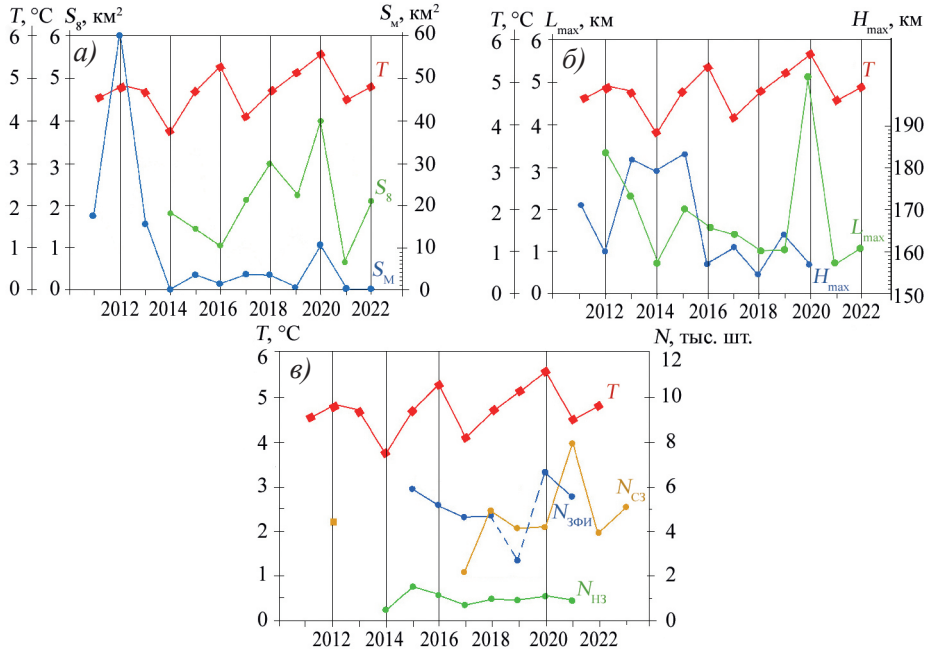


Рис. 3. Влияние климатических факторов на процессы айсбергообразования в Российской Арктике.

а) Сравнение изменчивости приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) на станциях в районе СМП (T , по данным [13]) с процессом разрушения шельфового ледника Матусевича и выводного ледника № 8 ледникового купола Академии наук.

S_M и S_8 — площадь, потерянная за год ледником Матусевича и ледником № 8 соответственно.

б) Сравнение изменчивости летней ПТВ на станциях в районе СМП и максимальной толщины припая в сибирских морях (H_{max} , по данным [12]) с максимальной длиной айсбергов, откалывающихся ежегодно от ледников Северной Земли (L_{max}).

в) Сравнение изменчивости летней ПТВ на станциях в районе СМП с количеством айсбергов, ежегодно образующихся у архипелагов Российской Арктики.

$N_{ЗФИ}$ — количество айсбергов у Земли Франца-Иосифа, зарегистрированных в летний период; $N_{СЗ}$ — количество айсбергов у Северной Земли, зарегистрированных в весенний период; $N_{НЗ}$ — количество айсбергов у баренцевоморского побережья Новой Земли, зарегистрированных в летний период

Fig. 3. Impact of climatic factors on iceberg formation processes in the Russian Arctic.

а) Comparison of the variability of near-surface air temperature (NSAT, [13]) at stations in the area of the NSR with the process of the Matusevich ice shelf (S_M) and outlet glacier No. 8 of the glacial dome of the Academy of Sciences decay (S_8).

S_M and S_8 — the area lost during the year Matusevich ice shelf and glacier No. 8 and decay respectively.

б) Comparison of the variability of the summer NSAT at stations in the area of the NSR and the maximum fast ice thickness in the Siberian seas ($[H_{max}, 12]$) with the maximum length of icebergs breaking off annually from the glaciers of the Severnaya Zemlya (L_{max}).

H_{max} — is the maximum fast ice thickness; L_{max} — the length of the largest iceberg detected by satellite, formed in the area of the Severnaya Zemlya in the year of observation.

в) Comparison of the summer NSAT variability at stations in the area of the NSR and the number of icebergs formed annually near the archipelagos of the Russian Arctic.

$N_{ЗФИ}$ — the number of icebergs at the ZFI registered in the summer; $N_{СЗ}$ — the number of icebergs near Severnaya Zemlya registered in the spring; $N_{НЗ}$ — the number of icebergs off the Barents Sea coast of Novaya Zemlya registered in the summer

ктике, рассчитываемая по данным наблюдений на 41 гидрометеостанции, превысила климатическую норму на 6 градусов [12]. Летом 2020 г., по данным 24 гидрометеостанций, расположенных в районе СМП, был зафиксирован абсолютный максимум приповерхностных температур воздуха в морской Арктике [13]. Эта аномалия была обусловлена выносом теплых воздушных масс из Сибири, где отмечалась необычная жара — на «полюсе холода» в Верхоянске 20 июня зарегистрировали температуру 38 °С. Такая теплая погода, установившаяся в период таяния льдов, привела к резкому сокращению площади ледяного покрова и активизации процесса таяния ледников. В сентябре 2020 г. площадь льда в сибирских арктических морях достигла исторического минимума в 26 000 км² [13]. В августе 2020 г. от шельфового ледника Матусевича откололся айсберг площадью более 10 км² при длине 5 км (рис. 2б). Осенью 2020 г. площадь шельфового ледника, оцененная по снимку Landsat-8, составляла уже лишь 27 км².

В 2021–2022 гг. положение ледника Матусевича стабилизировалось. В ближайшие годы, видимо, произойдет его дальнейшее разрушение, при этом окажутся деблокированными айсберги в бухте Красная, образовавшиеся от этого ледника. Ранее такой процесс уже произошел с айсбергами, отколовшимися от выводных ледников в бухте Сказочная, — теперь айсберги, попадающие в эту бухту с выводного ледника, проходят далее во фьорд Матусевича. На 2022 г. в бухте Красная было около 100 айсбергов, длина наибольшего составлял 1 км (рис. 2б). После выброса этих айсбергов во фьорд численность ежегодно откалывающихся во фьорд айсбергов естественным образом снизится, так как их источником останутся лишь выводные ледники.

Наблюдавшиеся в последнее десятилетие процессы разрушения краевой части выводных ледников, находящейся на плаву, были отчасти подобны процессам, наблюдаемым при разрушении шельфового ледника. Самым крупным из таких выводных ледников на Северной Земле является ледник № 8 (номер ледника дан по Всемирному каталогу ледников, World Glacier Inventory, из базы данных ледников GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space)². Наибольшее разрушение ледника № 8 было отмечено также в аномально теплом 2020 г., в этот год ледник потерял по спутниковым данным 4 км² площади краевой части (рис. 3а). Второй по значению локальный максимум потерь льда при разрушении ледника № 8 (3 км²) отмечен в 2018 г., когда, при том что летняя температура воздуха не была в числе самых высоких за 2011–2022 гг., был зарегистрирован минимум максимальной толщины припая (рис. 3б).

Изменение максимальной длины айсбергов, образующихся у арктических архипелагов

Деграция материковых льдов отражается на параметрах образующихся айсбергов. Процессы таяния вызывают повышение скорости течения ледников, большее выдвижение краевой части выводных ледников в море. В итоге на плаву оказывается более длинный кусок ледяного языка, который разламывается далее в результате ветро-волнового воздействия и приливных колебаний. При этом на приглубых участках моря образуются айсберги большей длины. В случае выхода выводного ледника на мелководье увеличения длины образующихся айсбергов не происходит.

² World Glacier Inventory. URL: https://www.glims.org/RGI/rgi60_dl.html (дата обращения: 01.10.2023).

Выходя в море, ледник соприкасается с морским дном, в итоге образуется много мелких айсбергов — как это наблюдается у ледника Вавилова на Северной Земле.

При разрушении шельфового ледника Матусевича изначально образуются крупные айсберги, длина некоторых из них превышает 1–2 км. В теплые 2012 и 2020 гг. зарегистрированы наиболее крупные айсберги — 3,25 и 5 км соответственно. Дли-

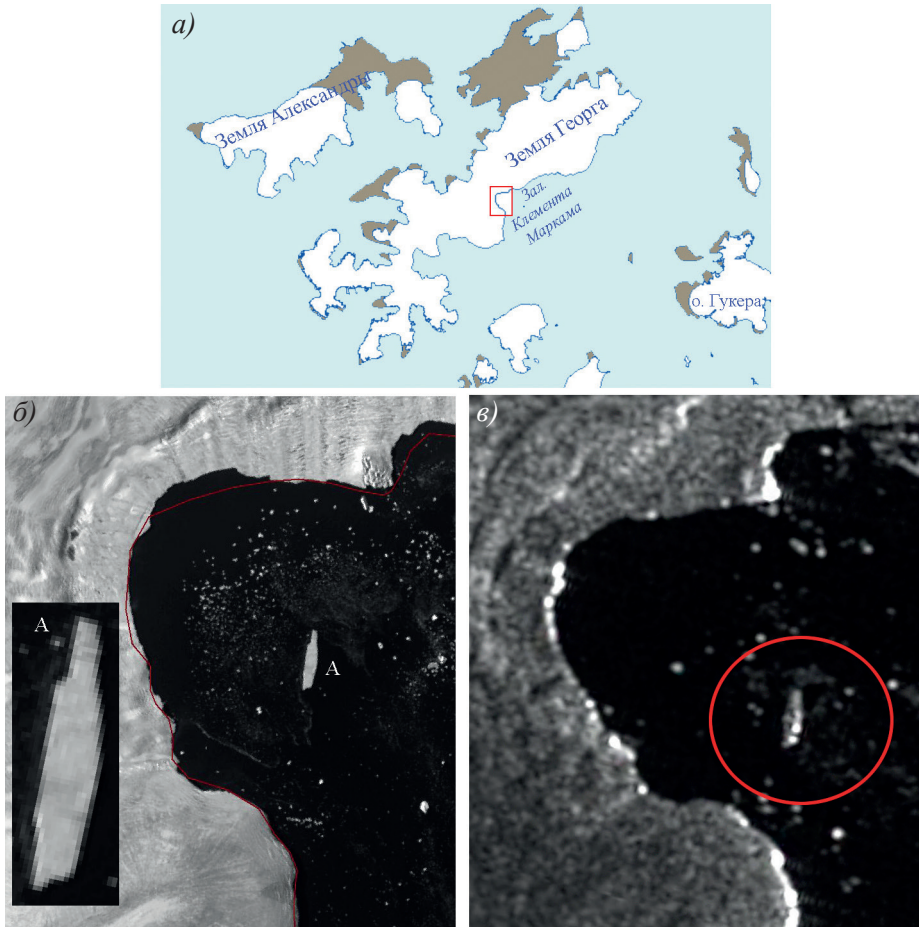


Рис. 4. Наиболее крупный айсберг, длиной 842 м, наблюдавшийся по спутниковым данным у Земли Франца-Иосифа в 2015–2022 гг.:

a — карта-схема западной части архипелага Земля Франца-Иосифа, красным прямоугольником отмечено положение фрагментов спутниковых снимков; *б* — фрагмент снимка Landsat-8, 5 августа 2022 г., на врезке — увеличенный фрагмент снимка с айсбергом (А); *в* — фрагмент снимка Sentinel-1, 3 августа 2022 г.

Fig. 4. The largest iceberg with a length of 842 m, observed by satellite data near Franz Josef Land in 2015–2022:

a — a map of the western part Franz Josef Land. The position of the fragments of the satellite images is indicated by a red rectangle; *б* — a fragment of the Landsat-8 image, 5 August 2022. In the inset to Fig. an enlarged fragment of a satellite image with an iceberg; *в* — a fragment of the Sentinel-1 image, 3 August, 2022

на самых больших айсбергов, отколовшихся от шельфового ледника, в несколько раз превышает длину наиболее крупных айсбергов, образовавшихся от выводных ледников архипелага (она не превышает 1,5 км). Расположенные во фьорде Матусевича острова затрудняют выход крупных айсбергов в море, поэтому часть из них циркулирует в самом фьорде по несколько лет. Со временем такие крупные айсберги под воздействием волнения и ветра дробятся на более мелкие, которые и выходят из фьорда, дрейфуя в разных направлениях, некоторые из них достигают пролива Вилькицкого.

На рис. 3б показано изменение в 2012–2022 гг. длины наибольшего из айсбергов, обнаруженного за каждый год наблюдения на спутниковых снимках в районе Северной Земли. В 2012, 2013, 2015–2020 гг. самые крупные айсберги откалывались от шельфового ледника. В 2014, 2018, 2019, 2021, 2022 гг., когда шельфовый ледник был относительно стабилен, образование наиболее крупных айсбергов фиксировалось в других районах: в 2018 и 2019 гг. — у ледника № 12 в проливе Красной Армии [14], в 2021 г. — у ледника Исследователей во фьорде Матусевича, в 2014 и 2022 гг. — у выводного ледника восточного склона ледникового купола Академии наук.

В районе Земли Франца-Иосифа пространственные размеры наиболее крупных айсбергов, обнаруженных по спутниковым данным видимого диапазона за летне-осенний период 2015–2022 гг., в течение периода возрастали. В начале наблюдений айсберги с длиной более 250 м наблюдались редко и, как правило, находились на мелководье. В 2020–2021 гг. были зафиксированы айсберги длиной более 350 м, самый большой айсберг, обнаруженный по снимкам Sentinel-1 у ЗФИ в 2021 г., имел длину 610 м. Еще больший айсберг, длиной 842 м, наблюдался в 2022 г. на снимке Landsat-8 у ледника № 98 в заливе Клементя Маркама (рис. 4). Средняя длина айсбергов, обнаруженных на снимках, составила 157 м.

У баренцевоморского побережья Новой Земли по спутниковым данным видимого диапазона за 2014–2022 гг. наибольшие айсберги обнаружены в 2018 г.: айсберг 298×193 м у ледника Иностранцева (снимок за 9 июля) и айсберг 280×115 м у ледника Кривошеина (снимок за 23 сентября). В 2014, 2015 и 2021 гг. длина обнаруженных айсбергов не достигала 200 м. В 2016 и 2019 гг. максимальная длина айсберга составила 215 м, в 2017 г. — 225 м, в 2020 г. — 207 м.

Изменение количества айсбергов, ежегодно откалывающихся от ледников

По материалам радиолокационной съемки за лето 2015–2021 гг. района Земли Франца-Иосифа со спутника Sentinel-1 было проведено сравнение количества ежегодно образующихся в этом районе айсбергов. Полученные результаты показаны на рис. 3в. За 7 лет наблюдений лишь в 2019 г. лед присутствовал в проливах до середины августа, из-за чего идентификация айсбергов осложнялась. В результате в этот год было обнаружено лишь 2626 айсбергов, что практически в два раза меньше, чем в другие годы. Для одного и того же района использовались в основном снимки, разнесенные по времени на 1 месяц. Опыт показывает, что в течение этого периода айсберги летом тают, сокращаются в размерах и разрушаются. Максимальное количество обнаруженных по снимкам айсбергов в районе ЗФИ, зарегистрированное в рекордно теплое 2020 г., составило 6605 при среднем ежегодном значении 5427.

Для оценки количества ежегодно откалывающихся от ледников западного побережья Новой Земли айсбергов за лето 2014–2021 гг. использованы снимки видимого диапазона Landsat-8 и Sentinel-1. Количество обнаруженных айсбергов изменялось от

429 в 2014 г. до 1388 в 2015 г. (рис. 3в). В 2014 г. из-за неблагоприятных облачных условий удалось подобрать только 5 информативных спутниковых снимков — вдвое меньше, чем в среднем за год. Недостаточное количество съемочных кадров привело к значительному снижению количества обнаруженных айсбергов на снимках 2014 г. по сравнению с другими годами периода наблюдений.

Исследования количества айсбергов, ежегодно образующихся весной у Северной Земли, были проведены по снимкам оптико-электронной аппаратуры спутника Landsat-8 за 2017–2023 гг. В итоге, при среднем значении количества наблюденных айсбергов 4362, минимальное количество айсбергов было зафиксировано в 2017 г. и составило 2907. Максимум обнаруженных айсбергов, 7974 шт., наблюдался весной 2021 г., т. е. пик айсберговой продуктивности также пришелся на рекордно теплый 2020 г. (рис. 3в). Для сравнения на графике показано также число айсбергов, обнаруженных в этом районе исполнителями проекта MAIRES в 2012 г. [5].

В общем числе айсбергов, обнаруженных у Северной Земли весной 2021 г. после рекордно теплого 2020 г., 76 % составляют мелкие (менее 60 м), 19,3 % — средние (61–120 м), 4,3 % — крупные (121–200 м) и 0,3 % — обширные (более 200 м) (рис. 5). В другие годы наблюдений из рассматриваемого периода мелких айсбергов у Северной Земли было зарегистрировано около 50 %, а средних — около 30 %. У Новой Земли максимальный процент мелких айсбергов был зафиксирован также в рекордный 2020 г.: 62,4 %; в остальные годы мелкие айсберги составляли в этом районе 40–44 %.

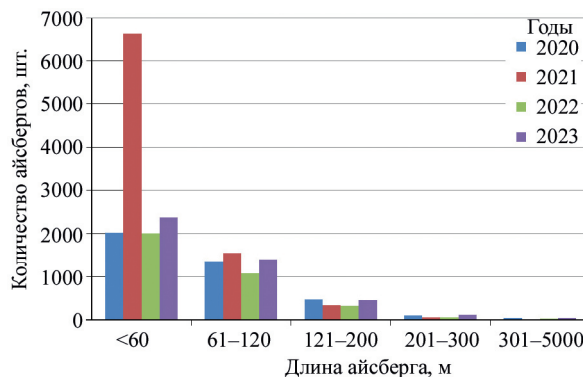


Рис. 5. Распределение по размерам айсбергов, образовавшихся в 2020–2023 гг. у ледников Северной Земли

Fig. 5. Distribution by size of icebergs formed in 2020–2023 near the glaciers of the Novaya Zemlya

Обширных айсбергов (свыше 200 м) весной 2021 г. было обнаружено лишь 27 штук (0,3 %), в то время как в 2023 г. таких айсбергов было зарегистрировано 170 (3,3 %). Такая разница в результатах может быть связана с разной площадью припая у восточного побережья Северной Земли в эти годы. В 2023 г. площадь припая была больше, чем в 2021 г., и зимой 2020/21 г. в припае застряло больше айсбергов, дрейфовавших мористее от мест образования (рис. 6). Соответственно при таянии припая весной риск айсберговой опасности в районе сосредоточения многочисленных припайных айсбергов резко возрастет, так как эти айсберги начнут свободно дрейфовать.

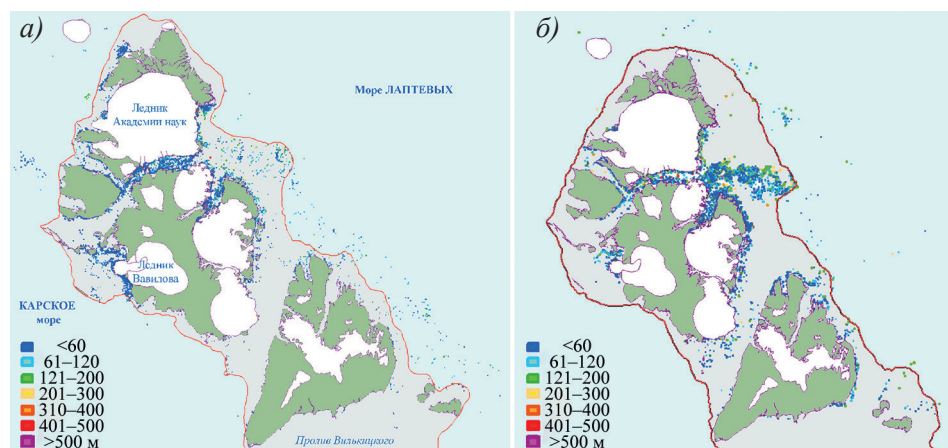


Рис. 6. Местоположение и размеры айсбергов, обнаруженных по спутниковым данным видимого диапазона Landsat-8 в районе Северной Земли весной 2021 (а) и 2023 (б) гг. Красной линией показана граница припая

Fig. 6. Location and dimensions of icebergs detected by satellite data in the area of the Land archipelago in the spring season of 2021 (a) and 2023 (б). The red line shows the fast ice boundary

Выводы

По данным спутниковых наблюдений айсберговая опасность в морях Арктической зоны в последнее десятилетие, в условиях современных климатических изменений, возросла. Фиксируется увеличение количества ежегодно образующихся айсбергов и увеличение их максимальных размеров, тем самым возрастает риск столкновения судов и инженерных объектов на шельфе с такими опасными ледяными образованиями.

Для всех исследованных районов Российской Арктики в период 2012–2022 гг. отмечено увеличение максимальных размеров айсбергов, откальвающих от ледников. Длина наибольшего айсберга, зафиксированного у Северной Земли, составила 5 км, у Земли Франца-Иосифа — 842 м, у Новой Земли — 298 м.

Процесс айсбергообразования на шельфовом леднике и выводных ледниках с плавучей краевой частью интенсифицируется при повышенных летних температурах приповерхностного воздуха. В аномально теплый 2020 г. от ледников Российской Арктики, по спутниковым данным, откололось свыше 15 тыс. айсбергов, что почти на 5 тыс. выше, чем в остальные годы рассмотренного периода. Наибольший вклад в образование айсбергов вносят ледники Северной Земли, в 2020 г. в этом районе Арктики образовалось, по спутниковым данным, около 8 тысяч айсбергов.

Для достоверных выводов о тенденциях изменения статистических характеристик айсбергов в арктических морях необходима организация постоянного мониторинга районов айсбергообразования, расположенных у выводных ледников. Осуществить такой мониторинг в труднодоступных районах Арктики можно только с помощью спутниковых данных.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-27-00122).

Competing interests. The authors have no conflicts of interests.

Funding. The work under this project is supported by the Russian Science Foundation through the Project № 23-27-00122.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шапошников В.М., Александров А.В., Матанцев Р.А., Ивановская О.Д. Анализ айсберговой опасности на Северном морском пути на примере газозовов. *Арктика: экология и экономика*. 2017;(2):76–81. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-2-76-81>
Shaposhnikov V.M., Aleksandrov A.V., Matantsev R.A., Ivanovskaya O.D. Iceberg risk analysis for the Northern sea route: LNG carrier study case. *Arctic: ecology and economy*. 2017;(2):76–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-2-76-81>
2. Фильчук К.В., Коробов В.Б., Юлин А.В., Шевелева Т.В. Влияние наблюдаемых изменений климатических условий на хозяйственную деятельность в морях Российской Арктики. *Российская Арктика*. 2022;(17):21–33. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2022-2-21-33>
Filchuk K.V., Korobov V.B., Yulin A.V., Sheveleva N.V. Influence of climate changes on navigation and development of the continental shelf in the Russian Arctic seas. *Russian Arctic*. 2022;(17):21–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2022-2-21-33>
3. Павлова Е.А., Алексеева Т.А., Миронов Е.У., Смоляницкий В.М. Особенности распределения айсбергов по данным судовых наблюдений в Карском море в 2004–2019 гг. *Российская Арктика*. 2020;(10):30–36. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12103>
Pavlova E.A., Alekseeva T.A., Mironov E.U., Smolyanitsky V.M. Specific features of iceberg distribution according to shipborne observations in the Kara Sea in 2004-2019. *Russian Arctic*. 2020;(10):30–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12103>
4. Abramov V. *Atlas of Arctic icebergs: the Greenland, Barents, Kara, Laptev, East-Siberian and Chukchi seas and the Arctic basin*. NJ, USA: Backbone Publishing company; 1996. 70 p.
5. MAIRES. *Monitoring Arctic Land and Sea Ice using Russian and European Satellites*. Seventh Framework Programme FP7-SPACE-2010-1. EU-Russia Cooperation in GMES (SICA). Grant agreement no. 263165. D5.1: Iceberg map from satellite data. 2014. 18 p.
6. Кучейко А.А., Иванов А.Ю., Давыдов А.А., Антонюк А.Ю. Дрейф и распределение айсбергов в проливе Бориса Вилькицкого по данным детальных радиолокационных и оптических спутниковых изображений. *Исследование Земли из космоса*. 2015;(5):73–83. <https://doi.org/10.7868/S0205961415040065>
Kucheiko A.A., Ivanov A.Yu., Davydov A.A., Antonyuk A.Yu. Drift and distribution of icebergs in the Vilkitsky Strait studied by detailed satellite radar and optical images. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016;52:1031–1040. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090164>
7. Бычкова И.А., Смирнов В.Г. Использование спутниковой информации для обнаружения айсбергов и оценки айсберговой угрозы. *Лед и снег*. 2018;58(4):537–551. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-537-551>
Bychkova I.A., Smirnov V.G. Use of satellite data for detecting icebergs and evaluating the iceberg threats. *Ice and Snow*. 2018;58(4): 537–551. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-537-551>
8. *WMO Sea-ice nomenclature*. WMO. No. 259, Vol. 1 — Terminology and Codes. Edition 1970–2019.
9. Жичкин А.П. Ледовые условия в районе архипелага Земля Франца-Иосифа. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2014;(4): 82–89.
Zhichkin A.P. Ice conditions in the Franz Josef Land archipelago. *Proc. of Kola Science Center RAS*. 2014;(4): 82–89. (In Russ.)

10. Бузин И.В., Глазовский А.Ф., Гудошников Ю.П., Данилов А.И., Дмитриев Н.Е., Зубакин Г.К., Кубышкин Н.В., Наумов А.К., Нестеров А.В., Скутин А.А., Скутина Е.А., Шибакин С.И. Айсберги и ледники Баренцева моря: Исследования последних лет. Ч. 1. Основные продуцирующие ледники, распространение и морфометрические особенности айсбергов. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2008;78(1): 66–79.
Buzin I.V., Glazovsky A.F., Gudoshnikov Yu.P., Danilov A.I., Dmitriev N.E., Zubakin G.K., Kubyshkin N.V., Naumov A.K., Nesterov A.V., Skutin A.A., Skutina E.A., Shibakin S.I. Icebergs and glaciers of the Barents Sea. Results of the most recent research. Part 1. Main producing glaciers, their propagation and morphometric properties. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2008;78(1):66–79. (In Russ.)
11. Болшиянов Д.Ю., Соколов В.Т., Ёжиков И.С., Булатов Р.К., Рачкова А.Н., Федоров Г.Б., Парамзин А.С. Условия питания и изменчивость ледников архипелага Северная Земля по результатам наблюдений 2014–2015 гг. *Лед и снег*. 2016;56(3):358–368. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-358-368>
Bolshiyarov D.Y., Sokolov V.T., Yozhikov I.S., Bulatov R.K., Rachkova A.N., Fedorov G.B., Paramzin A.S. Conditions of the alimention and the variability of glaciers of the Severnaya Zemlya Archipelago from observations of 2014–2015. *Ice and Snow*. 2016;56(3):358–368. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-358-368>
12. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Иванов Н.Е. Особенности климата Арктики в 2020 году. *Российские полярные исследования*. 2021;(1): 11–14.
13. Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Вязилова А.Е., Радионов В.Ф., Смоляницкий В.М. Мониторинг климата Арктики в 2022 году. *Российские полярные исследования*. 2023;(1): 10–12.
14. Бычкова И.А., Смирнов В.Г. Сравнительный анализ выводных ледников Северной Земли как источников формирования айсбергов, по спутниковым данным 2014–2019 гг. *Лед и снег*. 2021;61(1):14–25. <https://doi.org/10.31857/S2076673421010068>
Bychkova I.A., Smirnov V.G. Estimation of the volume of icebergs calved from the outlet glaciers of the Severnaya Zemlya archipelago for 2014–2019. *Ice and Snow*. 2021;61(1):14–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673421010068>