

Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.467

doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-537-551

Использование спутниковой информации для обнаружения айсбергов и оценки айсберговой угрозы

© 2018 г. И.А. Бычкова*, В.Г. Смирнов

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

*bychkova@aari.ru

Use of satellite data for detecting icebergs and evaluating the iceberg threats

I.A. Bychkova*, V.G. Smirnov

Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russian; Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russian
*bychkova@aari.ru

Received February 4, 2018

Accepted April 24, 2018

Keywords: Arctic seas, high spacial resolution images, icebergs, optical spectral range, radar with synthetic aperture, satellite monitoring.

Summary

The methods of satellite monitoring of dangerous ice formations, namely icebergs in the Arctic seas, representing a threat to the safety of navigation and economic activity on the Arctic shelf are considered. The main objective of the research is to develop methods for detecting icebergs using satellite radar data and high space resolution images in the visible spectral range. The developed method of iceberg detection is based on statistical criteria for finding gradient zones in the analysis of two-dimensional fields of satellite images. The algorithms of the iceberg detection, the procedure of the false target identification, and determination the horizontal dimensions of the icebergs and their location are described. Examples of iceberg detection using satellite information with high space resolution obtained from Sentinel-1 and Landsat-8 satellites are given. To assess the iceberg threat, we propose to use a model of their drift, one of the input parameters of which is the size of the detected objects. Three possible situations of observation of icebergs are identified, namely, the «status» state of objects: icebergs on open water; icebergs in drifting ice; and icebergs in the fast ice. At the same time, in each of these situations, the iceberg can be grounded, that prevents its moving. Specific features of the iceberg monitoring at various «status» states of them are considered. The «status» state of the iceberg is also taken into account when assessing the degree of danger of the detected object. The use of iceberg detection techniques based on satellite radar data and visible range images is illustrated by results of monitoring the coastal areas of the Severnaya Zemlya archipelago. The approaches proposed to detect icebergs from satellite data allow improving the quality and efficiency of service for a wide number of users with ensuring the efficiency and safety of Arctic navigation and activities on the Arctic shelf.

Citation: Bychkova I.A., Smirnov V.G. Use of satellite data for detecting iceberg and evaluation the iceberg threats. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (3): 537–551. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-537-551.

Поступила 4 февраля 2018 г.

Принята к печати 24 апреля 2018 г.

Ключевые слова: айсберги, арктические моря, оптический спектральный диапазон, радиолокатор с синтезированной апертурой, снимки высокого пространственного разрешения, спутниковый мониторинг.

Рассмотрены методы обработки оперативной спутниковой информации об айсбергах. Применённая методика обнаружения айсбергов основана на статистических критериях поиска градиентных зон при анализе двухмерных полей. Использование методик обнаружения айсбергов по спутниковым радиолокационным данным и снимкам видимого диапазона показано на материалах мониторинга прибрежных районов Северной Земли.

Введение

Айсберги потенциально опасны на акватории арктических районов. Опасность заключается как в риске столкновения судна или инженерного сооружения с массивным айсбергом, так и в

повреждении подводной частью айсбергов кабелей и трубопроводов, проложенных в мелководной зоне по морскому дну. Основные источники айсбергов в арктических морях России — ледники архипелагов Земли-Франца Иосифа, Новой Земли и Северной Земли. Размеры большинства

айсбергов менее 100 м, и наблюдать за такими малыми объектами при помощи спутников стало возможно только с 1990-х годов, когда появились спутники нового поколения, оснащённые радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА) и аппаратурой видимого диапазона с высоким пространственным разрешением [1].

В настоящее время в разных странах ведутся активные работы по созданию спутниковых технологий, обеспечивающих обнаружение арктических айсбергов и дальнейшее слежение за ними. Необходимый элемент спутниковых технологий мониторинга айсбергов — прогноз дрейфа айсбергов и их разрушения [2, 3]. Разработке таких спутниковых технологий способствовало потепление климата в Арктике, сопровождающееся ускоренным таянием ледников и ростом числа айсбергов, образующихся при их разрушении. Мониторинг позволяет не только установить зоны риска столкновения с айсбергом, проследить за морскими течениями, трассами которых могут быть айсберги, но и оценить возможные изменения в биологии морей, связанные с переносом вместе с айсбергами больших масс пресной воды [4].

Спутниковые методы, используемые для обнаружения айсбергов

Канадская ледовая служба (Canadian Ice Service, CIS) и Канадская корпорация C-CORE (Centre for Cold Ocean Resource Engineering) с 1990-х годов использует данные спутниковых радиолокаторов для обнаружения айсбергов [5–7]. Автоматизированные методы отслеживания айсбергов по спутниковым наблюдениям в CIS в оперативную практику пока не внедрены, однако ведутся работы по их созданию [7]. Метод CIS применяется для поиска айсбергов на открытой воде и основан на использовании частоты появления сигналов ложной тревоги Constant false alarm rate (CFAR) и сравнении значений в конкретном пикселе с порогом. Порог T определяется на основании известного значения вероятности ложной тревоги, по которому оценивают безразмерный параметр k , а также вычисленных для скользящего окна значений среднего сигнала μ и среднего квадратического отклонения σ : $T = \mu + k\sigma$. Изначально эта методика была разра-

ботана для районов с высокой плотностью айсбергов, в регионах же с их низкой плотностью порог, рассчитываемый по CFAR, оказывается завышенным. Метод позволяет выявить аномалии, но не обеспечивает понимания её природы — связана она с айсбергом или это сигнал от судна, или от взволнованной водной поверхности. В Германии предложена модификация метода CFAR для поиска айсбергов по снимкам РСА, основанная на итерационном подходе к расчёту CFAR: при каждой итерации значения σ и μ для воды переоцениваются, причём пиксели, идентифицированные на предыдущем шаге как айсберги, из расчёта исключаются [8].

Исследования CIS позволили обнаружить влияние режима поляризации спутникового радиолокационного сигнала на вероятность обнаружения айсбергов. Установлено, что при углах падения радарного сигнала менее 35° кросс-поляризационные наблюдения (HV) дают лучшие результаты при мониторинге айсбергов по сравнению с режимом горизонтальной поляризации (HH). Кросс-поляризационные наблюдения имеют также преимущества в условиях зондирования при сильном приводном ветре, что объясняется их меньшей чувствительностью к шероховатостям поверхности океана. При углах падения более 35° вероятность обнаружения айсбергов выше при использовании HH-поляризации, чем HV [4, 7].

В C-CORE выполнено исследование эффективности использования двойной поляризации спутниковых РСА — TerraSAR-X и RADARSAT-2 — при обнаружении айсбергов по сравнению с использованием одной поляризации. Данные с двойной поляризацией позволили повысить вероятность обнаружения айсбергов среди морских льдов [6]. Авторы работы [9] получили хорошие результаты по обнаружению мелких айсбергов по данным поляриметрических данных. Однако мультиполяризационные снимки отличаются небольшим пространственным охватом и имеют существенно более высокую стоимость съёмки по сравнению со съёмкой в одной поляризации. В однополяризационном режиме при разрешении 25 м кадр RADARSAT-2 составляет 100×100 км, а в четырёхполяризационном режиме при том же разрешении — только 25×25 км. Это обстоятельство препятствует использованию мультиполяризационных снимков РСА как основного источника информации в оперативных технологиях об-

наружения айсбергов. Вероятность обнаружения айсбергов с помощью ИСЗ зависит от соотношения размера и формы айсберга, пространственного разрешения аппаратуры, угла визирования, состояния моря. Сравнение возможностей спутников радиолокационной и оптической съёмки высокого разрешения при мониторинге айсбергов позволяет сделать вывод, что в видимом диапазоне при благоприятных погодных условиях доля обнаружения айсбергов, их кусков и обломков выше, чем при использовании снимков радиолокатора с синтезированной апертурой. При этом снижается и число ложных обнаружений. Кроме того, по снимкам видимого диапазона можно точнее определить линейные размеры айсберга. Определяемые по снимкам РСА параметры обнаруженных айсбергов отличаются от реально наблюдаемых из-за эффектов суммирования когерентных сигналов, приводящих, в частности, к кажущемуся изменению линейных размеров объекта.

Несмотря на худшие результаты использования РСА (только в условиях ясной погоды!) в определении параметров айсбергов по сравнению со съёмкой аппаратурой видимого диапазона, радиолокаторы в условиях Арктики, характеризующихся преобладанием облачности, представляют собой основной источник информации об опасных ледяных образованиях. Это объясняется тем, что радиолокационный сигнал не экранируется облачностью и не зависит от освещённости поверхности. При оптимальных условиях наблюдений спутниковые радиолокаторы позволяют обнаружить айсберги, размер которых равен пространственному разрешению аппаратуры с вероятностью 90% [5]. В то же время съёмка в видимом диапазоне информативна только при отсутствии облачности и в условиях достаточной освещённости (во время полярной ночи съёмка в видимом диапазоне невозможна). Тем не менее, при благоприятных погодных условиях спутниковые данные видимого диапазона можно использовать как эталонные для оценки точности спутниковых радиолокаторов при оценке параметров айсбергов.

Спутниковый снимок в видимом диапазоне с высоким разрешением позволяет достоверно идентифицировать айсберг, определить его форму (используя особенности тени или применяя режим стереосъёмки), отличить его от торосов и других ледяных образований. В целом, снимок в видимом диапазоне позволяет получить больше информации

об айсберге по сравнению с радиолокационным. Совместное использование данных видимого диапазона и РСА даёт возможность повысить достоверность обнаружения айсбергов и снизить погрешность определения их геометрических параметров.

Методика исследований

В настоящее время для обнаружения айсбергов в Арктике используются радиолокационные снимки высокого пространственного разрешения со спутников RADARSAT-2, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, Sentinel-1A, RISAT-1, а также снимки, получаемые в оптическом диапазоне со спутников Landsat-8, Sentinel-2, Pleiades и др. [1–9]. Для Арктического региона при мониторинге айсбергов с помощью РСА обычно заказывают съёмку с разрешением 3–25 м, так как на основании статистических данных большинство встречающихся айсбергов и их обломков имеют размеры от 10 до 50 м в поперечнике. Размеры используемых при мониторинге айсбергов радиолокационных кадров высокого разрешения составляют, как правило, от 30×50 до 100×150 км в зависимости от выбранного спутника и режима съёмки.

Выделяют три возможные ситуации наблюдения айсбергов: айсберги на открытой воде; айсберги в дрейфующем льду; айсберги в припае. Для каждой из этих ситуаций разрабатываются свои методические подходы, позволяющие обнаруживать айсберги и проводить их мониторинг. Самая распространённая ситуация обнаружения айсбергов — *на открытой воде*. В этом случае для поиска айсбергов применяют алгоритмы, основанные на пороговых методах [1, 7, 8]. При обнаружении айсбергов *в припае*, как правило, не возникает проблем. Такие айсберги могут быть обнаружены на серии последовательных спутниковых оптических и радиолокационных кадров как объекты с конкретными морфологическими особенностями, сохраняющие своё местоположение и характерные геометрические параметры достаточно длительный промежуток времени. При идентификации обнаруженного в припае объекта как айсберга может возникнуть проблема различения айсберга от стамухи, которая также неподвижна. Для отличия айсберга в припае (и айсберга, сидящего на мели) от стамухи используется разность в текстуре изображения этих двух типов объектов на снимках. Ста-

мухи имеют хаотичный рисунок поверхности, в то время как текстура айсбергов отражает упорядоченный рельеф поверхности, изначально присущий леднику, от которого айсберг откололся.

Обнаружение айсбергов в ледяном покрове, особенно в дрейфующем, представляет собой более сложную задачу по сравнению с обнаружением айсбергов на открытой воде. Большинство объектов удаётся распознать лишь по косвенным признакам. В том случае, когда айсберг дрейфует в ледяном покрове со скоростью, значительно превышающей скорость дрейфа льда, его можно уверенно опознать на снимках высокого разрешения по наличию характерного канала во льдах за айсбергом [10].

В Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) создана технология обнаружения айсбергов по спутниковым радиолокационным изображениям и изображениям в оптическом спектральном диапазоне [2], прошедшая тестирование при обнаружении айсбергов на открытой воде в ходе выполнения ряда коммерческих проектов. Для реализации этой технологии разработана специальная компьютерная программа. При использовании оптических снимков алгоритмическая схема обнаружения айсбергов усложняется по сравнению со схемой, применяемой для РСА-изображений, за счёт введения дополнительного блока выделения безоблачных участков. Программа позволяет найти и выделить облачные участки, рассматриваемые затем как дополнительные области отсека [11]. В качестве исходной информации программа использует радиолокационные спутниковые данные (RADARSAT-2, TerraSAR-X, SMO-SkyMed) и оптические изображения (Landsat-8), представляющие собой растровые файлы формата GeoTIFF. Используемый алгоритм обнаружения айсбергов настроен на анализ статистических характеристик двумерного поля, связанных не с абсолютной величиной сигнала, а с градиентами. Это позволяет не проводить пересчёт значений яркостного сигнала в значения удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) для РСА или абсолютных значений яркости (в случае оптических снимков). На выходе программа создаёт векторные шейп-файлы обнаруженных айсбергов для их дальнейшего использования в геоинформационных приложениях.

Важный момент при поиске айсбергов на спутниковом снимке — наличие в базе данных векторных файлов суши. Нанесение объектов суши на снимок позволяет избежать ложной идентификации объектов суши как айсбергов. Векторные файлы суши должны быть подготовлены на интересующий район заранее на основании имеющихся картографических материалов. Возможны ситуации, когда на заданный район отсутствует новая картографическая информация, в то же время наблюдаются существенные изменения береговой линии, не отражённые на старых картах. В таком случае проводится актуализация векторных файлов суши по данным спутниковых снимков высокого разрешения.

В соответствии с разработанной технологией рассчитываются статистические характеристики по выбранному оператором фрагменту изображения. Для скользящего окна 3×3 пикселя выполняется расчёт среднего квадратического отклонения сигнала σ , среднего значения сигнала μ и их отношения σ/μ . По полученным значениям σ/μ строится кумулятивная гистограмма. По точке на гистограмме, соответствующей переходу кумулятивной кривой к «насыщению», определяется пороговое значение $\sigma/\mu_{кр}$. По умолчанию $\sigma/\mu_{кр} = 0,95$, но это значение может быть изменено оператором, исходя из реального графика σ/μ . Для выбранного фрагмента изображения рассчитывается также кумулятивная гистограмма яркостного сигнала (либо УЭПР), определяется пороговое значение $T_{кр}$. По умолчанию принято, что $T_{кр} = T_{0,99}$. Порог $\sigma/\mu_{кр}$ применяется ко всему анализируемому изображению, программа выделяет все объекты, границы которых состоят из связанных пикселей, имеющих значения $\sigma/\mu > \sigma/\mu_{кр}$. Затем программа рассчитывает число пикселей внутри обнаруженных объектов и разделяет выделенные объекты на два класса: содержащие более пяти пикселей (массив М1) и все остальные (т.е. имеющие пять и менее пикселей, массив М2). Для выделения малых объектов в массиве М2, представляющих собой потенциально опасные ледяные образования, применяется дополнительный порог — уровень сигнала $T_{кр}$. Объекты из массива М2 с уровнем сигнала выше $T_{кр}$ считаются потенциально опасными ледяными образованиями. Отредактированный массив М2 объединяется с массивом М1, и для всех объектов объединённого массива выполняется процедура автоматического

определения двух линейных размеров — длины и ширины. В качестве длины объекта принимается расстояние, равное максимальной протяжённости объекта по какому-либо направлению, а в качестве ширины — значение его протяжённости в направлении, перпендикулярном к длине.

Выделенные на снимке объекты визуализируются на экране. Оператор в интерактивном режиме выполняет выбраковку ложных объектов, в частности судов, а также артефактов, обусловленных особенностями когерентного сложения радарных сигналов. Суда опознаются по повышенной яркости и характерным соотношениям длины и ширины. Также используется информация о судах, размещаемая в автоматической идентификационной системе AIS (при наличии у оператора доступа к такой системе). Отдельно дешифрируются стамухи — по их характерной хаотичной текстуре, глубине моря в месте обнаружения, исторической базе наблюдений стамух в конкретном регионе. Ложные объекты удаляются из файла, а итоговый файл потенциально опасных ледяных образований (айсбергов) сохраняется в конечном формате программы — шейп-файле айсбергов.

Проверка спутниковой технологии обнаружения айсбергов, проведённая в АНИИ в Арктике в 2014–2016 гг. в рамках выполнения прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по теме «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации» (Соглашение о предоставлении субсидии с Минобрнауки России от 20.10.2014 № 14.610.21.0006), показала 95%-ю достоверность обнаружения айсбергов.

Для ведения хозяйственной деятельности на шельфе арктических морей важно не только вовремя обнаружить айсберги, но и заранее, до начала работ, оценить вероятность их появления в заданном районе и примерно определить возможные параметры айсбергов (средние и максимальные геометрические размеры, массу, скорость дрейфа). Сделать такие оценки позволяет статистический анализ результатов спутниковых наблюдений за айсбергами в интересующем регионе за предшествующие годы. При мониторинге айсбергов с помощью спутниковых средств наблюдения, кроме собственно обнаружения айсберга, необходимо определить его актуальное состояние,

т.е. соотнести обнаруженный объект со следующими возможными ситуационными типами:

- айсберг находится в припае;
- айсберг дрейфует в дрейфующем льду;
- айсберг дрейфует на открытой воде;
- айсберг «сидит» на грунте в окружении дрейфующих льдов;
- айсберг «сидит» на грунте среди открытой воды.

«Статусное» состояние айсберга определяется на основании анализа серии последовательных спутниковых снимков.

Использование спутниковых наблюдений для мониторинга айсбергов у побережья Северной Земли

На рис. 1 показано «статусное» состояние айсбергов, обнаруженных по спутниковым данным в марте — начале апреля 2017 г. у побережья Северной Земли. Положение дрейфующих айсбергов указано на момент первичного обнаружения. Всего в этот период было идентифицировано 2907 айсбергов. Из них большинство (88,8%) было обнаружено в припае, 201 айсберг (6,9%) дрейфовал во льдах, 83 (2,9%) «сидели» на грунте в окружении дрейфующих льдов. На открытой воде было всего 18 айсбергов (менее 1%).

Знание статусного состояния айсберга позволяет уточнить риски, связанные с возможным столкновением с ним охраняемых объектов (в том числе инженерных сооружений и судов). Так, айсберги, дрейфующие на открытой воде, имеют большую скорость, чем дрейфующие во льдах; этот факт должен учитываться при разработке планов минимизации айсберговой угрозы. Идентификация айсберга, сидящего на грунте среди дрейфующих льдов, позволяет избежать ложных выводов об айсберговой угрозе, которые могут быть сделаны на основании единичного снимка. На рис. 2 дан пример регистрации айсбергов, сидящих на грунте, которые «разрезают» дрейфующий лёд, создавая для ледового эксперта (имеющего в своем распоряжении только один спутниковый снимок) иллюзию дрейфа айсбергов сквозь ледяные поля. Айсберги, показанные на рис. 2, обнаружены в марте 2017 г., их положение на карте соответствует району, обозначенному литерой А на рис. 1.

При оценке числа айсбергов, наблюдавшихся за определённый период времени по серии по-

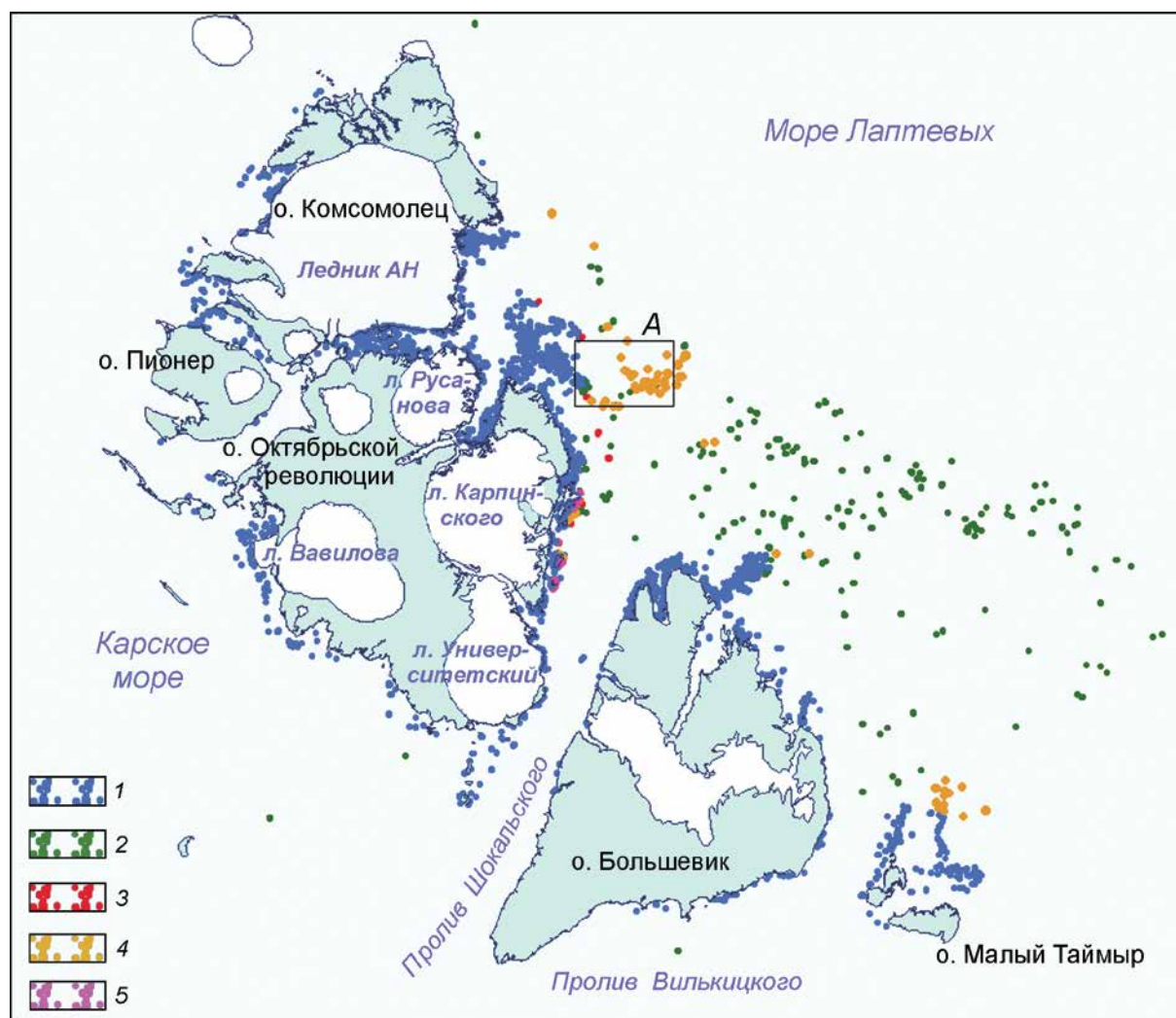


Рис. 1. Айсберги, обнаруженные у Северной Земли в марте–апреле 2017 г. по спутниковым снимкам Landsat-8 и находящиеся:

1 – в припае; 2 – в дрейфующем льду; 3 – на открытой воде; 4 – на грунте среди дрейфующих льдов; 5 – на грунте среди открытой воды

Fig. 1. Icebergs detected near Severnaya Zemlya in March–April 2017 with the use of Landsat-8 images:

1 – in the fast ice; 2 – in the drifting ice; 3 – in the open water; 4 – grounded in drifting ice; 5 – grounded in open water

следовательных спутниковых снимков одного участка моря, важно избегать «повторного» счёта, когда один и тот же айсберг может быть учтён несколько раз по разным снимкам. Для идентификации обнаруженного айсберга при последующих съёмках необходимо по первоначальному снимку создать шаблон формы этого айсберга и далее проводить сравнение обнаруженных на других снимках объектов (в радиусе потенциально возможного дрейфа айсберга от точки обнаружения) с этим шаблоном. Прогностический дрейф айсберга рассчитывается по специальным, регионально адаптированным моделям [2]. Шаблон

формы должен учитывать совокупность нескольких параметров объекта: геометрической формы айсберга, его размеров, характерных особенностей «рисунка» (наличие и взаимное расположение трещин, вершин, озёрков талой вод и др.). Со временем форма айсберга может изменяться в результате процессов его разрушения под воздействием термодинамических факторов и интенсивных штормов. В частности, айсберг может раскалываться на части, таять, переворачиваться из-за смещения центра массы. Пример изменения формы и размеров айсберга в ходе его многодневного дрейфа приведён на рис. 3.

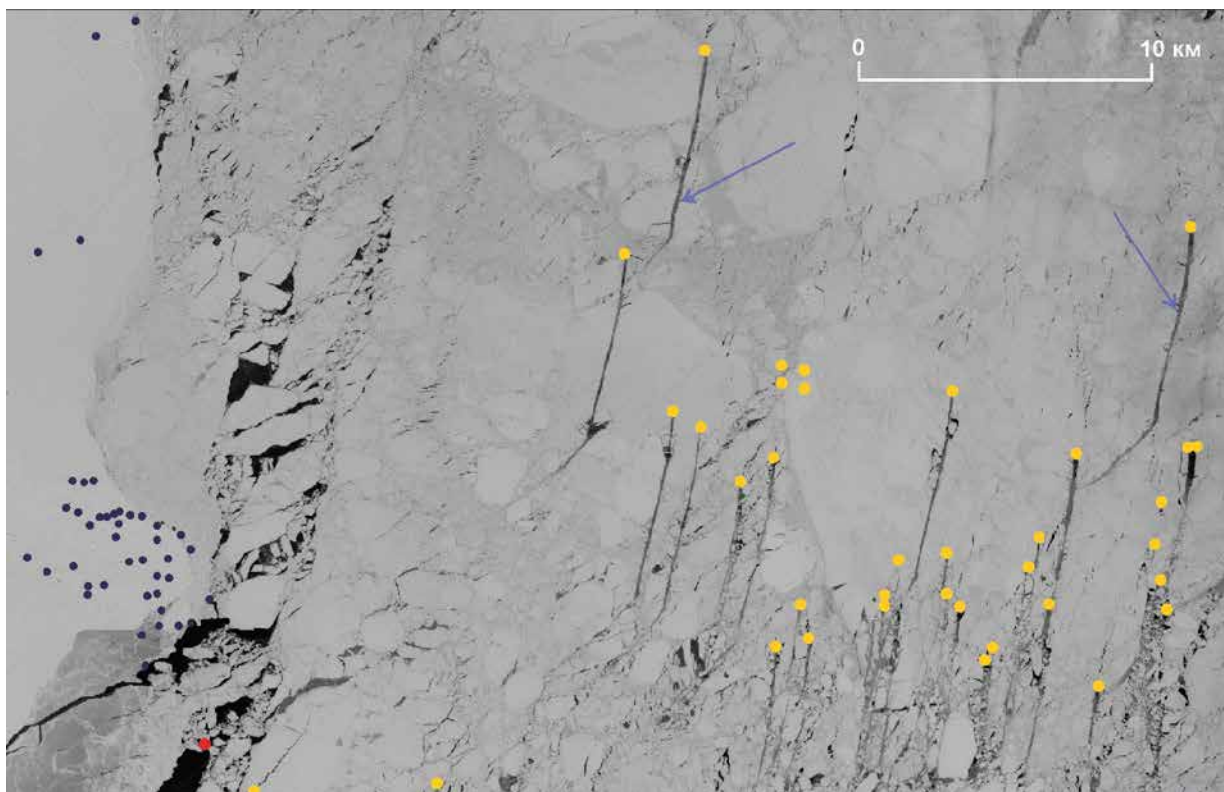


Рис. 2. Айсберги, сидящие на грунте среди дрейфующих льдов у Северной Земли, на спутниковом снимке Landsat-8.

Положение фрагмента спутникового снимка соответствует прямоугольнику, обозначенному литерой А на рис. 1. Жёлтыми точками отмечены айсберги, находящиеся на грунте среди дрейфующих льдов; синими — находящиеся в припае; красная точка — айсберг на открытой воде. Стрелки показывают следы во льдах, возникающие при прорезании неподвижным айсбергом движущихся льдов

Fig. 2. Grounded icebergs among the drifting ice near Severnaya Zemlya on Landsat-8 image.

Location of the satellite image fragment corresponds to the box indicated by the letter A in Fig. 1. Yellow points — grounded icebergs among drifting ice; blue points — icebergs in the fast ice; red points — iceberg in the open water. The arrows show traces in the ice, arising from the eruption of a motionless iceberg moving ice

Айсберг, показанный на рис. 3, при первоначальном обнаружении во фьорде Матусевича в сентябре 2012 г. имел горизонтальные размеры $3,25 \times 0,9$ км. В первые два года существования айсберг дрейфовал в самом фьорде, размеры и форма айсберга изменялись незначительно. В 2015 г. айсберг вышел из фьорда в открытое море, а в июле от него откололся фрагмент 580×230 м; осенью 2015 г. размеры айсберга составляли уже $2,08 \times 0,5$ км. Во время наблюдения за этим айсбергом шаблон его формы приходилось неоднократно корректировать. Наиболее устойчивым элементом шаблона был рисунок поверхности айсберга; при отколе части айсберга происходила потеря фрагмента рисунка, но оставшаяся часть сохраняла типичный для этого объекта облик, что позволяло отслеживать его пе-

ремещение. Отметим, что «рисунок» айсберга не всегда остаётся неизменным. В летнее время айсберги могут таять и на их поверхности образуется талая вода, создавая тем самым новый рисунок. Происходят такие процессы под воздействием солёной, сравнительно тёплой воды, а также нагрева поверхности в результате солнечной инсоляции и конвективного теплообмена с более тёплой воздушной массой. Форма и размеры этих айсбергов в ходе наблюдений могут остаться прежними, тогда как рисунок их поверхности может существенно измениться. Особенно сложно обнаружить на последующих снимках перевернувшийся айсберг, так как у него меняются сразу и форма, и размер, и рисунок поверхности. Подтвердить, что это тот же самый айсберг, можно лишь с помощью контактных наблюдений или

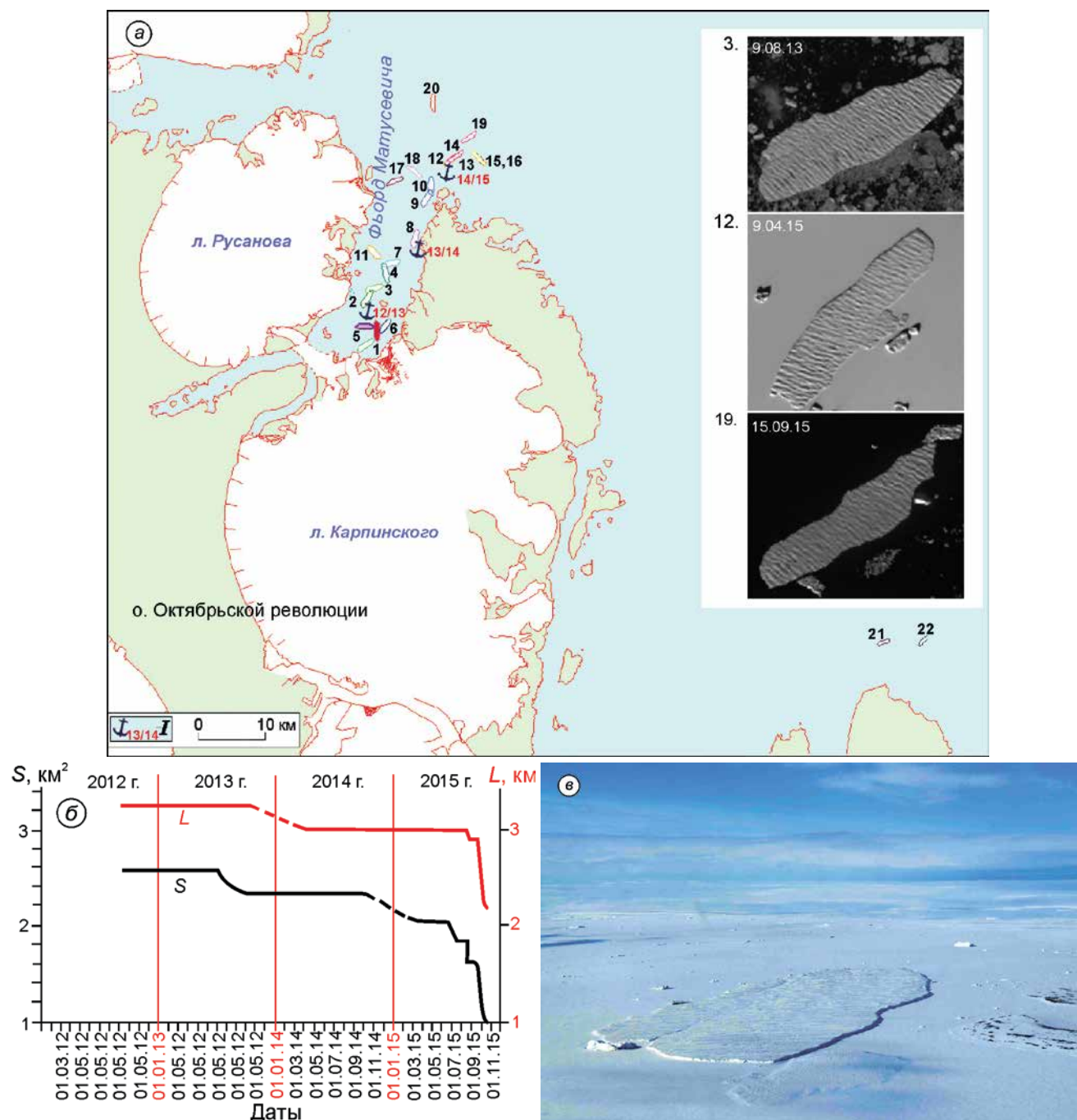


Рис. 3. Пример спутникового мониторинга дрейфа айсберга, отколовшегося в 2012 г. от шельфового ледника Матусевича в одноимённом фьорде:

a – траектория дрейфа по данным снимков Landsat-8: *I* – стационарные положения айсберга в зимние периоды (айсберг вмерзает в лёд); арабскими цифрами отмечены положения айсберга в периоды дрейфа: 1 – 7.09.12; 2 – 1.07.13; 3 – 9.08.13; 4 – 11.08.13; 5 – 22.08.13; 6 – 27.08.13; 7 – 16.09.13; 8 – 24.07.14; 9 – 10.09.14; 10 – 11.09.14; 11 – 26.09.14; 12 – 16.06.15; 13 – 18.07.15; 14 – 21.07.15; 15 – 26.07.15; 16 – 04.08.15; 17 – 29.08.15; 18 – 30.08.15; 19 – 15.09.15; 20 – 20.09.15; 21 – 3.10.15; 22 – 5.10.15; на врезке – примеры изображения айсберга на снимках Landsat-8; *б* – изменение площади и продольного размера айсберга в ходе дрейфа; *в* – фотография айсберга с борта вертолёта, май 2014 г.

Fig. 3. An example of the iceberg drift monitoring. Iceberg was calved off Matusevich ice shelf in the same name fjord in 2012: *a* – trajectory of iceberg drift plotted using Landsat-8 images: *I* – stationary locations of iceberg during the winter periods (the iceberg frozen in ice); the Arab figures show iceberg position during the drift periods: 1 – 7.09.12; 2 – 1.07.13; 3 – 9.08.13; 4 – 11.08.13; 5 – 22.08.13; 6 – 27.08.13; 7 – 16.09.13; 8 – 24.07.14; 9 – 10.09.14; 10 – 11.09.14; 11 – 26.09.14; 12 – 16.06.15; 13 – 18.07.15; 14 – 21.07.15; 15 – 26.07.15; 16 – 04.08.15; 17 – 29.08.15; 18 – 30.08.15; 19 – 15.09.15; 20 – 20.09.15; 21 – 3.10.15; 22 – 5.10.15; on insert – examples of the iceberg image on Landsat-8 images; *б* – change of the area and horizontal sizes of the iceberg during the drift; *в* – the iceberg photo from board helicopter, May 2014

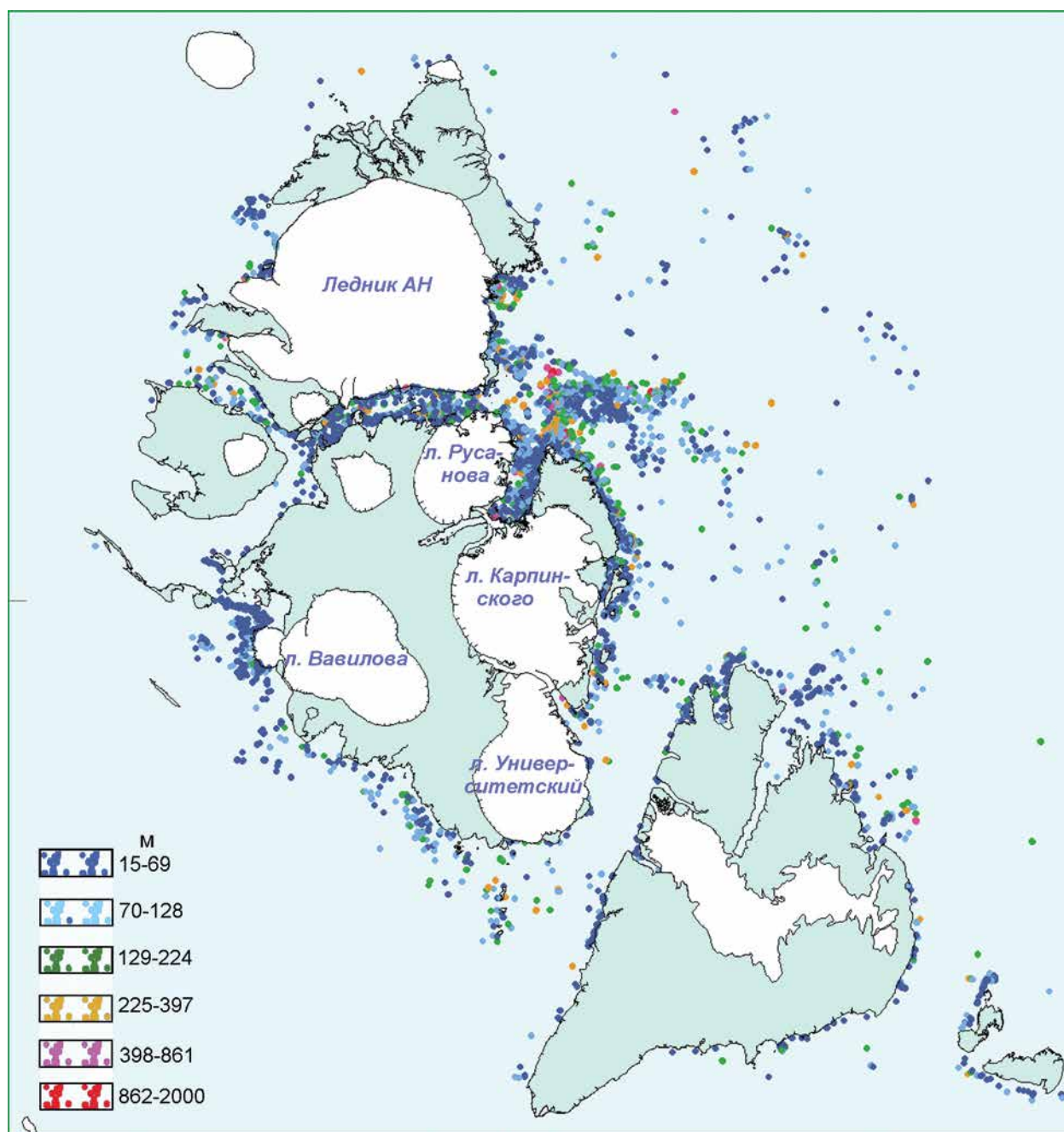


Рис. 4. Пример распределения по размерам айсбергов, обнаруженных у Северной Земли по спутниковым снимкам Landsat-8 в марте–апреле 2016 г.

Границы интервалов получены с использованием алгоритма классификации по методу естественных границ

Fig. 4. Example of iceberg classification by sizes. Icebergs were detected near the Severnaya Zemlya using Landsat-8 satellite imagery for period March–April 2016.

The interval boundaries were obtained using the algorithm of natural boundary classification

проводя ежесуточный спутниковый мониторинг района нахождения айсберга.

Для оценки айсберговой угрозы важно знать не только собственно районы наблюдения айсбергов, но и размеры айсбергов, обнаруженных

ранее в этих районах. По спутниковым данным можно выявить зоны моря, в которых сосредоточены наиболее крупные айсберги. Для примера на рис. 4 показана схема расположения у Северной Земли айсбергов, обнаруженных по спутни-

ковым данным весной 2016 г. и классифицированных по размерам с помощью программного пакета ArcGIS с применением алгоритма классификации по методу естественных границ Дженкса (Jenks' Natural Breaks algorithm) [12]. В этом методе границы классов определяются так, чтобы сгруппировать схожие значения и обеспечить максимальное различие между классами объектов. Таким образом удаётся провести границы там, где между объектами имеются относительно большие различия. При классификации айсбергов метод Дженкса был применён, исходя из ожидания, что разным айсбергогенерирующим ледникам свойственны разные характерные размеры образующихся айсбергов, благодаря чему можно, с некоторой долей вероятности, делать заключение о происхождении айсбергов, обнаруженных в открытом море. Наибольшая концентрация крупных айсбергов протяжённостью свыше 400 м, как следует из рис. 4, была зарегистрирована по спутниковым данным на выходе из фьорда Матусевича. Такая ситуация фиксировалась здесь по спутниковым наблюдениям в течение всего анализируемого периода 2011–2017 гг. Наиболее вероятным источником генерации таких крупных айсбергов в этом районе могут быть ледники фьорда Матусевича.

Айсберги, генерируемые шельфовым ледником во фьорде Матусевича. Обсуждение полученных результатов

На восточном побережье Северной Земли, во фьорде Матусевича (о. Октябрьской Революции), расположен единственный шельфовый ледник архипелага. Этот ледник известен как источник формирования крупных айсбергов. В 1950-х годах, например, при проведении аэросъёмки здесь был зарегистрирован айсберг протяжённостью 12 км [13]. История изучения оледенения Северной Земли в XX в. подробно изложена в работе В.С. Корякина [14]; в работах [15, 16] приведены результаты изучения шельфового ледника фьорда Матусевича с использованием спутниковых снимков разных лет. По данным аэрофотосъёмок в 1930–50-х годах шельфовый ледник фьорда Матусевича представлял собой ледяную плиту, подпитываемую за счёт выводных ледников двух ледниковых куполов — Русанова (ледники Журавлева, Ходова и Авсюка) и Карпинского (ледники Ска-

зочный, Полярников, ААНИИ и Исследователей) [14]. По оценкам, приведённым в публикации 1964 г. [17], площадь этой ледяной плиты составляла около 230 км², причём основной вклад — 175 км² — вносили ледники купола Карпинского. Распространению шельфового ледника во всём фьорде препятствовали острова Преграждающий и Трудный, затрудняющие обмен с морем Лаптевых. Анализ спутниковых наблюдений за 1970–2000-е годы показал, что наибольшее распространение ледника во фьорде отмечалось в 1973 г., когда фронт ледника выдвинулся на 12–15 км по сравнению с 1964 г., затем ледник начал постепенно отступать [14]. На начало 2011 г. площадь шельфового ледника, измеренная по снимку Landsat-7, составляла около 160 км². В аномально тёплый 2011 г., с тёплым, дождливым и ветреным летом, начался процесс разрушения шельфового ледника фьорда Матусевича. За год ледник потерял в результате откола айсбергов, их кусков и осколков, а также вследствие таяния часть своей поверхности площадью 17,4 км² (рис. 5).

Крупные айсберги, много лет неподвижно стоявшие в северной части фьорда, также начали движение и в течение 1–2 лет вышли из фьорда в открытое море. Аномально тёплым был и 2012 г., когда потери ледника при разрушении составили уже 60 км² (рис. 6). В последующие пять лет процесс распада ледника продолжался, но темпы разрушения замедлились. В 2013 г. ледник потерял 16 км² площади. В 2014 г. средняя летняя температура воздуха по данным полярной станции «Остров Голомянный» оказалась отрицательной [18] и сокращение площади ледника было минимальным: всего 1 км². В 2015–2017 гг. среднегодовые потери площади ледника равнялись 5 км². В 2017 г. оставшаяся площадь шельфового ледника составила, по данным съёмки Landsat-8, 48 км² (см. рис. 6).

При разрушении шельфового ледника во фьорде Матусевича образовались многочисленные айсберги, их куски и обломки. За перемещением 57 крупных айсбергов в 2011–2017 гг. можно было проследить по спутниковым данным. Наиболее крупные из них протяжённостью до 4 км образовались в 2011–2013 гг., их источником был ледник Исследователей. С 2014 г. ледник Исследователей стал обычным выводным ледником, крупных айсбергов здесь зафиксировано не было, а небольшие айсберги и их

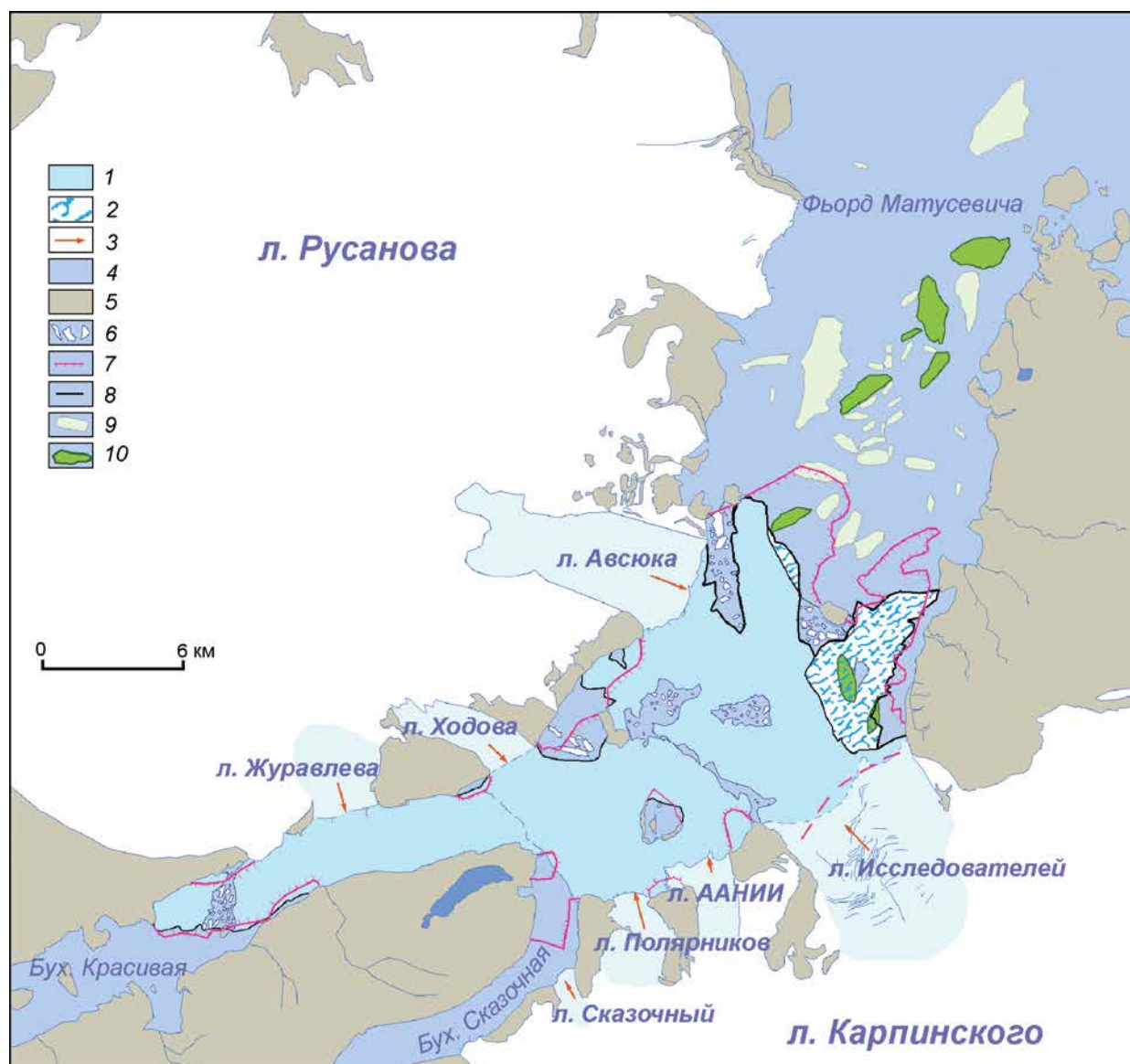


Рис. 5. Пример мониторинга изменений шельфового ледника фьорда Матусевича в 2011 г. и процессов айсбергообразования во фьорде. По данным спутниковых снимков Landsat-7.

1 – шельфовый ледник; 2 – участки шельфового ледника, утраченные в 2011 г., по материалам съёмок Landsat-7; 3 – направление стока льда с ледниковых шапок; 4 – открытая морская поверхность; 5 – суша; 6 – зоны дробления льда; 7 – край шельфового ледника по данным аэровизуальных наблюдений 1962 г. [13]; 8 – край шельфового ледника по состоянию на сентябрь 2011 г. по спутниковым изображениям Landsat-7; 9 – айсберги, находившиеся во льду фьорда Матусевича на начало 2011 г.; 10 – айсберги, покинувшие фьорд в 2011 г., слежение за которыми было возможно с помощью спутниковых данных видимого диапазона

Fig. 5. Example of Matushevich fjord shelf glacier changes and calving monitoring in 2011 using Landsat-7 imagery.

1 – ice shelf; 2 – ice shelf parts lost in 2011 on Landsat-7 data; 3 – direction of an ice flow from glacial caps; 4 – open sea surface; 5 – land; 6 – ice crushing zones; 7 – edge of an ice shelf according to aero visual observations in 1962 [13]; 8 – edge of an ice shelf in September 2011 according to Landsat-7 images; 9 – the icebergs which were in the ice of the fjord of Matushevich in the beginning of 2011; 10 – the icebergs which have left the fjord in 2011, tracking of which was possible by means of satellite data of visible spectral range

обломки оседали на мелководье возле фронта ледника. В 2015 г. крупный айсберг размером $2 \times 0,9$ км образовался уже за счёт ледника ААНИИ. В последующие два года айсберги

формировались в области шельфового ледника, близкой к леднику Ходова (см. рис. 6); максимальная длина айсбергов была при этом 1,5 км (2016 г.) и 1,3 км (2017 г.).

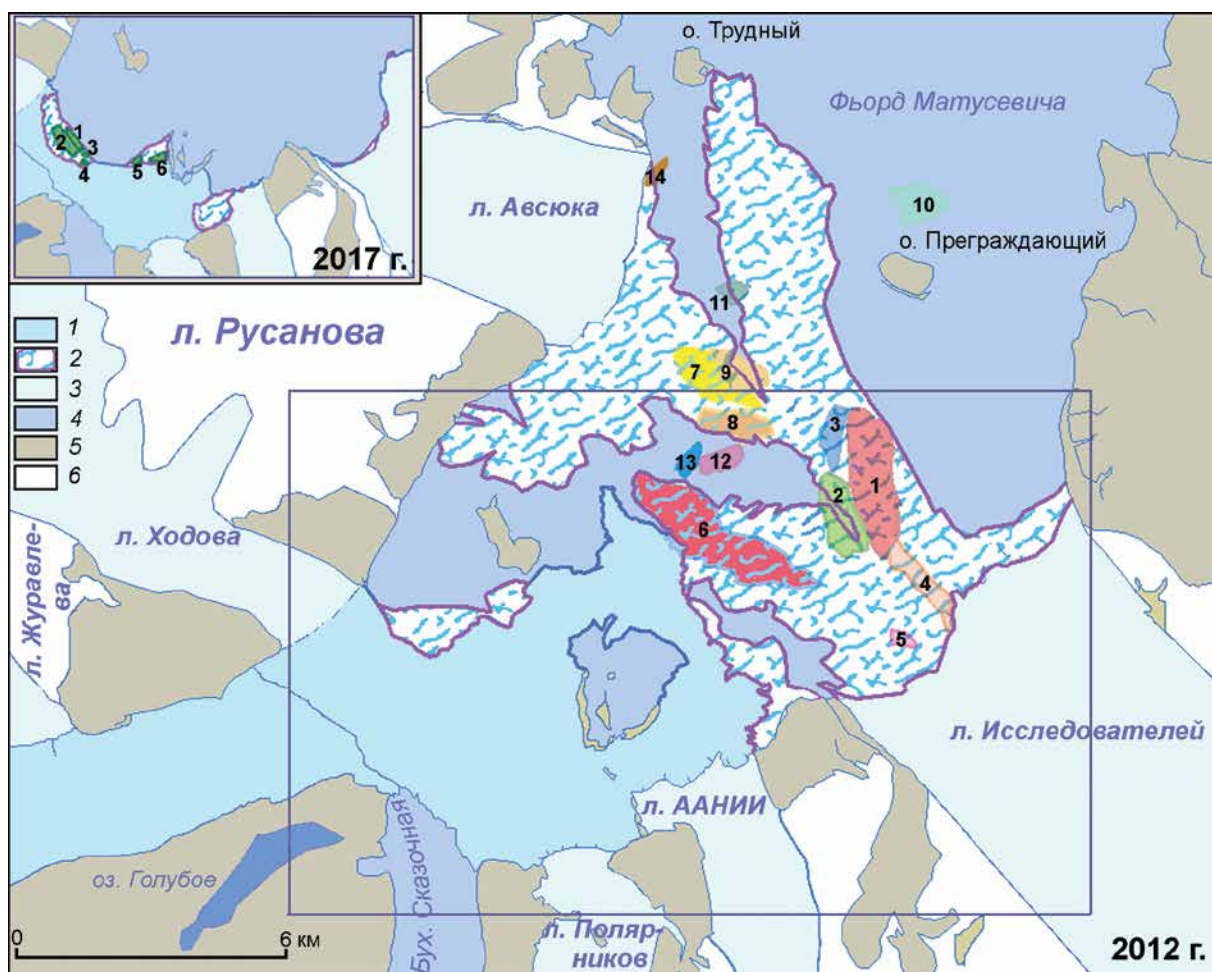


Рис. 6. Разрушение шельфового ледника фьорда Матусевича в 2012 и 2017 гг. с образованием крупных айсбергов. По данным спутниковых снимков Landsat-7, -8.

1 – шельфовый ледник; 2 – утраченная за год часть шельфового ледника; 3 – выводной ледник; 4 – открытая морская поверхность; 5 – суша; 6 – ледник. Цифрами отмечены крупные айсберги, образовавшиеся в результате откола от шельфового ледника в 2012 г. На врезке аналогичные сведения приведены по данным за 2017 г. Район, показанный на врезке, соответствует прямоугольнику на схеме 2012 г.

Fig. 6. Matushevich fjord shelf glacier decay in 2012 and 2017 with formation of large icebergs. According to Landsat-7, -8 data. 1 – ice shelf; 2 – the part of an ice shelf lost during the year; 3 – an output glacier; 4 – an open sea surface; 5 – land; 6 – an glacier. The figures have designated the large icebergs formed at shelf glacier decay in 2012. On insert in the upper left corner shows similar information for 2017. Location of the box corresponds to the box indicated in the chart for 2012

На рис. 7 дан пример трассирования основных путей дрейфа крупных айсбергов, обнаруженных в 2011–2017 гг. во фьорде Матусевича. Использование последовательных спутниковых снимков позволяет проследить за перемещением айсбергов и выявить преобладающие течения в исследуемом районе, обнаружить банки (на которых айсберги садятся на грунт). Формируясь во фьорде Матусевича, айсберги некоторое время циркулируют в самом фьорде, причём некоторые крупные айсберги остаются во фьорде несколько лет. Выйдя из фьорда, айсберги следуют либо в

пролив Шокальского и далее в пролив Вилькицкого, либо, двигаясь в юго-восточном направлении, огибают с востока о. Большевик. Часть айсбергов оседает на мелководье, иногда на несколько лет, постепенно разрушаясь.

Выводы

1. Использование автоматических процедур обнаружения айсбергов по спутниковым данным позволяет сократить время обработки данных и

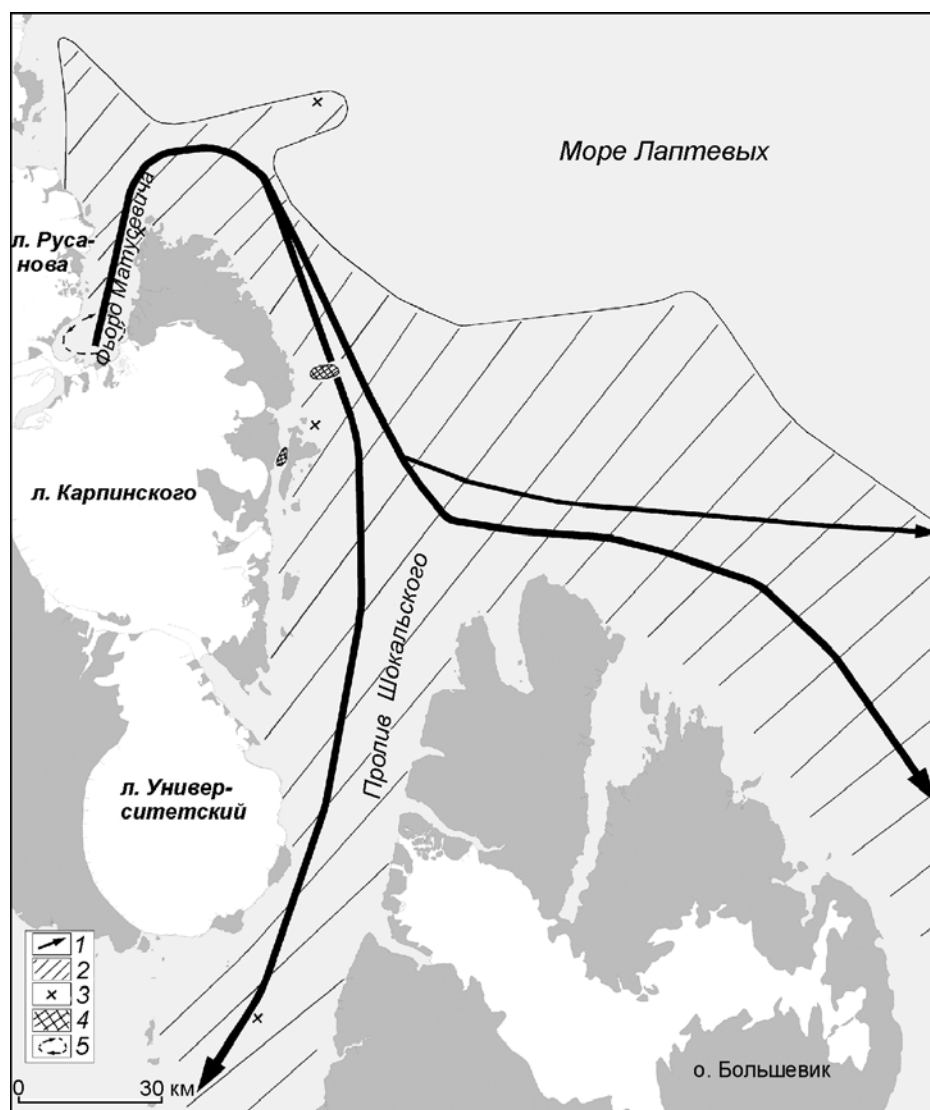


Рис. 7. Пути дрейфа айсбергов из района образования на шельфовом леднике фьорда Матусевича в 2011–2017 гг. По данным спутниковых снимков Landsat-7, -8, Sentinel-1.

1 – основные направления дрейфа айсбергов; 2 – ареал распространения айсбергов фьорда Матусевича; 3 – места разрушения айсбергов; 4 – места длительного нахождения айсбергов на мелководье; 5 – циркуляция айсбергов во фьорде

Fig. 7. Tracks of icebergs drift from Matusevich fjord shelf glacier in 2011–2017. On Landsat-7, -8, Sentinel-1 data.

1 – main directions of icebergs drift; 2 – area of the fjord of Matusevich icebergs spreading; 3 – places of icebergs decay; 4 – sites of long term icebergs location in shallow water; 5 – icebergs circulation in the fjord

уменьшить сроки оповещения потребителей об айсберговой угрозе, повысить качество обслуживания широкого круга потребителей такой информацией с обеспечением эффективности и безопасности работ на арктическом шельфе.

2. При мониторинге айсбергов с помощью спутниковых средств важно определить актуальное состояние айсберга: находится в припае; дрейфует в дрейфующем льду или на открытой воде; «сидит» на грунте в окружении дрейфующих льдов или на грунте среди открытой воды. Знание актуального («статусного») положения айсберга позволяет уточнить риски, связанные с возможным столкновением с ним охраняемых объектов.

3. По спутниковым наблюдениям 2011–2017 гг. установлено, что в этот период происходило интенсивное разрушение шельфового ледника фьор-

да Матусевича; площадь ледника сократилась со 160 до 48 км². Среди образовавшихся при разрушении шельфового ледника айсбергов отмечены объекты протяжённостью до 4 км – самые крупные айсберги из генерируемых ледниками Северной Земли. Крупные айсберги, образующиеся при разрушении шельфового ледника фьорда Матусевича, могут перемещаться в самом фьорде несколько лет, а затем либо дрейфуют в пролив Шокальского, либо, двигаясь в юго-восточном направлении, огибают с востока о. Большевик.

4. Оценка по многолетним спутниковым данным плотности распределения айсбергов в районе Северной Земли позволит оценить риск айсберговой угрозы для мореплавания и ведения хозяйственной деятельности на шельфе в этом регионе Арктики.

Благодарности. Исследование выполнено с помощью гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-30019) в Российском государственном гидрометеорологическом университете.

Литература

1. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Ред. В.Г. Смирнов. СПб.: ААНИИ, 2011. 239 с.
2. Миронов Е.У., Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Кулаков М.Ю., Демчев Д.М. Новые технологии обнаружения айсбергов и прогнозирования их дрейфа в западном секторе Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2 (104). С. 21–32.
3. Смирнов В.Г. Спутниковый мониторинг опасных ледяных образований в районах эксплуатационных работ на морских месторождениях углеводородного сырья // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 1. С. 103–120.
4. https://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/documents/PSTG-4_Doc_08-04_GlobSatObsReq-FloatingIce.pdf. Falkingham J.C. Global satellite observation requirements for floating ice. Focusing on Synthetic Aperture Radar. Contract report for Environment Canada, March 2014. 71 p.
5. Power D., Youden J., Lane K., Randell C., Flett D. Iceberg Detection Capabilities of RADARSAT Synthetic Aperture Radar // Canadian Journ. of Remote Sensing. 2001. V. 27 (5). P. 476–486.
6. Howell C., Bobby P., Power D., Randell C., Parsons L. Detecting Icebergs in Sea Ice Using Dual Polarized Satellite Radar Imagery // ICETECH 12. Paper No. ICETECH12-171-RF. 4 p.
7. Hannevik T.N.A. Literature review on ship and ice discrimination. Norwegian Defence Research Establishment (FFI). FFI Rapport 17/16310. 14 November 2017. 35 p.
8. Ressel R., Frost A., Lehner S. Navigation assistance for ice-infested waters through automatic iceberg detection and ice classification based on TerraSAR-X imagery // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. V. XL-7/W3, 36th Intern. Symposium on Remote Sensing of Environment, 11–15 May 2015, Berlin, Germany. P. 1049–1056.
9. Akbari V., Brekke C. Iceberg Detection in Open and Ice-Infested Waters Using C-Band Polarimetric Synthetic Aperture Radar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Society. 2018. V. 56. Is. 1. P. 407–421.
10. Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Кулаков М.Ю. Разработка экспериментального аппаратно-программного комплекса мониторинга айсбергов и

Acknowledgements. The work under this project is supported by the Russian Science Foundation through the Project № 17-77-30019 in Russian State Hydro-meteorological University.

References

1. *Sputnikovye metody opredeleniya kharakteristik ledyanogo pokrova morey*. Satellite methods for determination of sea ice cover characteristics. Ed by V.G. Smirnov. St. Petersburg: AARI Edition, 2011: 239 p. [In Russian].
2. Mironov E.U., Smirnov V.G., Bychkova I.A., Kulakov M.Yu., Demchev D.M. New technologies for detecting icebergs and predicting their drift in the Western sector of the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2015, 104 (2): 21–32. [In Russian].
3. Smirnov V.G. Satellite monitoring of dangerous ice features in the regions of the offshore oil and gas fields exploration and production. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2012, 1: 103–120. [In Russian].
4. https://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/documents/PSTG-4_Doc_08-04_GlobSatObsReq-FloatingIce.pdf. Falkingham J.C. Global satellite observation requirements for floating ice. Focusing on Synthetic Aperture Radar. Contract report for Environment Canada, March 2014: 71 p.
5. Power D., Youden J., Lane K., Randell C., Flett D. Iceberg Detection Capabilities of RADARSAT Synthetic Aperture Radar. Canadian Journ. of Remote Sensing. 2001, 27 (5): 476–486.
6. Howell C., Bobby P., Power D., Randell C., Parsons L. Detecting Icebergs in Sea Ice Using Dual Polarized Satellite Radar Imagery. ICETECH 12. Paper No. ICETECH12-171-RF. 4 p.
7. Hannevik T.N.A. Literature review on ship and ice discrimination / Norwegian Defence Research Establishment (FFI). FFI Rapport 17/16310. 14 November 2017: 35 p.
8. Ressel R., Frost A., Lehner S. Navigation assistance for ice-infested waters through automatic iceberg detection and ice classification based on TerraSAR-X imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. V. XL-7/W3, 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 11–15 May 2015, Berlin, Germany. P. 1049–1056.
9. Akbari V., Brekke C. Iceberg Detection in Open and Ice-Infested Waters Using C-Band Polarimetric Synthetic Aperture Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Society. 2018, 56 (1): 407–421.
10. Smirnov V.G., Bychkova I.A., Kulakov M.Yu. Development of experimental hardware and software complex for monitoring icebergs and prediction of their drift in the zone of the Spitsbergen archipelago and in the Western Arctic region of the Russian Federation.

- прогноза их дрейфа в зоне архипелага Шпицберген и в Западной арктической зоне РФ // Российские полярные исследования. 2016. № 4 (26). С. 34–35.
11. Обнаружение по спутниковым данным опасных ледяных образований вблизи инженерных объектов хозяйственной деятельности на шельфе арктических морей: Методическое пособие / Ред. В.Г. Смирнов. СПб.: ААНИИ, 2017. 76 с.
 12. *Smith M., Goodchild M., Longley P.* Geospatial Analysis. A Comprehensive Guide to Principle, Techniques and Software Tools. 5 edition. 2015. 748 p.
 13. *Дибнер В.Д.* О происхождении плавающих ледяных островов // Природа. 1955. № 5. С. 89–92.
 14. *Корякин В.С.* Что происходит с ледниками Северной Земли // Природа. 2014. № 11. С. 42–49.
 15. *Willis M., Melkonian A.K., Pritchard M.E.* Outlet glacier response to the 2012 collapse of the Matusevich Ice Shelf, Severnaya Zemlya, Russian Arctic // Journ. of Geophys. Research. Earth Surface. 2015. V. 120. Is. 10. P. 2040–2055. doi: 10.1002/2015JF003544.
 16. *Sharov A., Nikolskiy D., Troshko K., Zaprudnova Z.* Interferometric control for mapping and quantifying the 2012 breakup of Matusevich Ice Shelf, Severnaya Zemlya // Proc. of the Intern. Workshop «FRINGE 2015». ESA-ESPRIN, 23–27 Mars 2015. Frascati, Italy. ESA SP731, 9 p. doi: 13140/RG.2.1.2444.9121.
 17. *Зингер Е.М., Корякин В.С.* О современном оледенении Северной Земли // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва. 1964. № 6. С. 471–479.
 18. *Большаинов 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. // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 358–368. doi:10.15356/2076-6734-2016-3-358-368.
 11. *Rossiyskie Polyarnye issledovaniya.* Russian Polar Research. 2016, 4 (26): 34–35. [In Russian].
 11. *Obnaruzhenie po sputnikovym dannym opasnykh ledyanykh obrazovaniy vblizi inzhenernykh ob'ektov khozyaystvennoy deyatel'nosti na shelfe arkticheskikh morey.* Detection of dangerous ice features near the Arctic shelf engineering constructions with the use of satellite imagery: A methodical manual. Ed by V.G. Smirnov. St. Petersburg: AARI Edition, 2017: 76 p. [In Russian].
 12. *Smith M., Goodchild M., Longley P.* Geospatial Analysis. A Comprehensive Guide to Principle, Techniques and Software Tools. 5 ed. 2015: 748 p.
 13. *Dibner V.D.* On the origin of floating ice islands. *Priroda.* Nature. 1955, 5: 89–92. [In Russian].
 14. *Koryakin V.S.* What happens to the glaciers of Severnaya Zemlya. *Priroda.* Nature. 2014, 11: 42–49. [In Russian].
 15. *Willis M., Melkonian A.K., Pritchard M.E.* Outlet glacier response to the 2012 collapse of the Matusevich Ice Shelf, Severnaya Zemlya, Russian Arctic. Journ. of Geophys. Research. Earth Surface. 2015, 120 (10): 2040–2055. doi: 10.1002/2015JF003544.
 16. *Sharov A., Nikolskiy D., Troshko K., Zaprudnova Z.* Interferometric control for mapping and quantifying the 2012 breakup of Matusevich Ice Shelf, Severnaya Zemlya. Proc. of the Intern. Workshop «FRINGE 2015». ESA-ESPRIN, 23–27 Mars 2015. Frascati, Italy. ESA SP731, 9 p. doi: 13140/RG.2.1.2444.9121.
 17. *Zinger E.M., Koryakin V.S.* On modern glaciation of Severnaya Zemlya. *Izvestiya Vsesouznogo geographicheskogo obshchestva.* Proc. of the All-Union Geographical Society. 1964, 6: 471–479. [In Russian].
 18. *Bolshiyaynov D.Yu., Sokolov V.T., Yozhikov I.S., Bulatov R.K., Rachkova A.N., Fedorov G.B., Paramzin A.S.* Conditions of the alimentionation and the variability of glaciers of the Severnaya Zemlya Archipelago from observations of 2014–2015. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2016, 56 (3): 358–368. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-358-368.