

## Оценка объёма айсбергового стока с выводных ледников Северной Земли за 2014–2019 гг.

© 2021 г. И.А. Бычкова<sup>1,2\*</sup>, В.Г. Смирнов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия  
\*bychkova@aari.ru

## Estimation of the volume of icebergs calved from the outlet glaciers of the Severnaya Zemlya archipelago for 2014–2019

I.A. Bychkova<sup>1,2\*</sup>, V.G. Smirnov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia; <sup>2</sup>Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia  
\*bychkova@aari.ru

Received April 30, 2020 / Revised September 10, 2020 / Accepted December 22, 2020

**Keywords:** *Severnaya Zemlya, glacier, icebergs, iceberg runoff, Arctic seas, satellite monitoring, visible spectral rang.*

### Summary

Volume of icebergs calved from the output glaciers located on the Northern Land during 2014–2019 was estimated using the satellite information. High-resolution satellite data were obtained in the visible spectral range from the non-commercial satellites Sentinel-2 (spatial resolution 10 m) and Landsat-8 (spatial resolution 15 m). Data collection was carried out under conditions when the natural illumination in the Arctic was sufficient (March–September) to make pictures in the visible spectral range. About 100 satellite images were analyzed for each year of the above period. The technique used for the iceberg detection is based on statistical criteria for finding the gradient zones in the analysis of two-dimensional fields of satellite images. The generation of the iceberg from a particular glacier was verified by using a form template of the detected iceberg taking into consideration the following parameters of the object: the geometrical shape, dimensions, specific features of «picture» of the ice surface (presence and orientation of cracks, peaks, and lakelets of melt water). The iceberg height was determined by its shadow on the image. The calculated total annual volume of icebergs from the outlet glaciers was estimated 1.52–1.9 km<sup>3</sup>. According to satellite data, the annual area reduction of the Northern Land outlet glaciers averaged 13 km<sup>2</sup>. The greatest contribution is made by 12 outlet glaciers located on the Komsomolets and the October Revolution islands. Of these, six are from the Academy of Sciences ice dome, four – the glaciers of the Matusевич Fjord, the Vavilov Glacier and the Rusanov dome glacier № 12. Icebergs of maximum height (30–40 m) are produced by glaciers of the North-Eastern slope of the Academy of Sciences ice dome and glacier № 12 of the Rusanov dome. In general, according to satellite data of recent years, generation of icebergs from the outlet glaciers of the Northern Land shows a steady growth trend.

**Citation:** Bychkova I.A., Smirnov V.G. Estimation of the volume of icebergs calved from the outlet glaciers of the Severnaya Zemlya archipelago for 2014–2019. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (1): 14–25. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421010068.

*Поступила 30 апреля 2020 г. / После доработки 10 сентября 2020 г. / Принята к печати 22 декабря 2020 г.*

**Ключевые слова:** *Северная Земля, ледник, айсберги, айсберговый сток, арктические моря, спутниковый мониторинг, видимый диапазон.*

По спутниковым данным видимого спектрального диапазона оценена продуктивность выводных ледников Северной Земли как источников айсбергов в период 2014–2019 гг. Рассчитанный ежегодный суммарный айсберговый сток с выводных ледников составил 1,52–1,9 км<sup>3</sup>. Наибольший вклад в айсберговый сток вносят выводные ледники ледникового купола Академии наук и шельфовый ледник Матусевича. Согласно спутниковым данным последних лет, айсберговый сток выводных ледников Северной Земли имеет устойчивую тенденцию к росту.

### Введение

Во втором десятилетии XXI в. в Арктике произошли заметные климатические изменения, сопровождавшиеся сокращением ледяного покрова на арктических архипелагах и увеличением безлёдного периода на акваториях морей [1].

В результате активизировались процессы таяния ледников [2]. В связи с этим возросла айсберговая угроза на трассах Северного морского пути и в районах добычи углеводородов на прибрежном шельфе. Для обеспечения безопасности судоходства и снабжения проектировщиков инженерно-технических сооружений на шельфе досто-

верными данными для расчёта потенциальных нагрузок от столкновения с опасным ледяным объектом необходима актуальная информация о частоте наблюдений за айсбергами и их параметрами в конкретных морях.

К одному из айсбергоопасных районов, через которые проходят судоходные трассы, выполняются логистические операции для обеспечения специализированных работ на шельфе и снабжения организаций, ведущих хозяйственную деятельность на арктических островах, относятся акватории Карского моря и моря Лаптевых, прилегающие к Северной Земле. Этот архипелаг — один из основных источников айсбергов в Арктике. Здесь известно 99 выводных ледников [3], значительная часть которых достигает моря и продуцирует айсберги, их куски и обломки. Регулярный мониторинг выводных ледников с использованием дистанционных средств наблюдения позволяет оценить фронтальную абляцию ледников (потери массы ледника за счёт откола айсбергов и таяния при контакте с морской водой) и айсберговую опасность в конкретном регионе, так как айсберговый сток — главная составляющая фронтальной абляции ледников. Задачи настоящего исследования — актуализация оценки годового айсбергового стока ледников Северной Земли по материалам спутниковых наблюдений последних лет, а также выявление ледников, производящих наибольшее число айсбергов.

Первым приближённую оценку годового айсбергового стока ледников Северной Земли дал Л.С. Говоруха [3, 4]. Он исходил из средне-статистических параметров ледников, ориентируясь на общую длину их фронтов, средние значения скорости движения и среднюю толщину краевой части. В Каталоге ледников 1980 г. [3] общий годовой сброс айсбергов выводными ледниками Северной Земли оценён в  $0,383 \text{ км}^3$ . При расчётах взяты следующие значения параметров ледников: среднегодовая скорость движения ледников  $100 \text{ м/год}$ , толщина краевой части ледников  $20 \text{ м}$ , суммарная длина фронтов выводных ледников  $191,5 \text{ км}$ . С учётом откола айсбергов от недифференцированных ледяных берегов годовой сток ледников Северной Земли по данным Каталога составил  $0,4 \text{ км}^3$  [3]. В дальнейшем эта оценка стока уточнялась разными авторами по материалам разных лет. В работах

Л.С. Говорухи 1989 г. [5] годовой айсберговый сток всех ледников архипелага в 1929—1972 гг. оценивается уже в  $0,45\text{--}0,55 \text{ км}^3$  льда. А.Ф. Глазовский и Ю.Я. Мачерет по материалам наблюдений 1952—2001 гг. дали оценку айсбергового стока в  $0,7 \text{ км}^3$  [6]. В статье В.М. Котлякова [7] приведено значение айсбергового стока Северной Земли в  $0,2 \text{ км}^3$ . Мы видим, что данные о годовом айсберговом стоке ледников Северной Земли, полученные разными авторами, существенно различаются. Для уточнения оценок вместо совокупной длины фронтов выводных ледников следует учесть различный вклад конкретных ледников в общий айсберговый сток, пульсирующий характер движения некоторых ледников, различия в толщине краевой части.

В настоящее время можно получить актуализированную оценку айсбергового стока ледников Северной Земли, основываясь на спутниковых снимках 2010-х годов, — периода, когда началось ускоренное изменение климатических условий в Арктике [1]. Кроме оценки общего айсбергового стока, необходимы статистические характеристики продуктивности каждого выводного ледника, включая типичные геометрические параметры айсбергов, порождаемых конкретным ледником. Решить такую задачу можно путём использования круглогодичного спутникового мониторинга региона.

#### Методика исследований и материалы наблюдений

Работа выполнялась на материалах спутниковых наблюдений видимого диапазона с разрешением  $10\text{--}15 \text{ м}$ , размещённых в сети Интернет. Это информация некоммерческих спутников Sentinel-2 (два спутника запущены в 2015—2017 гг.) и Landsat-8 (запущен в 2013 г., данные доступны с июля 2013 г.). Материалы собирались в условиях достаточной для использования данных видимого спектрального диапазона естественной освещённости в Арктике (март—сентябрь). За каждый год рассматриваемого периода (2014—2019 гг.) проанализировано свыше 100 спутниковых изображений. В программе ArcGIS по спутниковым снимкам фиксировалось положение фронтов выводных ледников на март каждого года — в период существования припая вдоль всего побережья ар-

хипелага. Затем отслеживалось перемещение фронта каждого выводного ледника в течение всего сезона по сентябрь включительно; фиксировались максимальное продвижение ледника в сторону моря (если оно было) и положение его фронта на последнем информативном снимке сентября (в ряде случаев на начало октября). Для каждого ледника рассчитывалось сезонное изменение площади краевой части ледника: приращение или убыль ледниковой поверхности с начала наблюдения в марте до окончания в сентябре или до достижения максимального продвижения фронта в промежуточный период (если такое продвижение было зарегистрировано). Поскольку в период полярной ночи спутниковые наблюдения в видимом диапазоне невозможны, для каждого ледника дополнительно оценивалось изменение положения фронта с момента последнего осеннего снимка до первого весеннего снимка следующего года (изменение в зимний период).

При оценке изменения площадей краевой части ледника учитывались погрешности в определении географического положения объекта на спутниковом снимке –  $\pm 1$  пиксель, а для Landsat-8 –  $\pm 15$  м. При сравнении положения фронта ледника на двух одновременных снимках максимальная абсолютная погрешность определения длины (и ширины) зоны сокращения площади ледника составит 30 м. Тогда для площади  $1 \text{ км}^2$  и более относительная ошибка определения площади будет равна 6–8% (в зависимости от геометрической формы зоны), площади  $0,1 \text{ км}^2$  – 20–21%,  $0,01 \text{ км}^2$  – уже 60%. Ледники, краевая часть которых по использованным спутниковым данным за сезон менялась менее чем на  $0,1 \text{ км}^2$  ( $< 50$  пикселей), при дальнейшем анализе не учитывались.

Данные по наиболее активным ледникам приведены в таблице. Для этих ледников оценена также толщина их фронтальной части, основанная на измерении по тени на спутниковых снимках от айсбергов, отколовшихся от конкретных ледников. Высота надводной части айсберга устанавливалась по снимкам, выполненным в марте в утренние часы, когда угол возвышения Солнца над горизонтом составляет 8–10°. При таких малых углах объекты дают большие тени, что позволяет уменьшить погрешности определения высоты. Как уже отмечалось, погрешность

измерения длины объекта для снимков Landsat-8 составляет  $\pm 15$  м (1 пиксель). Погрешность измерения высоты айсберга при длине его тени  $l$  и угле Солнца  $a$  определяется по выражению  $(l \pm 15) \operatorname{tg} a$ . При угле Солнца  $10^\circ$  и длине его тени 57 м расчётная высота айсберга получается равной 10 м:  $(57 \pm 15) \operatorname{tg} 10^\circ = (57 \pm 15) \times 0,176 \approx 10 \pm 2,6$  м. Погрешность расчёта высоты надводной части айсберга при угле Солнца  $10^\circ$  составит 2,6 м, что даёт относительную погрешность определения высоты 40-метрового айсберга при угле Солнца  $10^\circ$  равную 6,5%. Для каждого снимка Landsat-8 во вспомогательных файлах дана информация о положении солнца на момент съёмки, которая использовалась для расчёта длины тени от айсбергов на конкретном снимке.

Толщина краевой части ледника считалась равной среднему значению общей высоты отколовшегося айсберга, оценённой из уравнения гидростатического равновесия:  $\rho_{\text{в}} g V_2 = \rho_{\text{л}} g V_1$ , где  $\rho_{\text{в}}$ ,  $\rho_{\text{л}}$  – плотность воды и льда соответственно;  $V_1$ ,  $V_2$  – объём надводной и подводной частей айсберга;  $g$  – ускорение свободного падения. Для айсберга, имеющего формы правильного геометрического тела, например призмы, соотношение высот надводной  $h_1$  и подводной  $h_2$  частей выражается следующим образом:  $h_1/h_2 = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}})/\rho_{\text{л}}$ , что даёт соотношение  $h_1/h_2 = 1:8$  для условий моря Лаптевых. Однако реально форма надводной и подводной частей айсберга может существенно отличаться, поэтому для уточнения величины  $h_1/h_2$  необходимы инструментальные наблюдения за формой подводной части айсбергов и их осадкой. Поскольку таких измерений не проводилось, мы использовали сведения о соотношении высоты и осадки айсберга из открытых публикаций. Так, в работе [8] приводятся соотношения высоты/осадки для арктических айсбергов разной формы, полученные Международным ледовым патрулем: столбовые айсберги – 1:5, куполообразные – 1:4. В работе [9] при исследованиях в Баренцевом море для айсбергов получено соотношение надводной и подводной частей 1:4. В настоящей работе при расчётах общей высоты айсбергов также использовалось соотношение 1:4.

При расчётах средней высоты надводной части айсбергов в первую очередь отбирались столбовые айсберги. Исключались айсберги, севшие на мель в прибрежной зоне, так как

Изменение площади поверхности выводных ледников Северной Земли (км<sup>2</sup>) по спутниковым данным за 2014–2019 гг.

Ледники <sup>1</sup>	2014 г.		2015 г.		2016 г.		2017 г.		2018 г.		2019 г.		2014–2019 гг
	+ <sup>2</sup>	- <sup>3</sup>	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
<i>Ледниковый купол Академии наук</i>													
8	0,38	1,82	0,35	1,49	0,646	0,95	0,41	2,06	0	3,0	0	2,19	11,51
11	0	0	0	0,09	0	0	0	0,3	0,022	0	0	0	0,39
12	0	0	0	0,27	0	0,15	0	0,09	0	0,04	0	0	0,55
13	0	0,24	0	0,41	0	0,39	0	0,47	0,04	1,3	0	1,47	4,27
14	0	1,21	0	1,76	0	0,83	0	0,51	0	1,26	0	0,24	5,8
15	0	0,25	0	0,25		0,19	0,017	0,063	0	0,25	0	0	1,0
16	0,72	0,17	0,49	2,31	0,22	1,23	0,87	1,17	0,06	2,4	0,7	1,99	9,27
17	0	0	0,052	0,03	0	0	0	0	0	0,22	0	0,16	0,41
18	0	0	0	0,2	0	0,16	0	0,18	0	0,23	0	0	0,77
19	0	0,27	0,273	0,15	0,146	2,06	0,3	1,18	0,72	0,41	0,2	1,82	5,89
<i>Ледниковые купола Русанова и Карпинского</i>													
12	0	0,3	0	0,8	0	0	0,05	0,35	0,084	0,09	0,017	0,15	1,69
17	0,034	0,094	0	0,1	0	0,4	0	0,11	0	0,45	0	0,06	1,29
21	- <sup>4</sup>	-	-	-	-	0	0	0,86	0	0,31	0	0,71	1,88
48 АНИИ	-	-	-	-	-	0,13	0	0,33	0	0,23	0	0,21	0,9
49 Исследователей	0,409	0,37	0	2,24	0	1,52	0,051	0,35	0,1	1,0	0	1,0	6,48
34 шельфовый	0,17	0,05	0	3,3	0	1,42	0	3,18	0	3,1	0	0,71	11,76
<i>Ледниковый купол Университетский</i>													
65 <sup>5</sup> +88	0	0,37	0,21	0	0	0,25	0,41	0,06	0	0,02	0,12	0,02	0,72
90	0,019	0,01	0,074	0,06	0	0,3	0	0,06	0,015	0	0	0,21	0,63
92	0	0	0	0	0	0,05	0	0	0	0	0	0,011	0,06
93	0	0	0	0	0	0,05	0	0	0	0	0	0	0,05
94	0,05	0,06	0,135	0,05	0	0,29	0,51	0,51	0	0	0	0,02	0,92
95	0	0	0	0	0	0,52	0	0,04	0	0	0	0,01	0,57
96	0	0,15	0	0,17	0,01	0,13	0	0,04	0	0	0	0,06	0,55
Вавилова	3,3	0,16	22,9	0,85	13,4	3,55	8,18	0,75	1,78	1,55	2,19	3,26	10,12
<i>Остров Большевик</i>													
39	0	0	0	0,15	0	0	0	0	0	0	0	0	0,15
40	0	0	0	0,09	0	0	0	0,08	0	0	0,015	0,04	0,21
49	0	0	0	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04
95	0	0,03	0	0,27	0,03	0,02	0	0,08	0	0	0	0,02	0,42
<i>Итого</i>		5,53		15,08		14,65		12,82		15,85		14,37	78,31

<sup>1</sup>Номера и названия ледников даны по Каталогу WGI, положение выводных ледников показано на рис. 1; <sup>2</sup>(+) приращение площади выводного ледника при его продвижении; <sup>3</sup>(-) убыль площади при разрушении краевой части выводного ледника; <sup>4</sup>выход ледника во фьорд блокируется шельфовым ледником; <sup>5</sup>также называется ледник Марата, относится к ледниковому куполу Карпинского.

эта ситуация ограничивает применимость гидростатики для оценок массы объекта. Не принимались во внимание куски и обломки айсбергов, образующиеся при отколе. Общий айсберговый сток выводных ледников был оценён как сумма объёмов разрушившейся за год краевой части каждого из наиболее активных ледников, исходя

из расчётной площади исчезнувшей ледниковой поверхности и её оценочной толщины.

Айсберги находили с помощью методики, основанной на статистических критериях поиска градиентных зон при анализе двумерных полей спутниковых изображений [10]. Откол айсберга от конкретного ледника подтверждается путём

использования шаблона формы обнаруженного айсберга, который учитывает совокупность нескольких параметров объекта: геометрическую форму, размеры, характерные особенности «рисунка» поверхности (наличие и взаимное расположение трещин, вершин, озерков талой воды).

### Результаты и обсуждение

Анализ спутниковых изображений 2014–2019 гг. позволил обнаружить 28 активных ледников Северной Земли, производящих наибольшее число айсбергов, их кусков, обломков и более мелкого материала (см. таблицу, рис. 1, 2). Номера ледников в таблице и на рис. 1 даны по Всемирному каталогу ледников World Glacier Inventory, из базы данных ледников GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space), основанной на спутниковых данных оптического диапазона [11]. Из этих 28 ледников 90,7% айсбергового стока приходится на 12 самых активных ледников Северной Земли. В совокупности на этих 12 ледниках за шесть лет исчез 71 км<sup>2</sup> ледниковой поверхности – от максимального значения 11,76 км<sup>2</sup> на шельфовом леднике Матусевича до 1 км<sup>2</sup> на леднике № 15 ледникового купола Академии наук. Приведём данные по этим 12 ледникам.

1. Шельфовый ледник Матусевича – 11,76 км<sup>2</sup>.
2. Ледник № 8 ледникового купола Академии наук – 11,51 км<sup>2</sup>.
3. Выводная лопасть ледникового купола Вавилова – 10,12 км<sup>2</sup>.
4. Ледник № 16 ледникового купола Академии наук – 9,27 км<sup>2</sup>.
5. Ледник Исследователей (№ 49 ледникового купола Карпинского) – 6,48 км<sup>2</sup>.
6. Ледник № 19 (№ 7 по каталогу Рандольфа (Randolph glacier Inventory, RGI, версия V6.0) ледникового купола Академии наук – 5,89 км<sup>2</sup>.
7. Ледник № 14 ледникового купола Академии наук – 5,8 км<sup>2</sup>.
8. Ледник № 13 ледникового купола Академии наук – 4,27 км<sup>2</sup>.
9. Ледник Ходова (№ 21 ледникового купола Русанова) – 1,88 км<sup>2</sup>.
10. Ледник № 12 ледникового купола Русанова – 1,69 км<sup>2</sup>.
11. Ледник № 17 ледникового купола Русанова – 1,29 км<sup>2</sup>.
12. Ледник № 15 ледникового купола Академии наук – 1,0 км<sup>2</sup>.

В работе [12] по данным радиолокационно-спутника Sentinel-1 за период с ноября 2016 по ноябрь 2017 г. проведено сравнение годового айсбергового стока с восемью ледниковых бассейнов купола Академии наук. В принятой в нашей статье нумерации это ледники № 8,

11–19 (№ 7 по каталогу RGI). По объёму айсбергового стока за 2017 г. ледники в исследовании [12] в порядке убывания располагаются следующим образом: № 8, 19, 14, 16, 11–13, 18, 15, 17, а в нашей работе в таком порядке: № 8, 19, 16, 11–13, 14, 18, 15, 17. Наибольший годовой айсберговый сток [12] зафиксирован у ледника № 8 – 0,69 Гт/год (0,77 км<sup>3</sup>/год) с учётом толщины краевой части ледника 223 м по радарным измерениям 1997 г. [13]. По нашим оценкам, в 2017 г. ледник № 8 также превосходил остальные ледники, исследованные в работе [12], по объёму айсбергового стока: 0,41 км<sup>3</sup>/год (при толщине его краевой части, полученной из общей высоты айсберга 200 м). На втором месте – ледник № 19 (№ 7 по каталогу RGI). Его айсберговый сток у авторов работы [12] – 0,44 Гт/год (0,49 км<sup>3</sup>/год), а в настоящем исследовании – 0,24 км<sup>3</sup>/год. Третью позицию в списке, по нашим данным, занимает ледник № 16 с годовым стоком 0,13 км<sup>3</sup> при толщине краевой части ледника 85 м. По материалам работы [12], ледник № 16 занимает четвёртое место с параметрами стока 0,18 Гт/год (0,2 км<sup>3</sup>/год); оценка получена, исходя из толщины ледника 83 м, установленной по радарным измерениям 1997 г. Третье место в работе [12] – у ледника № 14, айсберговый сток которого составляет 0,41 Гт/год (0,45 км<sup>3</sup>/год). В нашем исследовании айсберговый сток с этого ледника за 2017 г. оказался на пятом месте – 0,09 км<sup>3</sup>/год.

Таким образом, несовпадение в упорядоченном по величине айсбергового стока ряду ледников в нашем исследовании и в статье [12] наблюдается только для ледника № 16. В нашем исследовании этот ледник даёт больший относительный вклад в общую фронтальную абляцию по сравнению с другими ледниками. Этот факт можно объяснить тем, что в работе [12] использовались спутниковые данные с интервалом 12 сут., а у ледника № 16 максимальная за сезон подвижка наблюдается в конце июня, после чего следует откол айсбергов, и при таком интервале фазу максимальной подвижки можно пропустить. В нашей работе ежегодно использовалось несколько снимков района в июне – начале июля.

В работе [14] исследована фронтальная абляция в 2015–2016 гг. восьми ледников Северной Земли: двух на о. Комсомолец (№ 7, 8) и шести на о. Октябрьской революции (№ 17, Авсюка (№ 20), Сказочный, ААНИИ (№ 48), Исследователей



**Рис. 1.** Основные айсбергопродуцирующие ледники Северной Земли.

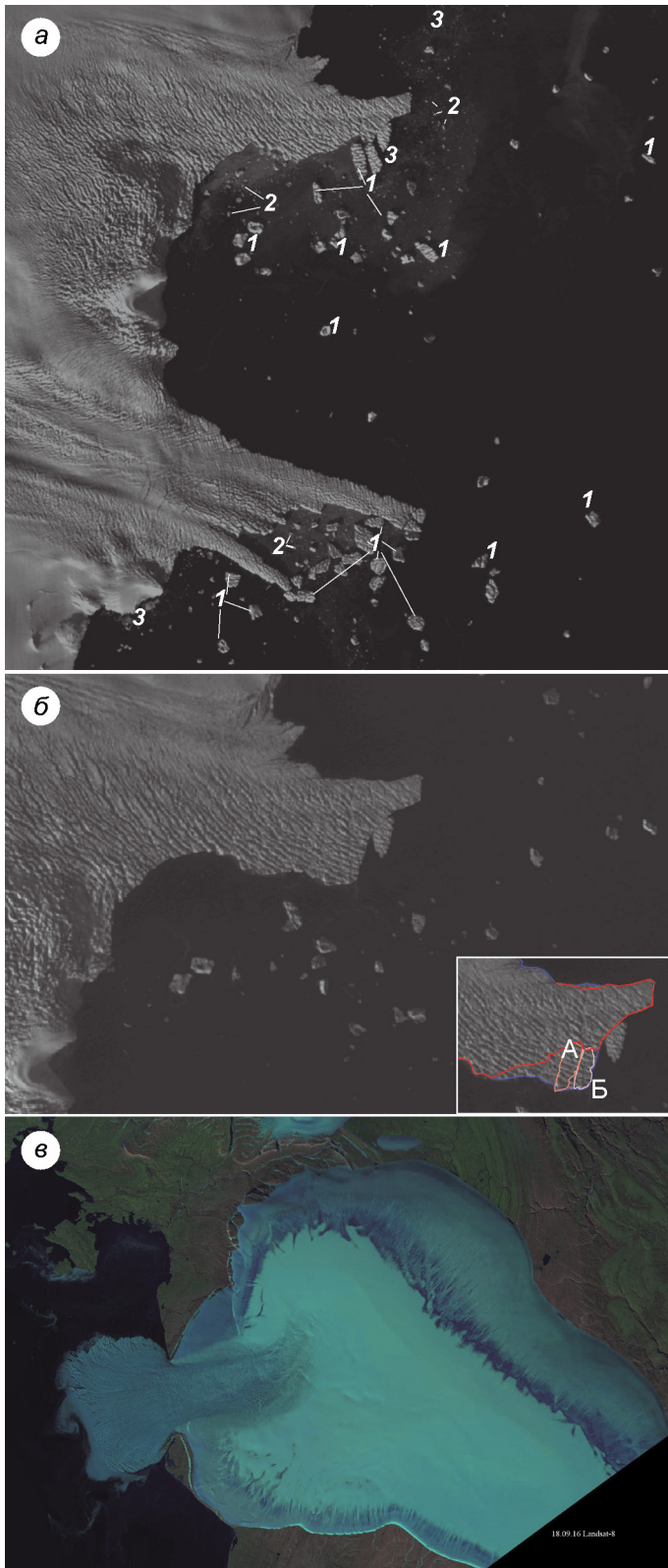
Номера выводных ледников даны по Всемирному каталогу ледников, а ледоразделы (показаны красными линиями) ледниковых куполов – в соответствии с базой данных GLIMS [11]

**Fig. 1.** The main iceberg-generating glaciers of the Severnaya Zemlya.

Numbers of outlet glaciers are given with the use of the World Glacier Inventory, ice divides of ice caps (the red line) are given with the use of the GLIMS [11]

(№ 49), Марата (№ 65)). Положение фронта ледников определялось по данным ИСЗ Landsat-8, толщина краевой части ледников – по материа-

лам авиационных наблюдений 2014–2016 гг. Наибольшие потери массы обнаружены у следующих ледников: № 8 (1,04 км<sup>3</sup>/год), Исследователей



**Рис. 2.** Примеры изображения выводных ледников Северной Земли на спутниковых снимках видимого диапазона.

*a* – ледник № 19 (№ 7 по каталогу RGI) купола Академии наук, 19.09.2019, ИСЗ Sentinel-2; *б* – ледник № 19 (№ 7 по каталогу RGI) купола Академии наук, 9.09.2019. На врезке показаны изменения краевой части ледника за период 9–19.09.2019, ИСЗ Sentinel-2; красной линией обозначен фронт ледника на 19.09.2019 г.; синей – фронт на 9.09.2019 г.; *в* – ледник Вавилова, 18 сентября 2016 г. ИСЗ Landsat-8. Снимок с сайта USGS.

*1* – айсберги; *2* – обломки и куски айсбергов; *3* – мелкообломочный материал; А, Б – айсберги, отколовшиеся от ледника № 19 в период с 9 по 19 сентября 2019 г.

**Fig. 2.** Examples of images of the Severnaya Zemlya outlet glaciers in the visible spectral range.

*a* – glacier № 19 (№ in catalog RGI) of the Academy of Sciences ice cap, 19.09.2019, Sentinel-2; *б* – glacier № 19 (№ 7 in catalog RGI) of the Academy of Sciences ice cap, 9.09.2019. In the insert – a fragment of the Sentinel-2 image with the changes of the glacier front in the period 9–19 September 2019; Sentinel-2, red line – front of the glacier, 19.09.2019; blue line – front of the glacier 9.09.2019; *в* – Vavilov glacier, September 18, 2016, Landsat-8. Images from the USGS website.

*1* – icebergs; *2* – bergy bits and growlers; *3* – fine-grained material; А, Б – icebergs that broke off from glacier № 19 between September 9 and 19, 2019.

(0,77 км<sup>3</sup>/год) и № 7 (№ 19 в использованной нами нумерации – 0,63 км<sup>3</sup>/год). Остальные ледники теряли за год за счёт фронтальной абляции от 0,37

(№ 48) до 0,01 (ледник Сказочный) км<sup>3</sup>/год. По нашим данным, из ледников, исследованных авторами работы [14], в 2016 г. наибольшие потери

массы были у ледников № 19 (0,41 км<sup>3</sup>/год), № 8 (0,2 км<sup>3</sup>/год) и № 49 (0,15 км<sup>3</sup>/год), потери массы остальных ледников в их фронтальной части не превышали 0,04 км<sup>3</sup>/год.

Расхождение в оценках айсбергового стока по сравнению с данными работы [12] можно объяснить разницей в методике расчёта. Мы использовали для анализа только данные видимого диапазона 2014–2019 гг., доступные для этого региона ежегодно в период полярного лета, с марта до конца сентября – начала октября, а авторы работы [12] оперировали с радиолокационными данными, собранными с ноября 2016 по ноябрь 2017 г. Большинство рассмотренных ледников в октябре–ноябре из-за похолодания (переход к отрицательным температурам воздуха, появление припая) продуцируют значительно меньше айсбергов, чем в предшествующий период года, и положение фронта краевой части выводных ледников на снимках не меняется до следующего сезона. Однако некоторые ледники, в частности № 8 и 19, ведут себя иначе, процесс айсбергообразования и подвижка фронта ледника наблюдаются здесь и поздней осенью (это видно на РЛ-снимках), возможно, в силу динамических факторов. Весной, когда появляется возможность спутниковой съёмки в видимом диапазоне, фронт ледника оказывается примерно в том же положении, которое было зафиксировано на последнем осеннем снимке видимого диапазона в предыдущем году. Таким образом, отследить процессы айсбергообразования в межсезонье (октябрь–февраль) по данным только видимого диапазона не удаётся, поэтому наши данные по леднику № 8 занижены по сравнению с оценками, полученными в работах [12, 14], в 1,5–2 раза.

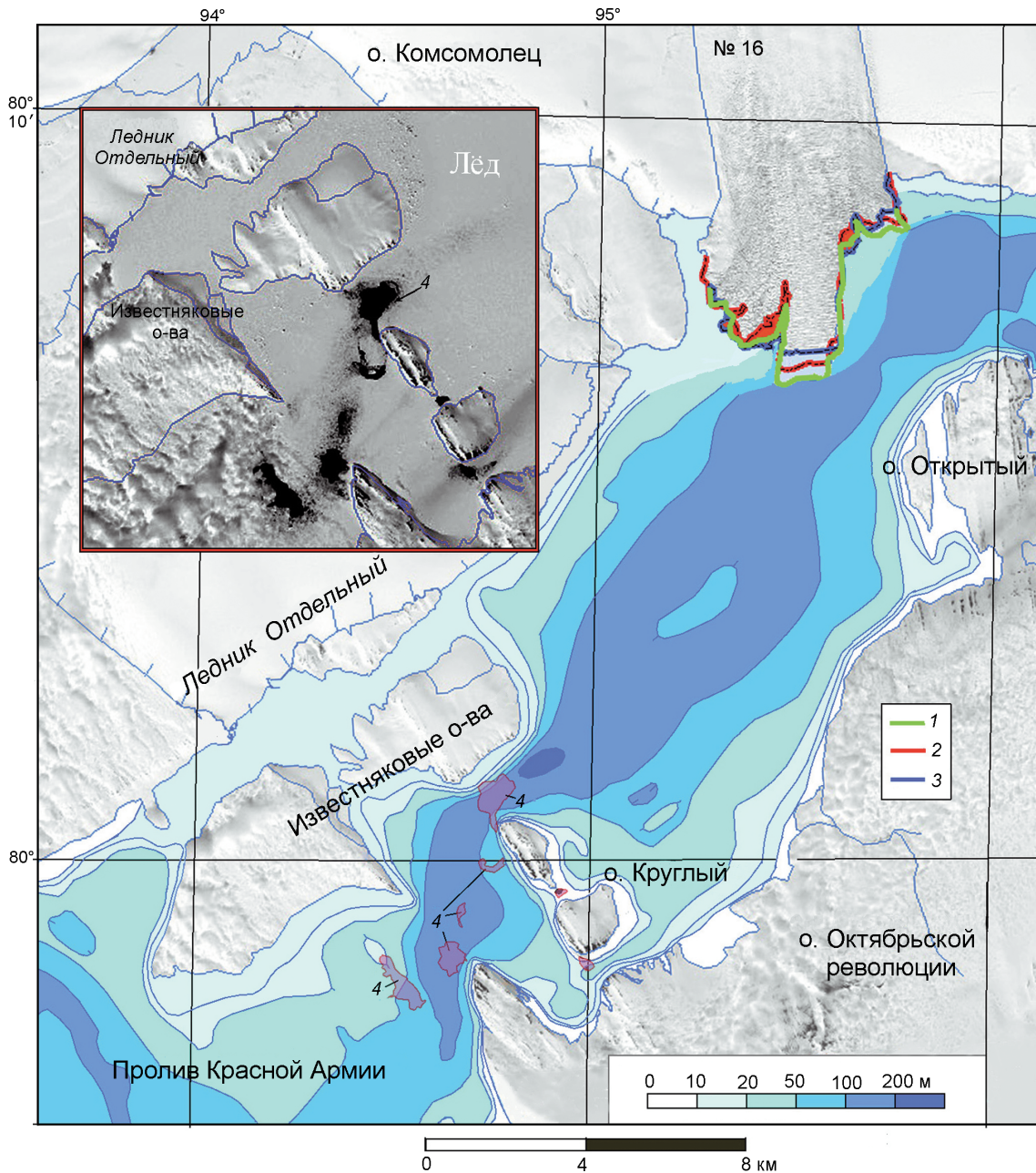
**Полученные по спутниковым данным оценки ежегодного суммарного айсбергового стока с выводных ледников.** В среднем за 2014–2019 гг. ежегодное сокращение площади выводных ледников Северной Земли, оценённое нами по спутниковым данным, составило 13 км<sup>2</sup>. Высота надводной части отколовшихся от ледников айсбергов, определённая по их тени на снимках видимого диапазона, изменялась от 10 до 40 м. Максимальная высота в 30–40 м характерна для столообразных айсбергов, образованных от ледника № 12 купола Русанова, и для айсбергов, генерируемых на северо-восточном склоне купола Академии наук. Исходя из этих значений, общую тол-

щину краевой части выводных ледников можно оценить в 50–200 м. Изучение дрейфа айсбергов, отколовшихся в период мониторинга от исследованных ледников, показало, что при глубинах 50 м и менее айсберги садятся на мель и в таком состоянии находятся несколько месяцев или даже лет. С учётом высоты айсбергов, измеренной по спутниковым снимкам, ежегодный суммарный айсберговый сток с выводных ледников при соотношении высоты к осадке от 1:4 до 1:5 составляет 1,52–1,9 км<sup>3</sup>. Для уточнения этих оценок необходимы инструментальные измерения осадки айсбергов у Северной Земли.

Выводные ледники Северной Земли имеют существенные различия в скорости продвижения фронта, интенсивности айсбергообразования, размерах и форме айсбергов. В проливе *Красной Армии* наибольшее число айсбергов образовано от ледника № 16 в западной части пролива; горизонтальные размеры формирующихся у этого ледника айсбергов достигают 420 м при высоте около 20 м и соотношении длины к ширине (1,5–2):1. Максимальная скорость продвижения фронта ледника в сторону пролива у ледника № 16 отмечается в конце июня, когда фронт ледника выдвигается на 300–400 м по сравнению с его положением в марте. На расстоянии 12–25 км к юго-западу от фронта ледника № 16 ежегодно в марте формируется каскад полыней (рис. 3), существующий вплоть до разрушения припая в летний период. Полыньи образуются в узкой глубоководной части пролива (глубины 100–200 м), разделяющей Известняковые острова. Происхождение полыней, по-видимому, связано с динамическим распространением вод, скорость которых повышается при прохождении через узости между островами, а течение приобретает турбулентный характер. В результате перемешивание изначально пресных ледниковых вод и солёных вод пролива усиливается и появляются полыньи. За счёт интенсивного ледообразования в полынях развивается конвективное перемешивание. Все эти регулярно наблюдаемые в районе ледника № 16 процессы существенно влияют на гидрологический режим пролива. Подобные процессы в районе других ледников архипелага по спутниковым данным отмечены не были.

Ледник № 14 ледникового купола Академии наук по числу отколовшихся айсбергов – второй в проливе *Красной Армии* после ледника





**Рис. 3.** Пример наблюдения полыней в районе выводного ледника № 16 на спутниковом снимке Landsat-8 за 24 июня 2017 г. Топография дна приведена по карте 1985 г. Масштаб 1:200 000.

На врезке – фрагмент снимка Landsat-8 от 24 июня 2017 г. 1 – максимальное выдвигание фронта ледника в июне 2017 г.; 2 – положение фронта в марте 2017 г.; 3 – положение фронта в конце сентября 2017 г.; 4 – участки, где образовались полыньи во льду

**Fig. 3.** An example of a polynyas observation in the area of the outlet glacier № 16 on the Landsat-8 satellite image on June 24, 2017. The topography of the bottom is shown on the map 1:200 000 (ed.1985).

In the sidebar – a fragment of the Landsat-8 image on June 24, 2017. 1 – is the maximum extension of the glacier edge in June 2017; 2 – is the position of the edge in March 2017; 3 – is the position of the edge in the end of September 2017; 4 – areas where polynyas in the ice formed

№ 16; его айсберги достигают размера 300 м при соотношении сторон (2,1–2,4):1. Ледник № 11 купола Академии наук на спутниковых сним-

ках 2011–2013 гг. выдвинулся в пролив на 800 м; в 2014 г. положение фронта ледника не изменилось по сравнению с более ранними снимка-

ми. Зимой 2017 г. язык этого выводного ледника разрушился и в дальнейшем подвижек у ледника не наблюдалось. Ледник № 12 купола Русанова, дренирующий купол на север в пролив Красной Армии (см. рис. 1), регулярно порождает единичные крупные столообразные айсберги удлиненной формы размером до 1–1,2 км при высоте около 30 м и соотношении сторон до 5:1.

Во *фьорде Матусевича* большинство айсбергов образует быстро распадающийся в последние годы шельфовый ледник. Размеры айсбергов различны, наибольший из них достигал 3 км в длину. Айсберги сползают не только во фьорд, но и в бухту Красная, где существуют изолированно много лет. В 2019 г. один айсберг, отколовшийся от шельфового ледника, дрейфовал в бухте Сказочная. Более детальный анализ процесса айсбергообразования во фьорде Матусевича дан в работах [9, 15, 16].

В *море Лаптевых* основной айсберговый сток дают ледники северо-восточного склона ледникового купола Академии наук, здесь айсберги достигают длины 1,2 км при высоте надводной части до 40 м. Ежегодный объём айсбергового стока ледника № 8 за период 2014–2019 гг. составляет, по материалам спутниковых наблюдений, 0,384 км<sup>3</sup>. Этот ледник даёт наибольший вклад в айсберговый сток с Северной Земли.

Особенность ледников № 8 и 19 (№ 7 по каталогу RGI) купола Академии наук – сравнительно высокая скорость сезонного колебания фронта. Так, всего за 10 дней сентября 2019 г. ледник № 19 лишился 0,22 км<sup>2</sup> площади краевой части с образованием двух крупных айсбергов размером 490 × 160 м и 420 × 150 м, а также обломков айсбергов и мелкообломочного материала (см. рис. 2, а, б). Потеряв в летне-осенний период значительную часть объёма и отступив в сторону суши, к весне фронт ледника возвращается примерно в то же положение, которое он занимал год назад. Ещё одна особенность этих ледников состоит в том, что большинство формирующихся здесь айсбергов уходит из района генерации в глубоководную часть моря Лаптевых в течение одного сезона и лишь самые крупные айсберги садятся на грунт у кромки ледников и задерживаются здесь на один сезон.

В *Карском море* наибольшее число айсбергов образует ледник Вавилова. Наличие густой сети трещин на языке выводного ледника и выход на

малые глубины (менее 50 м) объясняет преобладание здесь мелких айсбергов размером 40–50 м. В 2015 г. произошла резкая подвижка этого ледника, который выдвинулся в Карское море с приращением площади краевой части на 22,9 км<sup>2</sup> в год, что в 7 раз превысило аналогичный показатель 2014 г. В 2016–2017 гг. выдвигание продолжилось, но меньшими темпами (см. таблицу). В 2018–2019 гг. положение выводного языка ледника стабилизировалось и скорость его ежегодной подвижки вернулась к уровню 2014 г. В работах [17–19] дан более подробный анализ изменения скорости движения ледника Вавилова в 2010-е годы.

*Выводные ледники купола Академии наук*, выходящие в заливы Ковалевской и Журавлева, дают отдельные айсберги с размерами 400–700 м. Крупные айсберги, откалывающиеся от выводного ледника № 17, попадают на мелководье (глубины менее 20 м), практически сразу садятся на грунт и существуют на одном месте несколько лет, подвергаясь разрушению при динамических нагрузках, связанных с приливными колебаниями и воздействием штормов. Так, айсберг, образовавшийся здесь в 2012 г. [20], в 2017 г. пришёл в движение, переместился за сезон в южную часть залива и разрушился.

В *проливе Шокальского* большинство айсбергов появляется у западного побережья. Их источником служат десять выводных ледников купола Университетский и ледник № 65 купола Карпинского (см. рис. 1). Ни один из ледников не теряет за год более 1 км<sup>2</sup> площади во фронтальной части. По объёму айсбергового стока лидируют ледники № 94 и 65 (см. таблицу). Ледник Марата (№ 65) почти ежегодно производит достаточно крупные айсберги – до 600 м длиной при высоте надводной части до 20 м. На восточном побережье пролива основные источники айсбергов – выводной ледник № 40, имеющий выход во фьорд Спартака, а также № 95, выходящий во фьорд Тельмана. Эпизодически, не чаще одного раза в год, эти ледники формируют единичные крупные айсберги протяжённостью до 170 м. От ледника № 40 айсберги откалываются также в Спартаковское озеро.

Всего за 2014–2019 гг. в пролив Красной Армии ледниками было сброшено в виде айсбергов, их кусков и обломков 22,8 км<sup>2</sup> ледниковой поверхности (29,2% всей площади, «потерянной» ледниками Северной Земли), во фьорд Матусевича

ча — 22,3 км<sup>2</sup> (28,5%), в море Лаптевых — 17,4 км<sup>2</sup> (22,3%), в Карское море — 11,3 км<sup>2</sup> (14,5%), в пролив Шокальского — 4,29 км<sup>2</sup> (5,5%).

### Выводы

Использование регулярных спутниковых данных видимого диапазона позволило оценить ежегодный суммарный айсберговый сток с выводных ледников Северной Земли в период 2014–2019 гг. Расчётная величина среднегодового айсбергового стока составила 1,52–1,9 км<sup>3</sup>. Уточнить эти оценки можно при проведении инструментальных измерений осадки айсбергов у Северной Земли. Наибольший вклад в айсберговый сток ледников Северной Земли вносят шельфовый ледник фьорда Матусевича, ледники № 8 и № 16 ледникового купола Академии наук и ледник Вавилова. Айсберговый сток выводных ледников Северной Земли, оценённый по спутниковым данным последних лет, имеет устойчивую тенденцию к росту. В прибрежной зоне архипелага

возрастает число наблюдаемых айсбергов, что повышает риск безопасного плавания в этих акваториях, через которые проходят маршруты Северного морского пути. Для минимизации рисков, связанных с возможным столкновением с айсбергами как опасными ледяными образованиями необходима организация постоянного спутникового мониторинга региона Северной Земли.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-30019) в Российском государственном гидрометеорологическом университете (методика обнаружения айсбергов) и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-60109, исследование айсбергообразующих ледников).

**Acknowledgements.** The work under this project is supported by the Russian Science Foundation through the Project № 17-77-30019 in Russian State Hydrometeorological University (iceberg detection technique) and Russian Foundation for Basic Research (grant № 18-05-60109, study of outlet glaciers).

### Литература

1. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 6–21.
2. Aschwanden A., Fahnestock M.A., Truffer M., Brinkerhoff D.J., Hock R., Khroulev C., Mottram R., Khan S.A. Contribution of the Greenland Ice Sheet to sea level over the next millennium // *Science Advances* 19 Jun 2019. V. 5. № 6. eaav9396. doi: 0.1126/sciadv.aav9396.
3. Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 1. Северная Земля. Л.: Гидрометеиздат, 1980.
4. Говоруха Л.С. Бюджет внешнего массообмена оледенения Северной Земли в 1974–1976 гг. // *Тр. ААНИИ*. 1981. Т. 367. С. 31–37.
5. Говоруха Л.С. Современное оледенение Советской Арктики. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 256 с.
6. Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Евразийская Арктика // *Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху* / Отв. ред. В.М. Котляков. М.: Наука, 2006. С. 97–114.
7. Электронный ресурс: <https://bigenc.ru/3250942.pdf>.
8. Давыдов Л.К., Дмитриева А.А., Конкина Н.Г. *Общая гидрология*. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 463 с.
9. 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

### References

1. Alekseev G.V. Development and amplification of global warming in the Arctic. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2015, 1: 6–21. [In Russian].
2. Aschwanden A., Fahnestock M.A., Truffer M., Brinkerhoff D.J., Hock R., Khroulev C., Mottram R., Khan S.A. Contribution of the Greenland Ice Sheet to sea level over the next millennium. *Science Advances* 19 Jun 2019, 5 (6): eaav9396. doi: 10.1126/sciadv.aav9396.
3. *Katalog lednikov USSR*. USSR Glacier Inventory. V. 16. Is. 1. Pt. 1. Severnaya Zemlya. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980. [In Russian].
4. Govorukha L.S. Budget for external mass transfer of the Severnaya Zemlya glaciation in 1974–1976. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1981, 367: 31–37. [In Russian].
5. Govorukha L.S. *Sovremennoe oledenenie Sovetskoi Arktiki*. Modern glaciation of the Soviet Arctic. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1989: 256 p. [In Russian].
6. Glazovsky A.F., Macheret Y.Y. The Eurasian Arctic. *Oledenenie Severnoj i Central'noj Evrazii v sovremennuyu epokhu*. Glaciation of Northern and Central Eurasia in the modern era / Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Nauka, 2006: 97–114. [In Russian].
7. <https://bigenc.ru/3250942.pdf> [In Russian].
8. Davydov L.K., Dmitrieva A.A., Konkina N.G. *Obshchaya gidrologiya*. General hydrology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973: 463 p. [In Russian].
9. Buzin I.V., Glazovsky A.F., Glazovsky A.F., Gudoshnikov Yu.P., Danilov A.I., Dmitriev N.E., Zubakin G.K., Kubysh-

- морья: Исследования последних лет. Ч. 1. Основные продуцирующие ледники, распространение и морфометрические особенности айсбергов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). С. 66–79.
10. Бычкова И.А., Смирнов В.Г. Использование спутниковой информации для обнаружения айсбергов и оценки айсберговой угрозы // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 537–551. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-537-551.
  11. Электронный ресурс: <http://www.glims.org/maps/glims>.
  12. Sanchez-Gamez P., Navarro F.J., Dowdeswell J.A., De Andres E. Surface velocities and calving flux of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 19–28. doi: 10.31857/S2076673420010020.
  13. Dowdeswell J., Bassford R., Gorman M., Williams M., Glazovsky A., Macheret Y., Shepherd A., Vasilenko Y., Savatyuguin L., Hubberten H., Miller H. Form and flow of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic // Journ. of Geophys. Research. 2002. № 107. С. 1–16. doi: 10.1029/2000jb000129.
  14. Glazovsky A., Lavrentiev I., Vasilenko E., Elagina N. RES ice thickness and frontal ablation of outlet glaciers in Russian Arctic // IASC Workshop on the dynamics and mass budget of Arctic glaciers & proglacial marine ecosystems. IASC Workshop, 22–24 January 2018. University Center Obergurgl, Obergurgl, Austria. 2018. P. 19–21.
  15. 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.
  16. 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.
  17. Glazovsky A., Bushueva I., Nosenko G. Slow surge of the Vavilov ice cap, Severnaya Zemlya. Proc. of the IASC Workshop on the dynamics and mass budget of Arctic glaciers. IASC Obergurgl, Austria. 23–25 Mars 2015. 2015. P. 17–18.
  18. Willis M.J., Zheng W., Durkin W.J., Pritchard M.E., Ramage J.M., Dowdeswell J.A., Benham T.J., Bassford R.P., Stearns L.A., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Porter C.C. Massive destabilization of an Arctic ice cap // Earth and Planetary Sciences Letters. 2018. V. 502. P. 146–155. doi: 10.1016/j.epsl.2018.08.049.
  19. Бушуева И.С., Глазовский А.Ф., Носенко Г.А. Развитие подвижки в западной части ледникового купола Вавилова на Северной Земле в 1963–2017 гг. // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 293–306. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-293-306>.
  20. Смирнов В.Г., Бычкова И.А. Спутниковый мониторинг ледяных образований при обеспечении безопасности работ на шельфе арктических морей // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 79–87.
  - kin 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 Problems. 2008, 78 (1): 66–79. [In Russian].
  10. Bychkova I.A., Smirnov V.G. Use of satellite information for iceberg detection and iceberg threat assessment. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (4): 537–551. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-537-551. [In Russian].
  11. <http://www.glims.org/maps/glims>.
  12. Sánchez-Gómez P., Navarro F.J., Dowdeswell J.A., De Andre's E. Surface velocities and calving flux of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 19–28. doi: 10.31857/S2076673420010020.
  13. Dowdeswell J., Bassford R., Gorman M., Williams M., Glazovsky A., Macheret Y., Shepherd A., Vasilenko Y., Savatyuguin L., Hubberten H., Miller H. Form and flow of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic. *Journ. of Geophys. Research*. 2002, 107: 1–16. doi: 10.1029/2000jb000129.
  14. Glazovsky A., Lavrentiev I., Vasilenko E., Elagina N. RES ice thickness and frontal ablation of outlet glaciers in Russian Arctic. IASC Workshop on the dynamics and mass budget of Arctic glaciers & proglacial marine ecosystems. IASC Workshop, 22–24 January 2018. University Center Obergurgl, Obergurgl, Austria. 2018: 19–21.
  15. 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.
  16. 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 Geophysical Research. Earth Surface*. 2015, 120 (10): 2040–2055. doi: 10.1002/2015JF003544.
  17. Glazovsky A., Bushueva I., Nosenko G. Slow surge of the Vavilov ice cap, Severnaya Zemlya. Proc. of the IASC Workshop on the dynamics and mass budget of Arctic glaciers. IASC Obergurgl, Austria, 23–25 Mars 2015. 2015: 17–18.
  18. Willis M.J., Zheng W., Durkin W.J., Pritchard M.E., Ramage J.M., Dowdeswell J.A., Benham T.J., Bassford R.P., Stearns L.A., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Porter C.C. Massive destabilization of an Arctic ice cap. *Earth and Planetary Sciences Letters*. 2018, 502: 146–155. doi: 10.1016/j.epsl.2018.08.049.
  19. Bushueva I.S., Glazovsky A.F., Nosenko G.A. Extension of surge in the western part of the Vavilov ice cap, Severnaya Zemlya, in 1963–2017. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (3): 293–306. [In Russian]. doi: [10.15356/2076-6734-2018-3-293-306](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-293-306).
  20. Smirnov V.G., Bychkova I.A. Satellite monitoring of ice features to ensure safety of offshore operations in the Arctic seas. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015, 51 (9): 935–942. doi: 10.1134/S0001433815090182.