

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-191-205>
УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Особенности совместного использования спутниковых данных видимого диапазона и радиолокационных данных для мониторинга арктических айсбергов на примере района Земли Франца-Иосифа

И.А. Бычкова*, Е.В. Платонова, В.Г. Смирнов

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

*bychkova@aari.ru

Резюме

Обсуждается эффективность использования некоммерческих спутниковых данных, видимого спектрально-го диапазона и радиолокационных, для мониторинга айсбергов в районе архипелага Земля Франца-Иосифа. Путем сравнения с данными видимого диапазона сверхвысокого разрешения оценена погрешность измерения размеров айсбергов по данным видимого диапазона ИСЗ Landsat-8 и спутникового радиолокатора Sentinel-1. Установлена зависимость способности спутникового радиолокатора обнаруживать айсберги в прибрежной зоне от угла наклона луча. Сделан вывод, что радиолокационные данные с размером пикселя 40 м позволяют получить представление о закономерностях пространственного распределения айсбергов по акватории, но построить достоверную функцию распределения айсбергов по размерам не удастся.

Ключевые слова: айсберги, Арктика, видимый диапазон, Земля Франца-Иосифа, ледники, спутниковый мониторинг, спутниковый радиолокатор.

Для цитирования: 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. Т. 69. № 2. С. 191–205. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-191-205>.

Поступила 04.05.2023

После переработки 15.06.2023

Принята 16.06.2023

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

Irina A. Bychkova*, Eugenia V. Platonova, Vladimir G. Smirnov

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

*bychkova@aari.ru

Summary

Given the availability of data, in order to monitor icebergs in the vast Arctic region, it is necessary to ensure an optimal ratio of the satellite radar data cost (with a wide swath and high spatial resolution) and the reliability of the results obtained. The aim of the study was to evaluate the effectiveness of using only non-commercial satellite information for monitoring icebergs. To achieve this goal, an iceberg detection technique was applied based on statistical criteria of searching for gradient zones in analyzing two-dimensional fields of satellite images. As a source of information, we used high spatial resolution satellite data obtained from non — commercial satellites Sentinel-1 (radar data) and Landsat-8 (visible spectral range data) with a pixel size of 40×20 and 15 m, respectively.

Through comparison with the data of the visible spectral range of ultra-high resolution, the error was estimated of measuring the size of icebergs using the visible range equipment of the Landsat-8 satellite and the radar of the Sentinel-1 satellite. Based on the analysis of satellite data of the visible spectral range and radar data, the spatial dimensions of icebergs formed by the outlet glaciers of Franz Josef Land in 2020–2022 were estimated. The materials were collected for the period August–September, corresponding to the conditions of minimum ice extent in the Franz Josef Land area and sufficient natural illumination for using the data of the visible spectral range in the Arctic. In total, about 100 satellite images were analyzed. The sources of error in the satellite measurements are discussed, as well as the reasons for the impossibility in some cases to identify Franz Josef Land icebergs on radar images. It is shown that the largest contribution to the iceberg runoff of Franz Josef Land is made by outflow glaciers located on Georg Land, Wilczek Land, Gall, Salisbury and Champa islands. According to the results of the study, it is concluded that radar data with a pixel size of 40 m allow one to obtain essentially reliable information on the spatial distribution of icebergs in the water area. However, it is not possible to obtain a reliable function of the distribution of icebergs by size since most of the icebergs in the Franz Josef Land water area have small and medium sizes and are rarely identified in images of such spatial resolution.

Keywords: Arctic, Franz Josef land, glaciers, icebergs, satellite monitoring, satellite radar, visible spectral range.

For citation: *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 Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-191-205>.

Received 04.05.2023

Revised 15.06.2023

Accepted 16.06.2023

ВВЕДЕНИЕ

В современных геополитических реалиях кратно возросло значение Северного морского пути (СМП) как важнейшего для России логистического коридора, что обусловлено введением недружественными странами санкционных мер против РФ, коснувшихся, в частности, запретов для российских судов на вход в порты Европы. При прохождении судами трассы СМП используется отечественная портовая инфраструктура, что позволяет успешно перенаправить грузопотоки в условиях санкционного давления. Вместе с тем рост грузопотока в Арктике повышает риск воздействия на безопасность судоходства опасных ледяных образований, и прежде всего айсбергов. В настоящее время средняя вероятность столкновения с айсбергом на трассах СМП составляет, по оценке специалистов Крыловского ГНЦ, 1,4 % [1]. Кроме того, в данный период в Арктике наблюдаются климатические изменения, меняется атмосферная циркуляция, сокращается площадь ледяного покрова [2]. Эти факторы вызывают ускорение процесса отступления ледников с разрушением их фронтальных частей и образованием большого количества айсбергов.

Дрейф айсбергов вблизи судоходных трасс несет в себе угрозу возникновения аварийных ситуаций из-за возможного повреждения корпуса судов при столкновении с айсбергом. Для снижения таких рисков и повышения безопасности перевозок необходимо предоставить судоводителям актуальные данные по районированию акватории арктических морей по степени айсберговой опасности, а также предоставить оперативную спутниковую информацию о положении айсбергов в районе следования, их пространственных размерах, направлении и скорости дрейфа. Достоверная оперативная информация об айсбергах востребована также при ведении работ по разведке и освоению месторождений углеводородного сырья на шельфе арктических морей. Мониторинг айсбергов с определением геометрических параметров необходим для предотвращения их столкновения с морским нефтегазопромысловым сооружением [3, 4].

Сезонный максимум айсбергообразования в Арктике наблюдается в летне-осенний период, именно в этот период интенсивность судоходства в Арктике также максимальна и, соответственно, информация о положении айсбергов в районе СМП наиболее востребована. Из имеющихся видов спутниковых данных самыми информативными являются снимки видимого диапазона высокого разрешения, они позволяют более уверенно идентифицировать айсберги благодаря возможности лучше регистрировать форму айсберга, визуализировать рисунок его поверхности, определять тень от айсберга. В то же время для летнего сезона в Арктике характерно наличие большого процента облачности над акваторией, что затрудняет использование спутниковых снимков видимого диапазона. При обработке данных о геометрических размерах айсбергов, обнаруженных на снимках радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), возникает систематическая ошибка, обычно происходит завышение реальных размеров объекта. Ошибка обусловлена особенностью РСА-съемки, при которой для улучшения пространственного разрешения происходит сложение нескольких последовательных мгновенных изображений объекта. При радиолокационной (РЛ) съемке поверхности на приемную аппаратуру попадает как сигнал от самого объекта, так и переотраженный сигнал от фона, который существенно зависит от наличия и силы волнения на водной поверхности.

Для получения достоверной информации об арктических айсбергах необходимо оптимально сочетать преимущества съемки в видимом диапазоне с радиолокационной съемкой. Данные снимков видимого диапазона высокого пространственного разрешения, полученные в условиях ясной погоды, могут рассматриваться как эталонные для коррекции РСА-данных.

Целью данной работы является оценка возможности получения достоверных данных об арктических айсбергах на основании использования преимущественно свободно распространяемой некоммерческой спутниковой информации, как радиолокационной, так и с аппаратуры видимого диапазона.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕРИАЛЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Для обнаружения айсбергов использована методика анализа двумерных полей яркости спутниковых изображений, основанная на статистических критериях поиска градиентных зон, реализованная в виде авторской программы Iceberg2 [4, 5]. В качестве входной информации могут быть использованы как каналы оптического спектрального диапазона (видимый и ИК), так и радиолокационные данные.

Калибровка данных в значения спектральной энергетической яркости в видимом диапазоне либо в значения удельной эффективной площади рассеяния (для радиолокаторов) не требуется.

Для оценки пространственно-временной изменчивости айсбергов в районе архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) были использованы радиолокационные данные ИСЗ Sentinel-1(A,B), режим Extra-Wide Swath Mode (пиксель 40×20 м, полоса обзора 400 км) за 2020 и 2021 гг. и снимки видимого диапазона аппаратуры OLI (панхроматическая съемка, разрешение 15 м, кадр 185×185 км), полученные со спутника Landsat-8 в 2020–2022 гг. Снимки подбирались за период полярного лета (август–сентябрь), т. к. именно в это время в районе ЗФИ отмечается минимальная ледовитость [6] и наблюдается достаточная естественная освещенность. Кроме того, в августе на ЗФИ фиксируется максимальный айсберговый сток [7]. Минимальная ледовитость соответствует меньшему присутствию дрейфующих льдов в регионе, что позволяет лучше интерпретировать айсберги на снимках и избежать случаев ложной идентификации дрейфующих льдин как айсбергов.

За 2020 г. было проанализировано 11 изображений Sentinel-1 и 18 изображений Landsat-8, за 2021 г. — 12 снимков Sentinel-1 и 28 снимков Landsat-8, за 2022 г. — 13 снимков Landsat-8. Размер кадра Landsat-8 составляет 185×185 км. Снимки Landsat-8 были скачаны из архива, размещенного на сайте американской геологической службы USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>), а Sentinel-1 — с сайта программы Copernicus Европейского космического агентства (<https://scihub.copernicus.eu>).

На рис. 1а, б приведено расположение РЛ-снимков Sentinel-1 и снимков видимого диапазона Landsat-8, использованных для анализа в 2021 г. Абсолютно безоблачных снимков видимого диапазона за весь сезон не было, на рис. 1б отдельно показаны районы, по которым безоблачная ситуация наблюдалась хотя бы один раз.

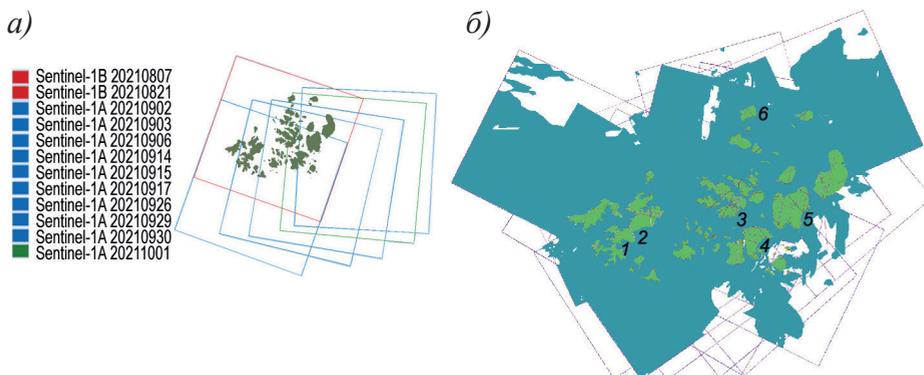


Рис. 1. Схема покрытия архипелага Земля Франца-Иосифа спутниковыми снимками Sentinel-1 (а) и Landsat-8 (б), использованными для обнаружения айсбергов в 2021 г.

1 — залив Эссена; 2 — залив Клемент Маркома; 3 — о. Чамп; 4 — о. Галля; 5 — ледник Знаменитый; 6 — о. Рудольфа. Зеленым цветом обозначены районы, в которых хотя бы раз в сезон наблюдались безоблачные условия

Fig. 1. Coverage of the Franz Josef Land archipelago by satellite images Sentinel-1 (a) and Landsat-8 (b) used for icebergs detection in 2021.

1 — Essen Bay; 2 — Clement Markom Bay; 3 — Champ Island; 4 — Gallya Island; 5 — Glacier Znamenity; 6 — Rudolf Island. Green indicates areas where cloudless conditions were observed at least once a season

В таблице показано, сколько раз за сезон была возможность наблюдать районы расположения основных айсбергогенерирующих ледников. По каждому из указанных в таблице районов за сезон было от 5 до 10 информативных снимков.

Возможности аппаратуры OLI Landsat-8 по обнаружению арктических айсбергов были оценены с помощью сравнения с данными спутника сверхвысокого разрешения WorldView-3 (в мультиспектральном диапазоне разрешение 1,24 м, полоса съемки 13,1 × 360 км). Для сравнения был взят снимок WorldView-3 за 13 августа

Таблица

Спутниковые кадры Landsat-8, использованные для обнаружения айсбергов в районе Земли Франца-Иосифа в 2021 г.

Table

Landsat-8 satellite images used to detect icebergs in the Franz Josef Land area in 2021

Дата	Кадр	Земля Георга		О. Чамп, Юг	О. Галля, Восток	Земля Вильчека, ледник Знаменитый	О. Рудольфа
		Залив Эссен	Залив Кл. Маркома				
2.08.21	223-243	+	+				
2.08.21	223-244						
3.08.21	198-002	+	+				
4.08.21	189-248			+			+
9.08.21	224-243	+	+				
10.08.21	199-001			+	+	+	
10.08.21	215-244			+			+
11.08.21	190-247						+
11.08.21	222-242				+	+	+
12.08.21	197-001					+	
12.08.21	213-244						+
18.08.21	223-242				+	+	
20.08.21	189-248						+
23.08.21	194-002			+		+	
23.08.21	226-242						
23.08.21	226-243	+	+				
28.08.21	232-242	+	+				
3.09.21	191-248						
4.09.21	198-002	+	+				
4.09.21	214-244			+			
5.09.21	205-001	+	+				
5.09.21	221-243	+	+	+	+		
11.09.21	199-002		+				
12.09.21	190-247						+
13.09.21	197-002		+				
15.09.21	195-001					+	
15.09.21	195-002			+	+		
15.09.21	195-247						

Примечание. Знак «+» означает съемку объектов при благоприятных по облачности условиях (ясно или полупрозрачная облачность).

Note. The “+” sign means shooting objects under favorable cloud conditions (clear or translucent clouds).

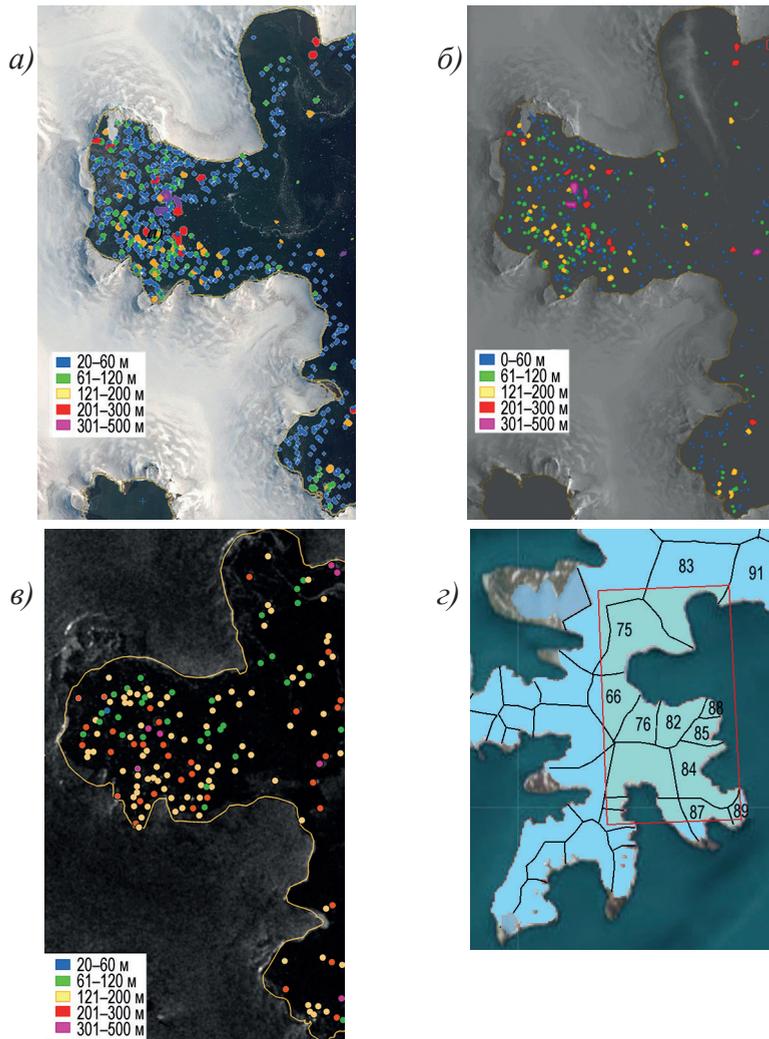


Рис. 2. Положение и размеры айсбергов, обнаруженных в районе залива Эссен Земли Георга 13 августа 2020 г., на снимках видимого диапазона WorldView-3 (а), Landsat-8 (б) и РСА-снимке Sentinel-1(в). На фрагменте (г) приведено положение спутниковых снимков, выводные ледники отмечены номерами в соответствии с новым каталогом ледников [10]

Fig. 2. Position and dimensions of the icebergs detected in the area of the Essen Bay of Georg Land on August 13, 2020, on the WorldView-3 (a), Landsat-8 (б) visible range images and the Sentinel-1 (в) SAR image. In (г) the position of satellite images is shown, outlet glaciers are marked with numbers in accordance with the New Inventory of glaciers [10]

2020 г. (с сайта www.glaclu.ru) и фрагмент кадра Landsat-8 за этот же день, охватывающие район залива Эссен Земли Георга (рис. 2а, б). В этот период в заливе наблюдалось интенсивное разрушение плавучего языка выводного ледника № 75, в результате в акватории отмечались многочисленные отколовшиеся от него айсберги, их куски и обломки. Часть наблюдавшихся айсбергов была образована от других выводных ледников, выходящих в залив, — № 66, 76, 82 (рис. 2г).

Для повышения достоверности измерения геометрических размеров айсбергов по радиолокационным изображениям была исследована возможность коррекции значений параметров объектов на РЛ-снимках с помощью эталонной информации видимого диапазона. С этой целью при анализе изображений видимого диапазона отдельно была поставлена задача выделения крупных айсбергов, которые либо стоят на грунте в течение длительного времени, либо дрейфуют, причем дрейф прослеживается на последовательных снимках. Пространственные размеры этих айсбергов были приняты за эталон при анализе квазисинхронных снимков РСА. Также рассматривалась возможность использования в качестве эталона для РЛ-данных таких геометрических констант, как размеры малых островов в зоне снимка. Острова-кандидаты на получение статуса геометрической константы выбирались, исходя из условий отсутствия осыхающих при отливе берегов и низменного характера поверхности (без высоких скал). В итоге для каждого РСА-снимка путем сравнения с эталонными объектами определялась погрешность, учитываемая при использовании данных радиолокационных съемок.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При сравнении идентификационных возможностей WorldView-3, Landsat-8 и Sentinel-1 по обнаружению айсбергов на примере снимков за 13 августа 2020 г. по району залива Эссен было проведено сравнение количества обнаруженных разными спутниками айсбергов и оценено расхождение в измеренных размерах айсбергов. Данные сверхвысокого разрешения WorldView-3 были приняты за эталон. При обработке снимков была поставлена задача идентифицировать айсберги размером свыше 20 м.

По номенклатуре ВМО айсберги подразделяют на обширные (длиной более 200 м), крупные (длиной 121–200 м), средние (61–120 м), мелкие (15–60 м) [8]. Такая классификация успешно применяется Международным ледовым патрулем при картировании обнаруженных дистанционными методами айсбергов [9].

На снимке WorldView-3 было обнаружено 680 айсбергов размером свыше 20 м, на снимке Landsat-8 — 56 % от этого числа (382 айсберга), на снимке Sentinel-1 — 24 % (163 айсберга, см рис. 2а, б, в). Не были обнаружены на снимке Landsat-8 часть мелких айсбергов (до 30 м) и айсберги, находившиеся в тени ледникового обрыва (рис. 3б). На снимке РСА Sentinel-1 не были обнаружены айсберги, находившиеся вблизи западного берега залива в зоне радиолокационной тени (см. рис. 2в) и практически все мелкие айсберги. Угол сканирования РСА составлял при съемке этого района 41°.

79 % айсбергов на снимке сверхвысокого разрешения WorldView-3 были мелкими, 5 % (34 шт.) — крупными, 2,5 % (17 шт.) — обширными. По данным Landsat-8 из обнаруженных айсбергов 57 % были мелкими, 10 % (38 шт.) — крупными, 4,7 % (18 шт.) — обширными. По данным Sentinel-1 из обнаруженных айсбергов было 54,6 % (89 шт.) крупных, 24,5 % (40 шт.) обширных, 20,2 % (33 шт.) средних и лишь 1 мелкий айсберг. Средний размер обнаруженного айсберга составил по данным WorldView-3, Landsat-8, Sentinel-1 — 50, 78 и 170 м соответственно.

343 пары айсбергов на снимках WorldView-3 и Landsat-8 удалось сопоставить. В основном на снимке Landsat-8 наблюдалось завышение размеров (до 50 м), но в 16 % случаев отмечено занижение. Аномальные значения завышения, превышающие размер пикселя Landsat-8, были связаны с идентификацией двух близко расположен-

ных айсбергов как одного целого объекта (рис. 3а, б). Занижение размера объекта на снимке Landsat-8 было зарегистрировано для крупного айсберга, часть которого находилась в тени ледникового барьера (рис. 3в). Мелкие айсберги, размерами 31 и 37 м, находившиеся полностью в тени, на снимке Landsat-8 не были видны (рис. 3г).

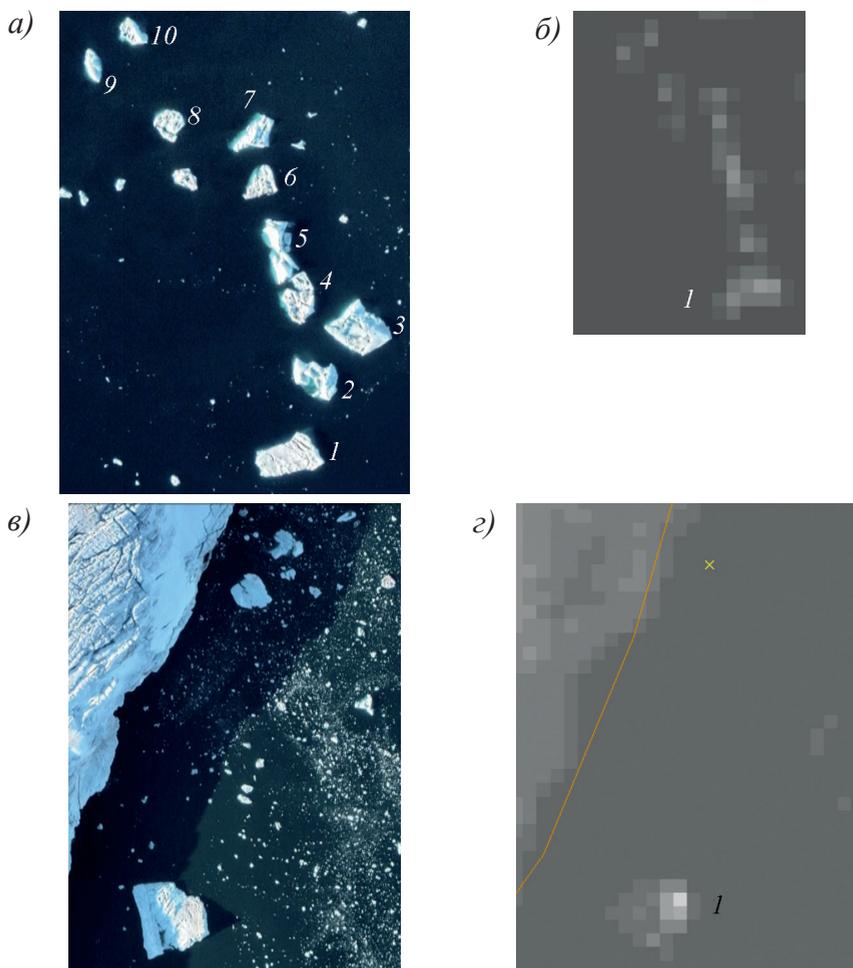


Рис. 3. Примеры проявления несовпадения данных об айсбергах, полученных по спутниковым данным видимого диапазона высокого и сверхвысокого разрешения: группа из 10 айсбергов, размерами от 20 до 40 м, фрагмент снимка WorldView-3 (а) и Landsat-8 (б); айсберги в тени ледникового барьера, снимок WorldView-3 (в) и Landsat-8 (г).

Положение фрагмента снимка на рис. 3а отмечено красной рамкой на рис. 1а; знаком × отмечено положение двух айсбергов размером 37 и 31 м, не видимых на снимке Landsat-8

Fig. 3. Examples of discrepancies in data on icebergs obtained from satellite data in the visible range of high and ultra-high resolution: a group of 10 icebergs, ranging in size from 20 to 40 m, fragment of the WorldView-3 (a) and Landsat-8 (b) image; icebergs in the shadow of the ice barrier, WorldView-3 (v) and Landsat-8 (z) image.

The position of the fragment fig. 3a is marked with a red frame in fig. 1a; the × sign marks the position of two icebergs 37 and 31 in size, not visible in the Landsat-8 image

В среднем ошибка в определении размеров айсбергов по снимку Landsat-8 составила +7 м. Для Sentinel-1 оказалось возможным сопоставить 25 пар айсбергов на снимке PCA и WorldView-3; завышение размеров составило до 133 м, в среднем 57 м; случаев занижения размеров отмечено не было.

Анализ снимков PCA, полученных при разных углах сканирования, показал, что при углах около 40° по данным PCA можно идентифицировать больше айсбергов, видимых на снимке видимого диапазона, чем при углах около 20°. Средние и мелкие айсберги, находящиеся в припае, хорошо идентифицируются на снимках видимого диапазона, однако во многих случаях не обнаруживаются на снимках PCA. Также на снимках PCA не обнаруживаются айсберги в прибрежной зоне у высоких берегов, на расстоянии несколько сотен метров от берега.

Для уменьшения ошибки в определении размеров по радиолокационным спутниковым данным была проведена коррекция измерений длин айсбергов, полученных по снимкам Sentinel-1. Для коррекции использовались значения геометрических констант, измеренных по снимкам видимого диапазона Landsat-8, — айсбергов, сидящих на мели в течение длительного времени (рис. 4а); крупных дрейфующих айсбергов, наблюдаемых одновременно на оптических и РЛ-снимках (рис. 4б); малых низменных островов (рис. 4в). Коррекцию целесообразно выполнять для каждого РЛ-снимка отдельно.

По материалам 2020 и 2021 гг. было выполнено сравнение распределения по акватории айсбергов разных размеров, идентифицированных за сезон по данным видимого диапазона Landsat-8 и PCA Sentinel-1.

В 2020 г. по данным Landsat-8 было обнаружено 6362 айсберга. Средний размер айсберга составил 64 м, максимальный айсберг размером 690 м наблюдался у ледника № 306 о. Чамп. На снимке Sentinel-1 этот айсберг, находившийся на расстоянии около 0,5 км от берега, не идентифицировался.

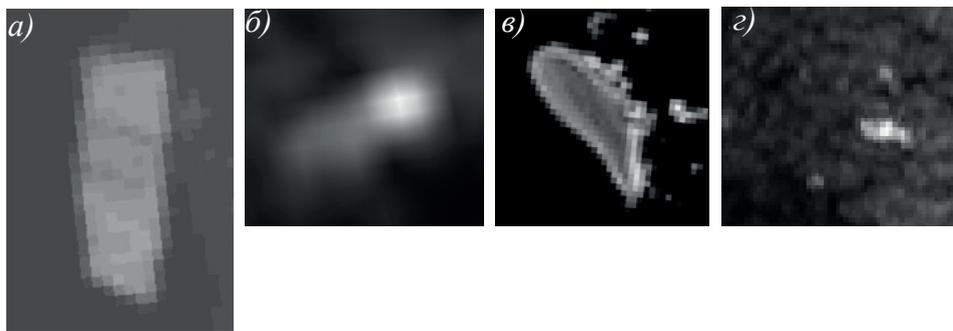


Рис. 4. Пример объектов на спутниковых снимках, размеры которых, определенные по данным видимого диапазона Landsat-8, были использованы как геометрические константы: а) — айсберг размером 340 м, сидящий на мели у ледника № 306 (о. Чамп), 10.08.2021, Landsat-8; б) — дрейфующий айсберг размером 410 м, наблюдаемый одновременно на оптических и РЛ-снимках у ледника № 306, 7.08.2021, Sentinel-1; в) — малый низменный о. Незаметный в заливе Клемента Маркома, 31.08.2022, длина 466 м; з) — о. Незаметный на снимке Sentinel-1, 12.08.2021

Fig. 4. An example of geometric constants measured from images of the visible range Landsat-8: а) — grounded iceberg measuring 340 m near glacier No 306 (Champ island), 10.08.2021, Landsat-8; б) — drifting iceberg 410 m in size, observed simultaneously on optical and radar images near glacier No 306, 7.08.2021, Sentinel-1; в) — small low-lying island Nezametny in Clement Markom Bay, 31.08.2022, length 466 m; з) — island Nezametny, SAR image Sentinel-1, 12.08.2021

В 2021 г. по данным Landsat-8 было обнаружено 4937 айсбергов, длиной от 40 до 376 м (рис. 5а), средним размером айсберга составил 64 м. По данным Sentinel-1 в 2021 г. было обнаружено 5457 айсбергов, размерами от 57 до 670 м (рис. 5б), средним размером айсберга составил 198 м.

На рис. 6 приведено полученное по спутниковым данным распределение айсбергов у ЗФИ по размерам, выраженное как диаграмма частот (гистограмма). Интервал накопления при построении гистограммы выбран равным 20 м для повышения устойчивости статистической оценки эмпирической плотности рас-

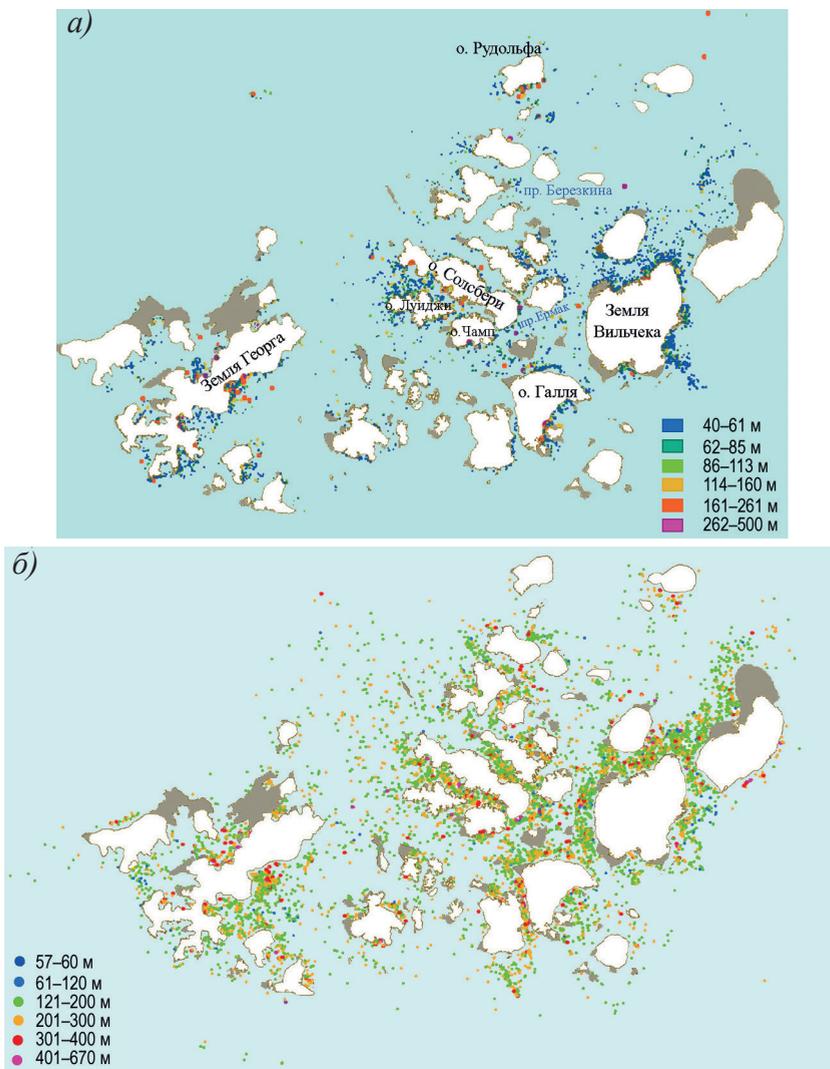


Рис. 5. Местоположение айсбергов, обнаруженных по спутниковым данным в районе архипелага Земля Франца-Иосифа в летний сезон 2021 г.: а) по снимкам видимого диапазона Landsat-8; б) по РЛ-снимкам Sentinel-1

Fig. 5. Location of icebergs detected by satellite data in the area of the Franz Josef Land archipelago in the summer season of 2021: а) from Sentinel-1 radar images; б) from Landsat-8 visible range images

пределения айсбергов по размерам. Оценка плотности распределения айсбергов по размерам в центре каждого интервала вычисляется как частное от деления значения гистограммы на ширину интервала. Вид аппроксимирующей функции при переходе от гистограммы к эмпирической плотности распределения айсбергов сохраняется.

Диаграмма частот, построенная по данным видимого диапазона, наилучшим образом аппроксимируется с помощью степенной функции, как для всей совокупности айсбергов, обнаруженных на снимках Landsat-8 за 2021 г., так и для айсбергов, идентифицированных по 1 кадру WorldView-3 за 13.08.20 (рис. 6а). Диаграмма частот, построенная по данным РСА (рис. 6б), неудовлетворительно описывает область малых и средних айсбергов, так как большинство айсбергов этой категории не обнаруживаются на снимках РСА.

Максимальная плотность айсбергов была отмечена у восточного побережья Земли Георга, вдоль северного и восточного берегов Земли Вильчека, в проливе Брауна между о-вами Солсбери и Луиджи. Наиболее крупные айсберги, размером

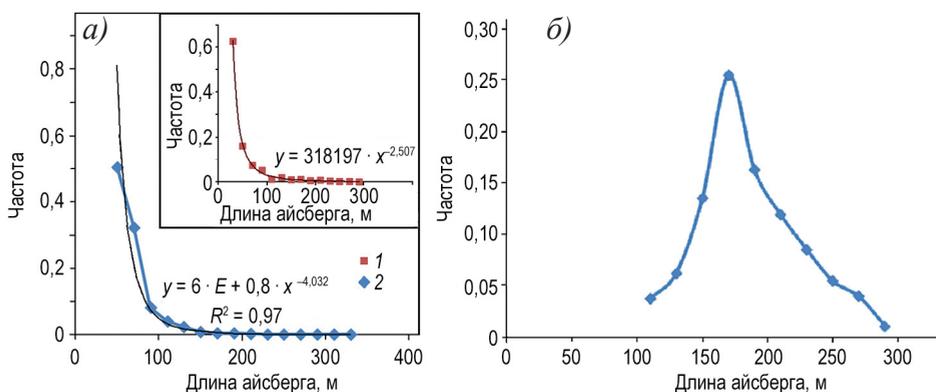


Рис. 6. Диаграмма частот (гистограмма) распределения по размерам айсбергов, обнаруженных в районе архипелага Земля Франца-Иосифа по спутниковым данным: а) снимок WorldView-3 за 13 августа 2020 г. (1), снимки видимого диапазона Landsat-8, 2021 г. (2); б) РЛ-снимки Sentinel-1, 2021 г.

Fig. 6. Frequency diagram (histogram) distribution function of icebergs detected in the area of the Franz Josef Land archipelago according to satellite data: а) WorldView-3, 13.08.2020 (1), visible range images Landsat-8, 2021 (2); б) SAR images Sentinel-1, 2020

свыше 300 м, по данным Landsat-8 в 2021 г. наблюдались в следующих районах (номера ледников даны по каталогу [10]):

- залив Эссен, Земля Георга, ледник № 75,
- залив Клементы Маркама, Земля Георга, ледник № 98,
- залив Дерюгина, Земля Георга, ледники № 90 и 96,
- залив Географов, Земля Георга, ледник № 120,
- южный берег о. Чамп у ледника № 306,
- восточный берег о. Галля, у ледника № 423,
- северный берег о. Галля в проливе у ледника № 417,
- северный берег о. Карла-Александра (ледниковый купол Самойловича), у ледников № 410, 426,
- пролив Ермак,

- пролив Березкина, севернее о. Ля Ронсьер,
- ледник Миддендорфа на о. Рудольфа.

По данным Sentinel-1 в 2021 г. было обнаружено 5457 айсбергов, с размерами от 56 до 670 м. Средний размер айсберга составил 198 м. Максимальная плотность айсбергов была отмечена у восточного побережья Земли Георга, вдоль берегов Земли Вильчека и о. Галля, в проливе Брауна между о-вами Солсбери и Луиджи (рис. 5б).

По заключению авторов [11], сделанному по результатам анализа спутниковых изображений 2000–2020 гг., для выводных ледников в этих районах, а также у островов Джексона, Гукера и Земли Александры был характерен наибольший на ЗФИ айсберговый сток (максимальная фронтальная абляция). Максимум айсбергового стока отмечен для выводного ледника Знаменитый Земли Вильчека [11], при этом надо учитывать, что этот ледник является наиболее крупным по площади и по длине выводным ледником ЗФИ [12]. Ранее в работе [13] были приведены результаты оценки отступления фронта выводных ледников ЗФИ за 50 лет, по состоянию на 2007 г.: наибольшее отступление, на 3,6 км, было у ледника № 12 о. Галля, выходящего в бухту Суrowая (нумерация по старому каталогу ледников [14], по новому каталогу [10] — № 413).

Районы нахождения наиболее крупных айсбергов, обнаруженных на снимках PCA (рис. 5б), совпали с аналогичными районами, определенными по данным Landsat-8 (рис. 5а). Авторами работ [7, 15] по материалам экспедиционных исследований 2007 г. определены три района образования и компактного скопления больших столообразных айсбергов: залив Елены Гульд Земли Вильчека, проливы между о-вами Солсбери, Луиджи, Чамп и залив Географов о. Земля Георга. Полученные нами результаты по сосредоточению крупных айсбергов в 2020-х гг. у ЗФИ совпадают с данными авторов работ [7, 15]. Эти районы соответствуют также гипотезе А.Ф. Глазовского о потенциальных местах образования крупных айсбергов на островах архипелага, выдвинутой ранее на основании радиолокационных измерений толщин ледников Земли Франца-Иосифа [16]. В работе [17] констатируется, что самые крупные айсберги обычно продуцируют пологие плоские и широкие ледниковые лопасти, примером чего служит ледник Знаменитый на Земле Вильчека. Полученные нами результаты в основном подтверждают этот вывод. Однако по данным съемки в видимом диапазоне в 2021 и 2022 гг. у ледника Знаменитый самые крупные айсберги были менее 300 м, лишь в 2020 г. здесь наблюдался один айсберг свыше 300 м — 329 м. Самый большой айсберг по спутниковым данным видимого диапазона за 2020–2022 гг., длиной 842 м, наблюдался у ледника № 98 в заливе Клементы Маркама.

ВЫВОДЫ

Для повышения достоверности спутниковой информации об айсбергах необходимо сочетать радиолокационные данные и данные видимого диапазона высокого пространственного разрешения. Спутниковые данные видимого диапазона могут быть использованы как эталонные для коррекции измерений PCA.

Использование данных PCA с размером пикселя 40 м и более не позволяет идентифицировать мелкие и часть средних айсбергов. Невозможно также по таким PCA-данным среднего пространственного разрешения построить достоверную плотность распределения айсбергов по размерам, так как большая часть айсбергов в акватории ЗФИ относится к мелким и средним айсбергам, которые, за редким

исключением, не видны на снимках PCA Sentinel-1. Для айсбергоопасных районов необходимо использовать PCA с более высоким разрешением — 8–10 м и лучше.

Тем не менее общедоступные данные PCA Sentinel-1 с размером пикселя 40 м все же позволяют получить более или менее достоверное представление о закономерностях пространственного распределения айсбергов по акватории, за исключением узкой прибрежной полосы радиолокационной тени. Также такие данные позволяют выявить районы образования наиболее крупных айсбергов.

При создании базы спутниковых данных об айсбергах по какому-либо району можно использовать снимки разных спутников, как радиолокационных, так и с аппаратурой видимого диапазона. Однако необходимо выполнять корректировку измерений, полученных по общедоступным данным PCA Sentinel 1, используя эталонные измерения в видимом диапазоне.

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

1. Шапошников В.М., Александров А.В., Матанцев Р.А., Ивановская О.Д. Анализ айсберговой опасности на Северном морском пути на примере газозовов // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2 (26). С. 76–81.
2. Павлова Е.А., Алексеева Т.А., Мионов Е.У., Смоляницкий В.М. Особенности распределения айсбергов по данным судовых наблюдений в Карском море в 2004–2019 гг. // Российская Арктика. 2020. № 10. С. 30–36.
3. Сочнев О.Я., Корнишин К.А., Тарасов П.А., Сальман А.Л., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Ефимов Я.О., Мамедов Т.Э. Исследование ледников Российской Арктики для обеспечения айсберговой безопасности работ на шельфе // Нефтяное хозяйство. 2018. № 10. С. 92–97. doi: 10.24887/0028-2448-2018-10-92-97.
4. Обнаружение по спутниковым данным опасных ледяных образований вблизи инженерных объектов хозяйственной деятельности на шельфе арктических морей: Методическое пособие / Под ред. к. ф.-м. н. В.Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2017. 76 с.
5. Бычкова И.А., Смирнов В.Г. Использование спутниковой информации для обнаружения айсбергов и оценки айсберговой угрозы // Лед и снег. 2018. № 4. С. 537–551.
6. Жичкин А.П. Ледовые условия в районе архипелага Земля Франца-Иосифа // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 4 С. 82–89.
7. Бузин И.В., Глазовский А.Ф., Гудошников Ю.П., Данилов А.И., Дмитриев Н.Е., Зубакин Г.К., Кубышкин Н.В., Наумов А.К., Нестеров А.В., Скутин А.А., Скутина Е.А., Шибакин С.И. Айсберги и ледники Баренцева моря: Исследования последних лет. Ч. 1. Основные продуцирующие ледники, распространение и морфометрические особенности айсбергов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). С. 66–79.
8. Номенклатура ВМО по морскому льду. Т. 1. WMO/ОММ/ВМО. № 259. Издание 1970–2019 гг. Женева, ВМО.
9. Report of the International Ice Patrol in the North Atlantic 2021 Season /United States Coast Guard. November 2021. Bulletin No. 107. Report number: CG-188-76. 176 p. doi:10.13140/

RG.2.2.11141.88804. URL: https://www.researchgate.net/publication/356613677_International_Ice_Patrol_2021_Annual_Report?channel=doi&linkId=61a5069a4553ea1b7ab39684&showFulltext=true (дата обращения: 01.06.2023).

10. Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лед и снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358. doi: 10.31857/S2076673421030093.

11. Kochtitzky W., Copland L., Van Wychen W., Romain Hugonnet R., Hock R., Dowdeswell J.A., Benham T., Strozzi T., Glazovsky A., Lavrentiev I., Rounce D.R., Millan R., Cook A., Dalton A., Jiskoot H., Cooley J., Jania J., Navarro F. The unquantified mass loss of Northern Hemisphere marine-terminating glaciers from 2000–2020 // Nature Communications. 2022. V. 13. Paper 5835. doi: 10.1038/s41467-022-33231-x.

12. Говоруха Л.С. Современное наземное оледенение Советской Арктики. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 256 с.

13. Глазовский А.Ф. Гляциологические исследования в Российской Арктике осенью 2007 г. // Земля и Вселенная. 2010. № 2. С. 66–76.

14. Виноградов О.Н., Псарева Т.В. Каталог ледников СССР. Т. 3. Северный край. Ч. 1. Земля Франца-Иосифа. М.: Гидрометеиздат, 1965. 147 с.

15. Кубышкин Н.В., Андреев О.М., Бородулин В.В., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Скутин А.А. Экспедиционные исследования айсбергов и ледников западного сектора Российской Арктики по программе международного полярного года (2007–2008 гг.) // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. № 51. С. 169–180.

16. Глазовский А.Ф. Ледники Российской Арктики. Новые решения // ESRI CIS. Arc review. 2002. № 3 (22). ГИС и данные дистанционного зондирования. URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2002/08/17/glaciers-of-russian-arctic/> (дата обращения: 01.06.2023).

17. 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). С. 21–37. doi:10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-21-37.

REFERENCES

1. Shaposhnikov V.M., Aleksandrov F.V., Matantsev R.A., Ivanovskaya O.D. Iceberg hazard analysis on the Northern Sea Route on the example of gas carriers. *Arktika: elologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economy. 2017, 26 (2): 76–81. [In Russian].

2. Pavlova E.A., Alekseeva T.A., Mironov E.U., Smolyanitsky V.M. Peculiarities of distribution of icebergs by ship data in the Kara Sea. *Rossijskaya Arktika*. Russian Arctic. 2020, 10: 30–36. [In Russian].

3. Sochnev O.Y., Kornishin K.A., Tarasov P.A., Salman A.L., Glazovsky A.F., Lavrentiev I.I., Efimov Y.O., Mamedov T.E. Study of glaciers in the Russian Arctic to ensure iceberg safety for offshore operations. *Neftyanoe khozyaistvo*. Oil industry. 2018, 10: 92–97. doi: 10.24887/0028-2448-2018-10-92-97. [In Russian].

4. *Obnaruzhenie po sputnikovym dannym opasnykh ledyanykh obrazovaniy vblizi inzhenernykh ob'ectov khozyaistvennoi deyatel'nosti na shelfe arkticheskikh morei: Metodicheskoe posobie*. Detection by satellite data of dangerous ice formations near engineering objects of economic activity on the shelf of the Arctic seas: methodological guide. Ed. V.G. Smirnov. St. Petersburg: AARI, 2017: 76 p. [In Russian].

5. Bychkova I.A., Smirnov V.G. Use of satellite data for detecting icebergs and evaluating the iceberg threats. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (4): 537–551. [In Russian].

6. Zhichkin A.P. Ice conditions in the Franz Josef Land archipelago. *Trudy Kolskogo hauthnogo centra RAN*. Proc. of Kola Science Center RAS. 2014, 4: 82–89. [In Russian].
7. Buzin I.V., Glazovsky A.F., Gudoshnikov Yu.P., Danilov A.I., Dmitriev N.E., Zubakin G.K., Kubyshkin N.V., Naumov A.K., Nesterov A.V., Skutin A.A., Skutina E.A., Shibakin S.I. Icebergs and glaciers of the Barents Sea. Results of the most recent research. Part 1. Main producing glaciers, their propagation and morphometric properties. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2008, 78 (1): 66–79. [In Russian].
8. WMO Sea Ice Nomenclature. V. 1. WMO/OMM/BMO. No.259. Edition 1970–2019. Geneva, WMO. [In Russian, English, French, Spanish].
9. Report of the International Ice Patrol in the North Atlantic 2021 Season /United States Coast Guard. November 2021. Bulletin No. 107. Report number: CG-188-76. 176 p. doi:10.13140/RG.2.2.11141.88804. Available at: https://www.researchgate.net/publication/356613677_International_Ice_Patrol_2021_Annual_Report?channel=doi&linkId=61a5069a4553ea1b7ab39684&showFulltext=true (accessed 01.06.2023).
10. Khromova T.E., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Ya., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (3): 341–358. doi: 10.31857/S2076673421030093. [In Russian].
11. Kochitzky W., Copland L., Van Wychen W., Romain Hugonnet R., Hock R., Dowdeswell J.A., Benham T., Strozzi T., Glazovsky A., Lavrentiev I., Rounce D.R., Millan R., Cook A., Dalton A., Jiskoot H., Cooley J., Jania J., Navarro F. The unquantified mass loss of Northern Hemisphere marine-terminating glaciers from 2000–2020. *Nature Communications*. 2022, 13: 5835. doi: 10.1038/s41467-022-33231-x.
12. Govorukha L.S. *Sovremennoe oledenenie Sovetskoi Arktiki*. Modern glaciation of the Soviet Arctic. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988: 256 p. [In Russian].
13. Glazovsky A.F. Glaciological research in the Russian Arctic in autumn 2007. *Zemlya i Vselennaya*. Earth and Universe. 2010, 2: 66–76. [In Russian].
14. Vinogradov O.N., Psareva T.V. *Katalog lednikov USSR*. USSR Glacier Inventory. V. 3. Northern area. Pt.1. Franz Josef land. Moscow: Hydrometeoizdat, 1965: 147 p. [In Russian].
15. Kubyshkin N.V., Andreev O.M., Borodulin V.V., Glazovsky A.F., Macheret Yu.Ya., Skutin A.A. Expedition research of icebergs and glaciers in the western sector of the Russian Arctic under the program of the international polar year (2007–2008). *Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova*. Proc. Central Research Institute acad. A.N. Krylova. 2010, 51: 169–180. [In Russian].
16. Glazovsky A.F. Glaciers of the Russian Arctic. New Solutions. ESRI CIS. Arc. Review. 2002, 22 (3). Available at: <https://arcreview.esri-cis.ru/2002/08/17/glaciers-of-russian-arctic/> (accessed 01.06.2023). [In Russian].
17. Buzin I.V., Glazovsky A.F., May R.I., Mironov E.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 Herald. 2020, 107–108 (3–4): 21–37. doi:10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-21-37. [In Russian].