

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-238-252>

УДК 551.467



Критерии айсберговой опасности в морях Арктической зоны Российской Федерации

И.А. Бычкова✉, К.Г. Кортикова, В.Г. Смирнов

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

✉bychkova@aari.ru

ID ИАБ, 0009-0005-9736-1930

Аннотация. Задачей исследования была разработка количественных критериев айсберговой опасности для морей Российской Арктики, основанных на результатах статистической обработки материалов регулярной спутниковой съемки. В качестве источника информации использовалась некоммерческая информация видимого диапазона с ИСЗ Landsat-8 (пространственное разрешение 15 м) за 2014–2023 гг. Критерии айсберговой опасности предложено выражать в баллах. Основным критерием является величина среднесуточной плотности айсбергов в квадратах регулярной сетки, полученная для того или иного месяца (сезона) года и выражаемая по 5-балльной шкале. В качестве дополнительных критериев использованы: фиксация наблюдения в квадрате сетки айсбергов длиной более 200 м (обширные айсберги, по классификации Всемирной метеорологической организации, ВМО), айсбергов с высотой надводной части более 25 м, айсбергов, сидящих на грунте (айсберговые ловушки), и айсбергов с высокими скоростями дрейфа (>1 км/ч). Дополнительные критерии оценены в 1 балл шкалы айсберговой опасности. Для обнаружения айсбергов на снимках использована методика, основанная на статистических критериях поиска градиентных зон при анализе двумерных полей спутниковых изображений. Для автоматизированного поиска айсбергов, сидящих на мели среди дрейфующих льдов, применена сверточная нейронная сеть, построенная по архитектуре U-Net. Даны примеры применения разработанных критериев для района Северной Земли. Показана возможность районирования акватории по степени айсберговой опасности с использованием предложенных критериев.

Ключевые слова: айсберговая опасность, арктические моря, видимый диапазон, сверточная нейронная сеть, спутниковый мониторинг

Для цитирования: Бычкова И.А., Кортикова К.Г., Смирнов В.Г. Критерии айсберговой опасности в морях Арктической зоны Российской Федерации. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):238–252. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-238-252>

Поступила 05.04.2024

После переработки 13.05.2024

Принята 17.05.2024

Criteria of iceberg hazard in the seas of the Russian Federation Arctic zone

Irina A. Bychkova✉, Karina G. Kortikova, Vladimir G. Smirnov

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

✉bychkova@aari.ru

 IAB, 0009-0005-9736-1930

Abstract. The aim of the study was to develop quantitative criteria of iceberg hazard for the seas of the Russian Arctic based on the results of statistical processing of the data of regular satellite surveys. The study used non-commercial data of the visible spectral range from the Landsat-8 satellite (spatial resolution of 15 m) for 2014–2023. It is proposed that the criteria of iceberg danger be expressed in points. The main criterion is the value of the average daily density of icebergs in squares of a regular grid obtained for a particular month (season) of the year and expressed on a 5-point scale. Additional criteria included registration in the iceberg grid with a length of more than 200 m (extensive icebergs according to the classification of the World Meteorological Organization, WMO), icebergs with a surface height of more than 25 m, grounded icebergs (iceberg traps), and icebergs with high drift speeds (>1 km/hour). The additional criteria are estimated at 1 point on the iceberg hazard scale. To detect icebergs in the images, a technique was used based on statistical criteria for searching for gradient zones in the analysis of two-dimensional fields of satellite images. A convolutional neural network based on the U-Net architecture was used to automate the detection of grounded icebergs among drifting ice floes. Examples are given of the application of the criteria developed to the Severnaya Zemlya region. The possibility is discussed of zoning the water area according to the degree of iceberg hazard using the criteria suggested.

Keywords: Arctic seas, convolutional neural network, degree of iceberg hazard, satellite monitoring, visible spectral range

For citation: Bychkova I.A., Kortikova K.G., Smirnov V.G. Criteria of iceberg hazard in the seas of the Russian Federation Arctic zone. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):238–252. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-238-252>

Received 05.04.2024

Revised 13.05.2024

Accepted 17.05.2024

Введение

Как показал опыт анализа айсберговой угрозы в районах Карского моря и моря Лаптевых, для айсберговой опасности характерна высокая межгодовая изменчивость, во многом связанная с изменчивостью климатических факторов, преобладанием тех или иных атмосферных процессов в конкретный год наблюдения. Поэтому для оценки потенциальной айсберговой опасности в регионе интереса необходимо использовать усредненные статистические характеристики, полученные за статистически значимый период наблюдения. В качестве таких характеристик могут быть выбраны количество айсбергов в квадрате регулярной сетки за определенный промежуток времени, максимальный размер обнаруженного айсберга (длина), скорость перемещения, высота надводной части айсберга и др. Необходимо подчеркнуть, что для оценки статистических характеристик опасных ледяных образований важно использовать достоверные источники информации и выполнять регулярный мониторинг объектов. На настоящее время опубликован ряд работ, авторы которых предложили свои критерии айсберговой опасности в Арктике, основанные на имеющихся базах данных об айсбергах, включающих данные наблюдения различных источников, в том числе судовые и авианаблюдения. Однако данные таких наблюдений получены не в ходе

регулярных мониторинговых работ, а собраны случайным образом, в частности во время проведения экспедиций, выполнявшихся эпизодически в отдельных районах Арктики. Так, в работе [1] основным показателем годовой айсберговой активности в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ), расположенного в Баренцевом море, предложено считать количество эпизодов в году айсберговой активности в окрестностях ШГКМ. Под эпизодом (Θ) понимается случай зафиксированного нахождения айсберга (или группы айсбергов) в какую-либо дату в квадрате регулярной сетки размером 2° по широте и 2° по долготе. Анализ материалов базы данных из разных источников (судовые наблюдения, авиаразведка), собранной за период 1950–1990 гг., позволил авторам [1] прийти к критериям айсберговой активности, определяемым по наблюдениям в течение одного календарного года:

- малая айсберговая активность, $\Theta \leq 5$;
- нормальная айсберговая активность, $5 < \Theta \leq 18$;
- высокая айсберговая активность, $18 < \Theta \leq 24$;
- аномальная айсберговая активность, $\Theta > 24$.

Для ранжирования календарных годов с точки зрения айсберговой активности авторы работы [1] предложили в качестве еще одного критерия использовать среднее за год число фиксации айсбергов (A) на один эпизод наблюдений (D): $D = A/\Theta$.

Д.А. Онищенко, рассматривая айсберговую опасность для добывающей платформы ШГКМ в Баренцевом море, предложил использовать в качестве характеристик айсберговой опасности следующие вероятностные оценки:

- вероятность столкновения платформы с айсбергом в течение одного года;
- вероятность столкновения в течение года с айсбергом, имеющим размеры или массу не меньше заданного значения;
- вероятность столкновения в течение года с айсбергом, имеющим кинетическую энергию не ниже заданной;
- вероятность для айсберга, подошедшего к платформе на расстояние L , столкнуться с платформой;
- вероятность столкновения с айсбергом в течение года, при котором глобальная нагрузка на платформу будет не ниже заданной [2, 3].

Для получения вероятностных оценок столкновения платформы ШГКМ с айсбергом Онищенко использовал историческую базу наблюдений айсбергов за 1881–1991 гг., подготовленную в ААНИИ [4]. Для ранжирования различных регионов Арктики по уровню айсберговой опасности Д.А. Онищенко предложил использовать пространственную плотность айсбергов (среднее число айсбергов в пределах данной области в конкретный момент времени, отнесенное к площади) [2].

Существует также подход к оценке айсберговой опасности через айсберго-продуктивность ледников [5]. Подход основан на моделировании дрейфа айсбергов. По известному стоку массы льда конкретного ледника рассчитывается время формирования айсберга определенной длины, задаваемой случайным образом по распределению Вейбулла. Время между отёлами рассчитывается как отношение объема сгенерированного айсберга к продуктивности ледника. Масса айсберга определяется по ранее установленным регрессионным уравнениям [6]. Далее выполняется расчет дрейфа айсберга по модели, получаемые ежечасные координаты айсберга сортируются по ячейкам сеточной области с шагом 12,5 км, оценивается время нахождения айсбергов в каждой ячейке. Айсберговая опасность (вероятность

встречи с айсбергом) при таком подходе определяется как отношение суммарного времени нахождения айсбергов в каждой ячейке сеточной области модели к общему времени реализации модели [5]. Разработчики этого метода считают полученные ими значения айсберговой опасности заниженными и объясняют это тем, что не для всех ледников имеются в настоящее время оценки айсберговой продуктивности [5].

Предложен еще один метод оценки айсберговой опасности — через расчет по модели условной вероятности [7]. В этой модели принято допущение о том, что в точке генерации всегда присутствует айсберг, то есть условная вероятность встречи айсберга у ледника всегда равна единице, а процесс выноса айсберга из начальной ячейки не прерывается, на место ушедшего айсберга сразу приходит новый. По мере удаления от начальной точки вероятность встречи айсберга снижается в соответствии с гидрометеорологическими условиями. Далее условная вероятность встречи айсберга умножается на вероятность появления айсберга в точке генерации, поля полных вероятностей суммируются [5]. Для практической реализации метода необходимы достоверные оценки вероятности появления айсберга в районе конкретного ледника в заданное время, что само по себе представляет сложную задачу.

В работе британских ученых [8] под айсберговой опасностью понимается вероятность столкновения судна с айсбергом. Для оценки этой вероятности необходимы сведения из достоверных источников информации (в частности, данных дистанционного зондирования) о плотности айсбергов в районе наблюдений. В основе предложенной методики лежит модель дрейфа айсберга, в которой используется океаническая модель PS4, учитывается таяние айсберга при дрейфе. Расчеты выполнены авторами [8] для пяти конкретных точек на судоходных трассах в районе Фолклендских островов. Влияние морского льда на дрейф айсбергов не рассматривается.

Анализ существующих подходов к оценке айсберговой опасности показывает необходимость формирования репрезентативной базы архивных наблюдений айсбергов, выполненных на регулярной основе по квадратам картографической сетки. Оптимальным способом получения таких результатов может быть использование дистанционных средств наблюдения, преимущественно спутниковых. Определенным ограничением при этом является необходимость применять для анализа только сопоставимые источники спутниковых данных. Исключаются, например, ситуации одновременного использования в базе данных снимков разного пространственного разрешения, так как это приводит к существенной разнице как в количестве айсбергов, обнаруженных разными спутниковыми средствами наблюдения в квадратах сетки, так и в значениях геометрических параметров [9]. Как показал опыт обработки доступных некоммерческих квазисинхронных спутниковых изображений одного и того же района, полученных с оптических средств наблюдения (видимый диапазон, разрешение 15 м) и с радиолокатора (размер пикселя 40 м), данные видимого диапазона позволяют более надежно оценить реальные параметры айсбергов и уменьшить число ложных фиксаций айсбергов. Радиолокационные средства наблюдения все же позволяют при этом получить качественную оценку распределения плотности айсбергов на уровне индикаторов — высокая плотность, низкая плотность [9]. Разумеется, радиолокационная съемка высокого пространственного разрешения (метры) позволяет получить более достоверную оценку параметров обнаруженных айсбергов, однако сформировать репрезентативную базу таких снимков за ряд лет по какому-либо протяженному арктическому региону в настоящее время невозможно,

поскольку такая съемка выполняется только по предварительному заказу и многие районы Арктики такой съемкой не покрываются. Тем более следует учесть, что собственный РЛ-спутник в РФ появился только в 2023 г.

Таким образом, для формирования спутниковой базы данных об айсбергах наиболее предпочтительным источником информации в настоящее время являются снимки видимого диапазона с некоммерческих спутников с достаточным пространственным разрешением (10–15 м) и желательным более длительным периодом функционирования спутника с момента его запуска. Этим условиям лучше всего удовлетворяет спутниковая система Landsat-8 (9), данные с которой доступны за период с лета 2013 г. по настоящее время. То есть при использовании данных спутников Landsat-8 (9) может быть сформирована база наблюдений айсбергов за 10 лет (2014–2023 гг.) и по этим данным могут быть получены статистические оценки айсберговой опасности.

Методика исследований и материалы наблюдений

Для оценки айсберговой угрозы в морях Российской Арктики использовались спутниковые снимки, полученные со спутника Landsat-8 за 2014–2023 гг.

Статистические характеристики айсбергов были рассчитаны для квадратов географической сетки со стороной 25 км, охватывающей районы айсберговой опасности в акватории Северного морского пути (СМП). Для каждого квадрата сетки на заданный месяц наблюдения подсчитывается общее число обнаруженных айсбергов (N) и число информативных съемочных дней (d). Выполняется расчет плотности айсбергов $k = N/d$, и для каждого квадрата вычисляется среднее значение длины и ширины айсбергов и максимальное значение длины обнаруженного айсберга.

Число информативных съемочных дней для снимков видимого диапазона определяется как разность количества съемок в месяц, при которых квадрат попал в поле зрения (P), и количества съемок, во время которых квадрат был закрыт облачностью (O): $d = P - O$.

Для квадратов сетки в прибрежных зонах архипелагов, содержащих одновременно и морские акватории, и территории суши, число обнаруженных по спутниковым данным айсбергов умножается на коэффициент, равный отношению площади полного квадрата сетки и площади морской поверхности в данном квадрате (S_i). Плотность айсбергов в таких квадратах определяется как: $k = (N/d) \cdot (625/S_i)$.

Критерии айсберговой опасности

Для количественной оценки айсберговой опасности предлагается использовать в качестве основного критерия среднемесячную величину плотности айсбергов, наблюдавшихся в квадрате картографической сетки по спутниковым данным за 1 сутки. В работе расчеты приведены для квадрата сетки 25×25 км. Предлагаемые критерии айсберговой опасности определяются в баллах. Алгоритм расчета айсберговой опасности применяется в двух вариантах — для зимне-весеннего периода и для летне-осеннего.

Летне-осенний период

В летне-осенний период по снимкам регистрируются айсберги на открытой воде, айсберги в дрейфующем льду и айсберги, сидящие на грунте на открытой воде и среди дрейфующих льдов. Для каждого квадрата сетки происходит накопление случаев наблюдения айсбергов за выбранный временной интервал (месяц года). Оценка айсберговой опасности производится с помощью балльной шкалы.

Квадратам сетки, по которым за период наблюдения (2014–2023 гг.) не было обнаружено айсбергов, присваивается значение 0 баллов айсберговой опасности; для квадратов, в которых в среднем за сутки по данным 2012–2022 гг. обнаружено 1–5 айсбергов, присваивается 1 балл опасности; для квадратов со средним ежесуточным числом айсбергов 6–49 — 2 балла; 50–100 — 3 балла; 101–200 — 4 балла; более 200 айсбергов — 5 баллов.

Дополнительно добавляется по 1 баллу, если в квадрате наблюдались обширные айсберги (>200 м), либо айсберги с высотой надводной части более 25 м, либо айсберги, сидящие на грунте, а также айсберги, дрейфующие с высокими скоростями (>1 км/ч). Дополнительные баллы присваиваются в случае обнаружения хотя бы одного айсберга, удовлетворяющего условиям по каждой из перечисленных категорий.

Зимне-весенний период

В зимне-весенний период айсберги фиксируются в припае и среди дрейфующих льдов (в том числе сидящие на грунте). Айсберги в припае блокируются припайным льдом и несколько месяцев имеют на снимках постоянное местоположение. Для регистрации припайных айсбергов достаточно одной спутниковой съемки по каждому квадрату сетки. Критериями айсберговой опасности являются те же, что и перечисленные выше для летне-осеннего периода. Вне припая процедура определения количества айсбергов в квадратах сетки аналогична применяемой для летне-осеннего сезона. Квадраты, в которые попадает и припайный лед, и дрейфующий (или открытая вода), рассматриваются как совокупность 2 участков наблюдений — район с постоянным числом объектов (неподвижные айсберги) и район с переменным числом (дрейфующие айсберги и сидящие на мели).

Длина айсберга как дополнительный критерий айсберговой опасности

Дополнительный критерий айсберговой опасности, зависящий от размера объекта, был выбран исходя из известной критической массы айсберга, особо опасной для морских инженерных сооружений. При проектировании сооружений нефтедобывающих комплексов на шельфе арктических морей критической айсберговой угрозой считается столкновение с айсбергом массой 1 млн т. Так, канадская нефтяная платформа гравитационного типа «Хайберния» рассчитана на возможность столкновения без катастрофических последствий с айсбергом массой 1 млн т [2].

Для определения массы айсберга с использованием спутниковой информации необходимо знать площадь его сечения по ватерлинии и высоту айсберга, включающую надводную и подводную части. Высота надводной части айсбергов определялась по длине тени от них, измеренной по спутниковому снимку и известной из метаданных снимка высоте солнца над горизонтом. Средняя высота надводной части обширных айсбергов была оценена для целей настоящей работы по спутниковым наблюдениям айсбергов, дрейфовавших в 2015 г. в море Лаптевых. По выборке из 40 айсбергов эта высота составила 11 м. Для расчета общей высоты айсберга использована оценка соотношения надводной и подводной частей айсберга как 1:4, полученная И.В. Бузиным с соавторами [4] по результатам натурных исследований в Баренцевом море. Форма айсберга при этом не учитывается, хотя наблюдения у берегов Канады показали, что существует зависимость соотношения высоты надводной и подводной частей айсберга от его формы. В частности, например, общая высота остроконечного айсберга вдвое меньше, чем у столообразного айсберга, при одинаковой высоте надводной части [10].

Соотношение длины (L) и ширины (d) арктических айсбергов, полученное авторами при анализе данных спутникового мониторинга айсбергов в море Лаптевых, в среднем близко к значению 2:1. При этих допущениях масса обширного айсберга длиной 200 м при представлении как призмы с прямоугольной площадью сечения по ватерлинии, с учетом плотности морского льда $0,92 \text{ т/м}^3$, составит $Ld5hp = 200 \cdot 100 \text{ м}^2 \cdot 55 \cdot 0,92 = 1\,012\,000 \text{ т}$.

В реальных условиях, конечно, площадь сечения айсберга отличается от прямоугольной, и описываемый айсберг — только абстрактное объемное тело для упрощения расчетов. Для проверки гипотезы о том, что обширные айсберги с длиной более 200 м являются миллионниками (т. е. их масса превосходит 1 млн т), была исследована выборка из 30 айсбергов с длиной от 200 до 375 м, обнаруженных по спутниковым данным в море Лаптевых в 2015 г. Масса айсбергов рассчитывалась с учетом сделанных выше предположений, по приближенной оценке. Средняя масса айсбергов составила 1,6 млн т. Масса 6 айсбергов была ниже 1 млн т, наименьший из

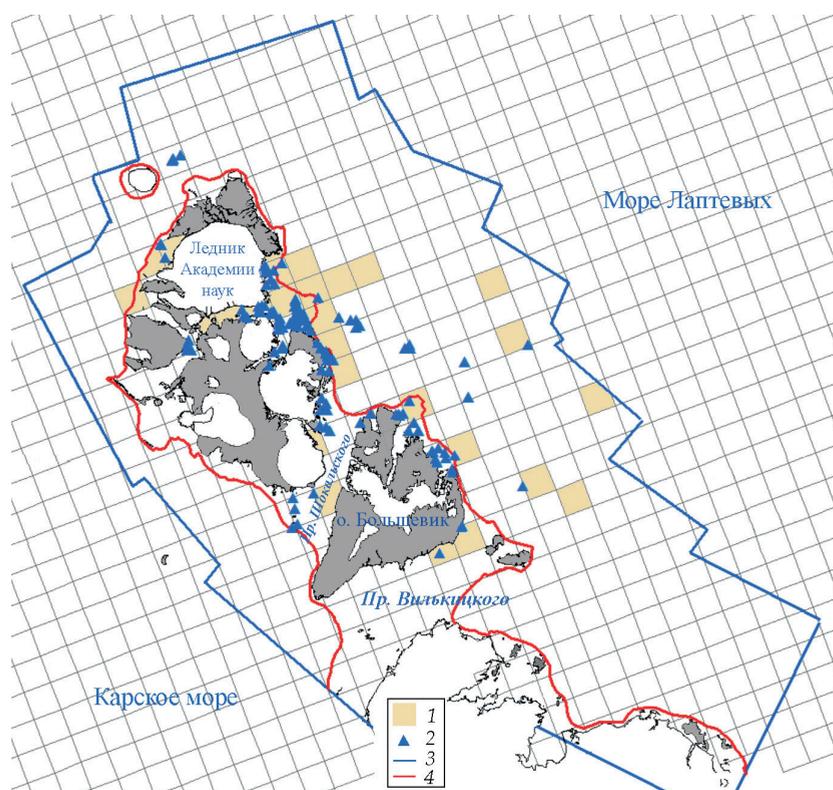


Рис. 1. Районы обнаружения близ Северной Земли по спутниковым снимкам Landsat-8 обширных айсбергов и айсбергов с надводной частью выше 25 м. Весна 2020 г.

1 — районы нахождения айсбергов длиной свыше 200 м; 2 — районы нахождения айсбергов с надводной частью свыше 25 м; 3 — контуры района, охваченного съемкой Landsat-8; 4 — граница припая

Fig. 1. Areas of detection of extensive icebergs and icebergs with a sale height of more than 25 m near Severnaya Zemlya according to Landsat-8 satellite images. Spring 2020.

1 — areas of icebergs with a length of over 200 m; 2 — areas of icebergs with a sale height of more than 25 m; 3 — contours of the area covered by Landsat-8 images; 4 — fast ice boundary

них имел расчетную массу 0,5 млн т. Масса наибольшего айсберга (230×130 м, высота 22 м) была оценена в 4,5 млн т.

На рис. 1 для примера показаны районы, в которых весной 2020 г. по спутниковым снимкам были обнаружены айсберги длиной свыше 200 м.

Высота надводной части айсберга как дополнительный критерий айсберговой опасности

Большая часть обнаруженных обширных айсбергов имела столообразную форму, такие айсберги отличает сравнительно невысокая надводная часть в сравнении с айсбергами ряда других форм, в частности пирамидальных. Считается, что высота надводной части арктических айсбергов преимущественно ниже 25 м [11]. Однако в районе Северной Земли по спутниковым наблюдениям доля высоких айсбергов может быть достаточно существенна. Так, в 2020 г. из 4241 айсберга 134 (3,2 %) имели высоту надводной части от 25 до 46 м, в среднем 30 м. Распространение таких айсбергов по акватории на примере 2020 г. показано на рис. 1. При тех же допущениях по соотношению длина/ширина и надводная/подводная части айсбергов, как это было принято выше, критической массы в 1 млн т высокие (пирамидальные и т. п.) айсберги высотой 30 м достигают при длине в 115 м. Высота надводной части айсберга 25 м была выбрана в качестве дополнительного критерия айсберговой опасности. По спутниковым данным видимого диапазона этот критерий определяется в зимне-весенний период, когда тень от айсберга различима на фоне более яркого льда. Летом идентифицировать тень от айсберга на фоне открытой воды (низкой яркости на снимке) не удастся.

Айсберговые ловушки как дополнительный критерий айсберговой опасности

Еще один предложенный критерий айсберговой опасности — это наличие в квадрате сетки в какой-либо год (или годы) наблюдения айсберга, сидящего на грунте. Этот факт отражает наличие в квадрате наблюдения ловушек для айсбергов, при попадании в которые вероятность столкновения с айсбергом повышается.

Для выявления районов, в которых айсберги садятся на грунт, была применена методика обнаружения таких айсбергов по разводьям в ледяном покрове, которые образуются при натекании дрейфующего льда на неподвижный айсберг. Направление разводий совпадает с направлением дрейфа льда. Методика основана на анализе спутниковых снимков методом сверточных нейронных сетей. Наиболее эффективна методика в начале весны. В этот период в марте-апреле в морях Арктической зоны РФ ледяной покров достигает максимального развития за сезон. Толщина дрейфующего однолетнего льда увеличивается до 1 м и более. В то же время дрейфующие айсберги эпизодически садятся на мели и становятся препятствием для дрейфующих льдов. Неподвижные айсберги прорезают надвигающийся на них лед, в результате за каждым таким айсбергом образуется разводье. Как показал анализ спутниковых снимков Landsat-8 за 2014–2023 гг. по району моря Лаптевых у побережья Северной Земли, направление такого разводья совпадает с направлением дрейфа льда, а ширина соответствует сечению боковой поверхности айсберга, взаимодействующей с натекающим ледяным потоком. При сохранении направления дрейфа льда в течение нескольких суток длина разводья может достичь 10 км. Разводья таких размеров могут быть легко обнаружены экспертом на спутниковых снимках. Таким образом, для обнаружения разводий за неподвижными айсбергами в дрейфующем льду может быть использован косвенный признак: разводья за айсбергами в районе мониторинга

параллельны друг другу, а их направление совпадает с направлением общего дрейфа льда. Этот признак был использован для автоматизированного обнаружения разводий подобного типа методом сверточных нейронных сетей.

Нейросетевой алгоритм поиска на изображении неподвижных айсбергов, стоящих в дрейфующем льду, реализует обнаружение однонаправленных разводий, образующихся за яркими квазиточечными объектами на снимке. Направление искомым разводий задается равным направлению дрейфа льда в конкретном районе моря в рассматриваемый период.

Алгоритм поиска неподвижных айсбергов в дрейфующем льду основан на сверточной нейронной сети архитектуры U-Net, настроенной по трем каналам видимого диапазона аппаратуры OLI Landsat-8: 4-й (0,630–0,680 мкм), 3-й (0,525–0,600 мкм) и 2-й (0,450–0,515 мкм). Пространственное разрешение снимков 30 м.

Обученная нейросеть выделяет на спутниковом изображении 2 класса: разводья и неразводья. В качестве функции потерь была выбрана бинарная кросс-энтропия, позволяющая эффективно оценить разницу между истинными и предсказанными вероятностями каждого класса. Набор данных, использованный для работы нейросети, состоял из 65949 RGB-фрагментов изображений размером 256×256 пикселей. Соответствующие им маски были представлены в бинарном формате со значениями 0 и 1. Для обучения нейронной сети было выделено 52760 изображений, а для валидации — 13189. Области суши и зоны сплошной облачности на снимках ма-

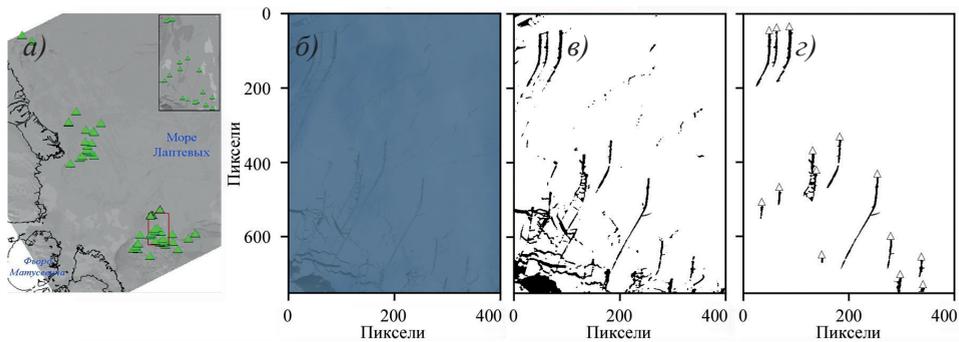


Рис. 2. Пример обнаружения айсбергов, сидящих на грунте, по спутниковым снимкам Landsat-8, с помощью метода сверточных нейронных сетей:

a — исходный снимок, 15 марта 2015 г., восточное побережье Северной Земли; треугольники обозначают обнаруженные айсберги на грунте; на врезке — увеличенный фрагмент снимка, обозначенный красной рамкой; *б* — фрагмент снимка Landsat-8, в формате RGB за 15 марта 2015 г. (положение фрагмента обозначено красной рамкой на рис. 2*a*); *в* — результаты обнаружения разводий на фрагменте снимка Landsat-8 (рис. 2*б*) с помощью сверточной нейронной сети; *г* — обнаружение разводий за айсбергами, стоящими на грунте, с помощью фильтрации схемы разводий (рис. 2*в*) по направлению «север–юг»

Fig. 2. Example of the detection of grounded icebergs from Landsat-8 satellite images using the convolutional neural network method:

a — the original image, March 15, 2015, the eastern coast of the Severnaya Zemlya; the triangles indicate grounded icebergs; the inset shows an enlarged fragment of the image, indicated by a red frame; *b* — a fragment of the image for March 15, 2015 (the position of the fragment is indicated by a red frame in Fig. 2*a*); *c* — leads behind grounded icebergs detected by a convolutional neural network. March 15, 2015 (Fig. 2*б*); *d* — leads behind grounded icebergs detected by Fig. 2*в* after filtering in the north-south direction; the triangles indicate grounded icebergs

скировались. Результатом работы сети является изображение, визуализирующее вероятность наличия разводий. Значения вероятности, близкие к 1, указывают на наличие трещин во льду (объектов сегментации). Для выделения класса разводий и получения бинарной маски (рис. 2в) был установлен порог вероятности в 0,5, превышение которого соответствовало высокой вероятности принадлежности пикселя к классу разводий.

Для оценки производительности модели во время обучения были использованы две метрики: IoU (Intersection over Union) и accuracy (точность). Метрика accuracy измеряет долю правильно классифицированных пикселей из общего числа пикселей изображения. На валидационном наборе данных измеренная точность составила 0,97, что соответствует хорошему уровню классификации модели.

Метрика IoU (Intersection over Union) является частным случаем индекса Жаккара и позволяет оценить качество сегментации изображений. Формула для функции IoU вычисляет коэффициент пересечения и объединения (IoU) для двух масок (истинной и предсказанной) на пиксельном уровне, а затем суммирует эти значения по всем пикселям изображения. Результат делится на сумму значений истинной и предсказанной масок:

$$\text{IoU} = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|},$$

где A — истинные значения, B — предсказанные значения.

В итоге функция возвращает среднее значение коэффициента пересечения и объединения для всех элементов в пакете данных. Оцененное значение IoU составило 0,52.

Обученная нейросеть успешно распознает разводья во льду (рис. 2в). После фильтрации обнаруженных разводий с выделением разводий, совпадающих с направлением дрейфа льда, на обработанном снимке остаются только разводья, образованные при прохождении дрейфующего льда через район расположения айсбергов, стоящих на мели. Так, на фрагменте снимка Landsat-8 за 15 марта 2015 г. (рис. 2а, б) ледовый эксперт обнаружил 17 стоящих на грунте айсбергов, размером от 60 до 168 м каждый. Нейросеть после фильтрации найденных разводий по направлению «север–юг» обнаружила 15 однонаправленных разводий, отходящих от 15 айсбергов (рис. 2г).

Скорость айсберга как дополнительный критерий айсберговой опасности

Кинетическая энергия айсберга является важным показателем его опасности в случае столкновения с объектом морской инфраструктуры или с судном. По спутниковым данным скорость перемещения крупного айсберга может быть определена по серии последовательных снимков путем создания шаблона этого айсберга и дальнейшего его отслеживания. В видимом диапазоне спектра слежение за айсбергом из-за облачности выполняется в неэквидистантные промежутки времени, поэтому могут возникать ситуации, когда айсберг может быть «потерян» (ушел из зоны съемки, разрушился с образованием мелких обломков, перевернулся...). Как правило, наблюдение за дрейфом крупного айсберга (длиной более 100 м) по спутниковым данным удастся осуществить за промежуток времени от 1 до 3,5 мес. Весной айсберги во многих районах Арктики перемещаются вместе с дрейфующим однолетним льдом сплоченностью выше 90 %, скорость дрейфа айсбергов равняется скорости дрейфа ледяных полей. По мере разрушения ледяного покрова летом айсберги дрейфуют

самостоятельно на открытой воде или среди разреженного льда. Инструментальные наблюдения по данным радиомаяков (с дискретностью 1 час), выполненные в 2013–2015 гг. ПАО «НК «Роснефть»», показали, что средняя скорость дрейфа ледяных полей на акваториях морей Карского и Лаптевых практически не меняется и составляет 16–17 см/с [11–14]. В то же время наибольшая известная зарегистрированная инструментальными средствами скорость дрейфа арктических айсбергов составляет 1–1,1 м/с (измерения радиомаяков в Баренцевом море) [14]. Такая скорость дрейфа айсбергов, рассчитанная по спутниковым данным, не встречалась. В настоящей работе максимальная скорость дрейфа айсбергов в море Лаптевых у Северной Земли, по спутниковым данным 2015–2020 гг., составила 34 см/с (1,2 км/ч). Однако следует учесть, что данные буев и спутниковые наблюдения имеют разную дискретность. По спутниковым данным оценка скорости перемещения айсбергов производилась за временной интервал в сутки и более, тем самым получались осредненные величины дрейфа. С учетом этих особенностей наблюдения величина скорости айсбергов 1 км/ч была выбрана в качестве дополнительного критерия айсберговой опасности.

Результаты и обсуждение

Применение предложенных критериев айсберговой опасности на основе анализа снимков Landsat-8 позволило получить ежесуточную плотность айсбергов в районе Северной Земли за разные сезоны в период 2014–2023 гг. и оценить айсберговую опасность в различных участках этого региона. На рис. 3 приведены примеры оценки айсберговой опасности, полученные для весеннего сезона (март–май) 2015, 2020, 2023 гг. В 2015 г. при анализе использовано 38 снимков Landsat-8, в 2020 г. — 31 снимок, в 2023 г. — 20 снимков.

Анализ спутниковой информации по району Северной Земли за 2014–2023 гг. с использованием предложенных критериев айсберговой опасности позволил выявить следующие наиболее айсбергоопасные районы, в которых среднесуточная плотность айсбергов превышает 200 объектов на квадрат 25×25 км (рис. 3):

- пролив Красной Армии;
- фьорд Матусевича и прилегающие квадраты моря Лаптевых;
- прибрежная зона моря Лаптевых у ледника Академии наук (о. Комсомолец).

На западном побережье Северной Земли наибольшая плотность айсбергов (4 балла, 101–200 объектов) наблюдалась вблизи ледника Вавилова и в заливе Ковалевской.

Плотность айсбергов в проливе Шокальского (до 4 баллов) выше, чем в проливе Вилькицкого (до 2 баллов). Плотность айсбергов у Северной Земли в море Лаптевых выше, чем в Карском море.

В море Лаптевых отмечается высокая межгодовая пространственная изменчивость плотности айсбергов, обусловленная изменчивостью преобладающих метеорологических процессов. Весной 2015 г., например, отмечался значительный дрейф айсбергов вдоль Северной Земли на север, в этот год зарегистрирована повышенная плотность айсбергов северо-восточнее о. Комсомолец. Такая же ситуация наблюдалась весной 2018 г. [15]. Весной 2020 г., напротив, плотность айсбергов в этом районе была минимальна, часть из них перемещалась на юг.

Айсберговые ловушки в разные годы также были по-разному заполнены айсбергами. В 2015 г. больше севших на мель айсбергов отмечено в северной части прибрежной зоны архипелага, а в 2020 г. — в южной зоне (см. области 4 на рис. 3).

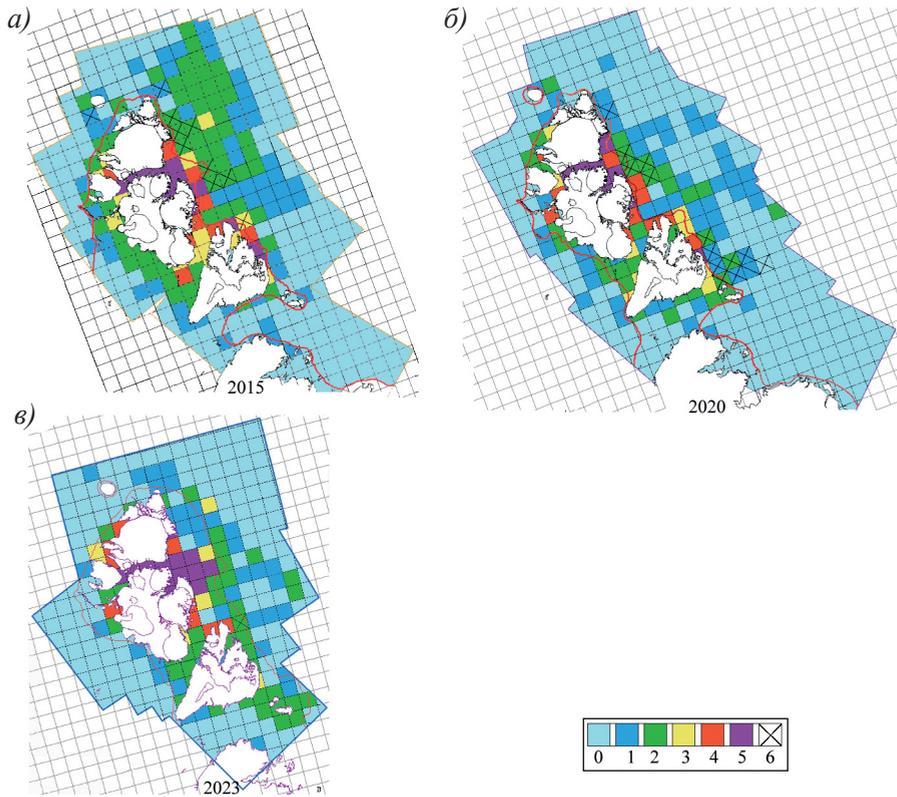


Рис. 3. Оценка айсберговой опасности в районе Северной Земли весной 2015 (а), 2020 (б), 2023 (в) гг. По данным спутниковых снимков Landsat-8 за март–май.

Квадраты, по которым получены информативные спутниковые снимки, выделены цветом. 0 — айсберги не обнаружены; 1 — 1–5 айсбергов; 2 — 6–49 айсбергов; 3 — 50–100 айсбергов; 4 — 101–200 айсбергов; 5 — > 200 айсбергов; 6 — места обнаружения айсбергов на грунте. Красной линией обозначена граница припая

Fig. 3. Assessment of iceberg hazard in the Severnaya Zemlya region in the spring of 2015 (a), 2020 (b), 2023 (c). Based on Landsat-8 satellite images for March–May.

The squares from which informative satellite images were obtained are highlighted in color. 0 — no icebergs detected; 1 — 1–5 icebergs; 2 — 6–49 icebergs; 3 — 50–100 icebergs; 4 — 101–200 icebergs; 5 — > 200 icebergs; 6 — places where grounded icebergs were detected

Этот факт также объясняется различием в интенсивности и преимущественном направлении дрейфа айсбергов в эти годы. В 2023 г. айсберги в ловушках были отмечены только в одном квадрате (рис. 3в). Ежегодно весной для снижения айсберговой угрозы судоходству имеет смысл проводить мониторинг айсбергов, сидящих на мели, и создавать базу данных об их местонахождении и параметрах. Такие айсберги могут находиться в одной точке по несколько месяцев, а иногда и лет, как это было, например, отмечено в заливе Ковалевской [16], пока их подводная часть не будет частично разрушена под воздействием волновых процессов и из-за таяния при контакте с более теплой водой.

Районы нахождения обширных айсбергов в разные годы наблюдений были приурочены к одним и тем же районам, связанным с местами генерации айсбергов, — проливу Красной Армии, фьорду Матусевича, восточному склону ледника

Академии наук и др. Количество обширных айсбергов менялось. Максимум айсбергов длиной свыше 200 м отмечался в 2015 г. — 457 единиц (6,1 %), в 2023 г. таких айсбергов было 3,1 % (172 шт.). Факт уменьшения количества обширных айсбергов объясняется тем, что в 2014 г. было отмечено интенсивное разрушение шельфового ледника Матусевича, а в последующие годы разрушение этого ледника замедлилось.

В целом знание статистических характеристик айсбергов в районах СМП может быть использовано для совершенствования методов прогноза дрейфа айсбергов [17] и повышения достоверности оценок вероятности столкновения с айсбергом охраняемых инженерных объектов шельфовой зоны.

Выводы

1. Данные регулярных спутниковых наблюдений морей Арктической зоны РФ могут быть использованы для количественной оценки айсберговой опасности в конкретных районах.

2. Основным критерием айсберговой опасности является величина среднесуточной плотности айсбергов в квадратах регулярной сетки, полученная для того или иного месяца (или сезона) года.

3. В качестве дополнительных критериев айсберговой опасности могут использоваться факты наблюдения в квадрате сетки:

- обширных айсбергов (>200 м по классификации ВМО);
- айсбергов с высотой надводной части более 25 м;
- айсбергов, сидящих на грунте;
- айсбергов, дрейфующих с высокими скоростями (>1 км/ч).

4. Для районирования акватории по степени айсберговой опасности необходим анализ спутниковых данных за статистически значимый интервал времени (не менее 10 лет).

5. Оценки айсберговой опасности, полученные на основании регулярного спутникового мониторинга, могут применяться в инженерных расчетах при проектировании объектов инфраструктуры на шельфе арктических морей, а также использоваться в региональных моделях дрейфа айсбергов для повышения достоверности прогностических оценок дрейфа.

6. Районирование акватории Северного морского пути по степени айсберговой опасности позволит учитывать фактор риска столкновений с айсбергами при прокладке маршрутов судов.

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. Абрамов В.М., Карлин Л.Н., Овсянников А.А. О структуре айсберговой опасности в окрестности Штокмановского газоконденсатного месторождения. *Ученые записки РГГМУ*. 2008;8:98–109.

Abramov V.M., Karlin L.N., Ovsiannikov A.A. On iceberg hazard structure in the Shtokman gas-condensate field area. *Uchenye zapiski RGGMU = RSHU*. 2008;8:98–109. (In Russ.)

2. Онищенко Д.А. Вероятностные аспекты оценки ледовых нагрузок и воздействий на объекты обустройства морских месторождений на примере айсберговой угрозы. *ROGTEC. Российские нефтегазовые технологии*. 2014;37:80–88.
Onishchenko D.A. Offshore hazards: assessing the impact of icebergs on offshore production platforms. *Rossiiskie neftegazovye tekhnologii = Rogtecmagazine*. 2014;37:80–88. (In Russ.)
3. Онищенко Д.А., Сафонов В.С. О необходимости учета айсберговой опасности при обосновании концепции освоения арктических месторождений углеводородов. *Вестни газовой науки*. 2017;1(29):100–118.
Onishchenko, D.A., Safonov V.S. On necessity to consider the iceberg threat at substantiation of a concept for development of Arctic hydrocarbon fields. *Vesti Gazovoy Nauki: collected scientific technical papers*. 2017;1(29):100–118. (In Russ.)
4. 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. Часть 1. Основные продуцирующие ледники, распространение и морфометрические особенности айсбергов. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2008;1(78):66–79.
Buzin I.V., Glazovsky A.F., 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 = Arctic and Antarctic Research*. 2008;78(1):66–79. (In Russ.)
5. Бузин И.В., Глазовский А.Ф., Май Р.И., Миронов Е.У., Нестеров А.В., Наумов А.К., Гудошников Ю.П. Исследование динамики и морфометрии ледников и айсбергов и прикладное использование полученных результатов при освоении углеводородных месторождений на континентальном шельфе Российской Арктики. *Вестник РФФИ*. 2020;107–108(3–4):21–37. <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-21-37>
Buzin I.V., Glazovsky A.F., May R.I., Mironov Y.U., Nesterov A.V., Naumov A.K., Gudoshnikov Yu.P. Study of Dynamics and Morphometry of Glaciers and Icebergs and Application of the results for the development of the hydrocarbon deposits on the continental shelf of the Russian Arctic. *Vestnik RFFI = RFBR*. 2020; 3–4 (107–108):21–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-21-37>
6. Май Р.И., Гузенко Р.В., Миронов Ю.У., Наумов А.К., Скутин А.А., Скутина Е.А., Соболюк Д.И., Замарин Г.А., Кормишин К.А., Ефимов Я.О., Мамедов Т.Е. Морфометрия и масса айсбергов в российских арктических морях. *IJOPE*. 2019;29(4):375–382. <https://doi.org/10.17736/ijope.2019.jc770>
7. Тиугалева А., Гузенко Р., Клычакин С., Май Р. Метод оценки опасности айсбергов в Карибском море, основанный на реализациях численной модели. In Proc. *19 th Int. Multidisc. Sci. GeoConf. "SGEM 2019"*. Bulgaria, Albena, 30 June – 6 July, 2019. Bulgaria, Sofia; 2019. P. 977–984. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.2/S06.124>
8. Bigg G.R., Cropper T.E., O'Neill C.K., Arnold A.K., Fleming A.H., Marsh R., Ivchenko V., Fournier N., Osborne M., Stephens R. A model for assessing iceberg hazard. *Nat Hazards*. 2018;92:1113–1136. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3243-x>
9. Бычкова И.А., Платонова Е.В., Смирнов В.Г. Особенности совместного использования спутниковых данных видимого диапазона и радиолокационных данных для мониторинга арктических айсбергов на примере района Земли Франца-Иосифа. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(2):191–205. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-191-205>
Bychkova I.A., Platonova E.V., Smirnov V.G. Features of the joint use of visible-range satellite and satellite radar data for monitoring arctic icebergs based on data from Franz Josef Land area. *Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(2):191–205. (In Russ). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-191-205>

10. Lee T.K., Park H.-J. Review of ice characteristics in ship-iceberg collisions. *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2021;35(5):369–381. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2021.060>
11. Миронов Е.У. (ред.) *Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике*. СПб.: Изд-во ААНИИ; 2010. 319 с.
12. Бузин И.В., Миронов Е.У., Сухих Н.А., Павлов В.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О. Исследования дрейфа ледяных образований на шельфе Российской Арктики с помощью автоматических радиомаяков спутниковой системы ARGOS. *Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»*. 2016;45(4):4–9.
Buzin I.V., Mironov E.Yu., Sukhikh N.A., Pavlov V.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O. Investigation of drift of the ice features on the Russian Arctic offshore with the help of automatic radio beacons based on the ARGOS satellite system. *Nauchno-tekhnicheski vestnik «Rosneft» = Collected scientific technical papers «Rosneft Oil Company PJSC»*. 2016;45(4):4–9. (In Russ)
13. Buzin I.V., Nesterov A.V., Gudoshnikov Yu.P., Pashali A.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O., Stragnikov D.S. The preliminary results of iceberg drift studies in the Russian Arctic throughout 2012–2017. *IJOPE*. 2019;29(4):391–399. <https://doi.org/10.17736/ijope.2019.jc772>
14. Бузин И.В., Нестеров А.В. Ледовые нагрузки: отследить и предупредить. *Neftegaz.RU*. 2018;73(1):16–23. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/arktika/512776-ledovye-nagruzki-otsledit-i-predupredit>
Buzin I.V., Nesterov A.V. Ice loads: track and warn. *Neftegaz.RU*. 2018;73(1):16–23. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/arktika/512776-ledovye-nagruzki-otsledit-i-predupredit> (In Russ.) (accessed 15.04.2024)
15. Бычкова И.А., Смирнов В.Г. Изучение дрейфа айсбергов у побережья Северной Земли весной 2018 г. с помощью спутниковой информации. *Лед и снег*. 2019;59(3):377–387. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-411>
Bychkova I.A., Smirnov V.G. The iceberg drift study near Severnaya Zemlya in the spring of 2018 by remote sensing data. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2019;59(3):377–387. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-411>
16. Смирнов В.Г., Бычкова И.А. Спутниковый мониторинг ледяных образований при обеспечении безопасности работ на шельфе арктических морей. *Исследование Земли из космоса*. 2015;4:79–87. <https://doi.org/10.7868/S0205961415040107>
Smirnov V.G., Bychkova I.A. Satellite monitoring of ice formations while ensuring the safety of work on the shelf of the Arctic seas. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Earth Observation and Remote Sensing*. 2015;4:79–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0205961415040107>
17. 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;104(2):21–32.
Mironov Ye.U., Smirnov V.G., Bychkova I.A., Kulakov M.Yu., Demchev D.M. Modern technologies for iceberg detection and their drift forecasting in the western Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2015;104(2):21–32. (In Russ.)