

## Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген)

© 2018 г. Р.А. Чернов\*, А.Я. Муравьев

Институт географии РАН, Москва, Россия

\*rob31@mail.ru

## Contemporary changes in the area of glaciers in the western part of the Nordenskjold Land (Svalbard)

R.A. Chernov\*, A.Ya. Muraviev

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*rob31@mail.ru

Received February 26, 2018

Accepted June 8, 2018

**Keywords:** *Arctic, equilibrium line, mountain glaciers, Nordenskjold Land, retreating glaciers.*

### Summary

Climate warming in Svalbard, starting in the 1920s, caused a significant reduction in the mountain glaciation of the Nordenskjold Land. The most extensive changes took place in the Western part of this territory due to the influence of the warm Spitsbergen current creating here the high temperature background. In addition, due to elevation of the level of the climatic snow line, many glaciers have actually lost the area of accumulation. From 1936 to 2017, the area of glaciers in the Western part of this region decreased by 169.5 km<sup>2</sup> or 49.5%. Large valley glaciers and numerous small glaciers have lost the greatest area. The relative losses of the area of glaciers were revealed to be proportional to sizes of them. In average over the past 80 years, glaciers with areas smaller 0.5 km<sup>2</sup> reduced by 76%, while big glaciers with areas larger 5 km<sup>2</sup> – by only 34%. At present, there are 152 glaciers with a total area of 172.73±9.31 km<sup>2</sup> in the Western territory of the Land of Nordenskjold (West of the Bolterdalen valley). According to the aerial photography of 2008–2009, the total area of glaciation of the Land of Nordenskjold covers 428 km<sup>2</sup>. High present-day rates of the retreating of local glaciers are apparently caused by extreme thinning of glacial tongues. At the same time, shrinking of glaciers located in the West of the Peninsula turned out to be more intensive than that of glaciers in its center. Although the Eastern territories receive less precipitation than glaciers near the coast of the Greenland Sea, the Eastern glaciers were found to be more resistant to reduction due to higher locations of them.

**Citation:** Chernov R.A., Muraviev A.Ya. Contemporary changes in the area of glaciers in the western part of the Nordenskjold Land (Svalbard). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (4): 462–472. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-462-472.

Поступила 26 февраля 2018 г.

Принята к печати 8 июня 2018 г.

**Ключевые слова:** *Арктика, горные ледники, Земля Норденшельда, снеговая линия, сокращение ледников.*

Приведены данные об изменении площади оледенения западной части Земли Норденшельда с 1936 по 2017 г. Сокращение ледников в результате повышения летних температур воздуха зависело от их размеров, высотного положения и экспозиции и в целом составило 169,5 км<sup>2</sup>, или 49,5%. Больше всего сократились площади ледников на побережье Гренландского моря.

### Введение

Оледенение самого большого острова архипелага – Западный Шпицберген – имеет интересную особенность: в центре острова сформировалось относительно небольшое по площади горное оледенение, а основная масса ледников приурочена к его периферийной части. В первой половине XX в. эту особенность назвали «загадкой Шпицбергена» [1]. Причины такого распределения ледников – перехват горными хребтами потока влаги с юго-запада и юго-востока в сочетании с холодными климати-

ческими условиями на севере и востоке архипелага [2, 3]. Распределение тепла и осадков сформировало в центре острова область, где локализована зона устойчивого температурного максимума с относительно малым количеством осадков [2, 4, 5]. На этой территории отмечен положительный тренд годовой температуры воздуха со средним значением 0,8 °С за десятилетие, который стал очевидным для всего Шпицбергена [5, 6]. Влияние тёплого Шпицбергенского течения и связанный с ним приток тепла со стороны Гренландского моря происходят благодаря широким фьордам, обращён-

ным на юго-запад, а также протяжённым долинам, имеющим широтное направление. Мягкий климат обусловил распространение здесь горных ледников сравнительно небольших размеров.

С момента начала потепления на Шпицбергене в 1920-х годах оледенение претерпело заметные изменения, которые сильно различаются по масштабу в разных районах [1, 2]. Больше всего сократились горные ледники центральной части острова, лежащие на территориях Земли Норденшельда, Земли Диксона и Земли Принца Карла [6–8]. Особенно сильно сокращаются ледники Земли Диксона [9] в центре о. Западный Шпицберген. Но и на западе архипелага установлена сильнейшая деградация оледенения, особенно на территории Земли Норденшельда и Земли Принца Карла.

Известные оценки сокращения ледников этой территории имеют либо осреднённые значения по всей территории района [6, 8], либо относятся к отдельным ледникам [10]. В данной работе мы рассматриваем современные изменения площади горных ледников Земли Норденшельда в зависимости от их высотного положения, размеров и удалённости от побережья. В этом районе ведутся регулярные гляциологические исследования, однако обстоятельного обзора ледников Земли Норденшельда ранее сделано не было.

Настоящая работа выполнена в составе Шпицбергенской гляциологической экспедиции Института географии РАН, которая с 1965 г. работает на Шпицбергене. В последние годы исследования сосредоточены в основном окрестностях пос. Баренцбург на ледниках, лежащих в бассейне залива Грэнфьорд [10, 11]. С 2014 г. исследование в этом районе активизировались благодаря созданию в Баренцбурге Российского научного центра исследований на Шпицбергене. Именно поэтому основное внимание в настоящей работе уделено западной части Земли Норденшельда, для которой приведены изменения площади наиболее крупных ледников этой территории с 1936 г. по настоящее время, а также даны оценки современной площади оледенения западной и восточной территорий на основе материалов аэрофотосъёмки 2008–2009 гг. и космических снимков 2002–2004 и 2016–2017 гг. Здесь будут рассмотрены ледники, расположенные западнее долин Болтердален и Твердален, которые пролегают в меридиональном направлении по 16° в.д. В настоящее время на этой территории расположено более ста горных ледни-

ков, относительные изменения которых, как установлено, значительно различаются.

### Район исследований

Земля Норденшельда находится в центральной части Западного Шпицбергена и представляет собой горную территорию, ограниченную с запада Гренландским морем, а с севера и юга заливами Ис-фьорд и Ван-Майен-фьорд (рис. 1). От Гренландского моря на восток Земля Норденшельда протягивается на 100 км и граничит с Землёй Сэбина.

Рельеф Земли Норденшельда сочетает в себе горные хребты и обширные пространства тундры. Значительная часть территории (около 40%) занята морскими террасами и широкими троговыми долинами. Самые крупные долины – Рейндален, Грёндален, Колсдаллен и Адвентдален – протянулись преимущественно в широтном направлении. В северно-западной части Земли Норденшельда, где расположен пос. Баренцбург, горные вершины достигают высоты 700 м. Для южной и центральной частей района харак-

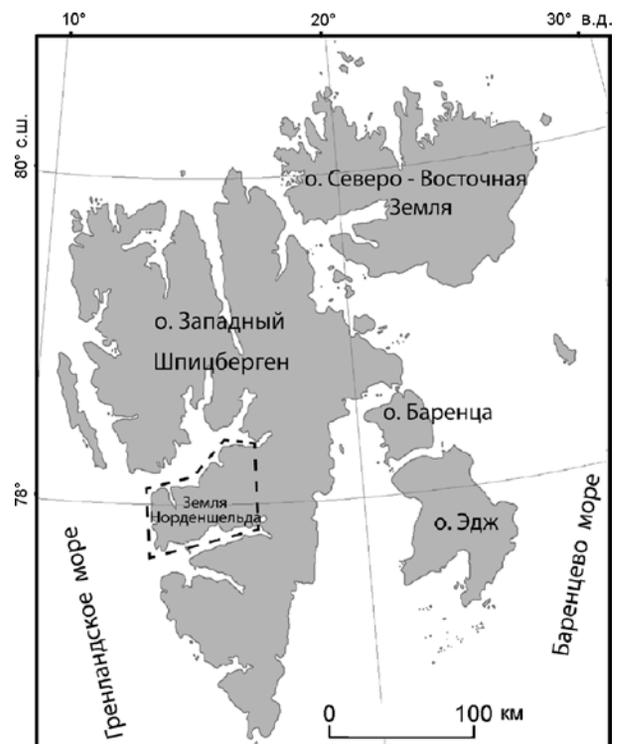
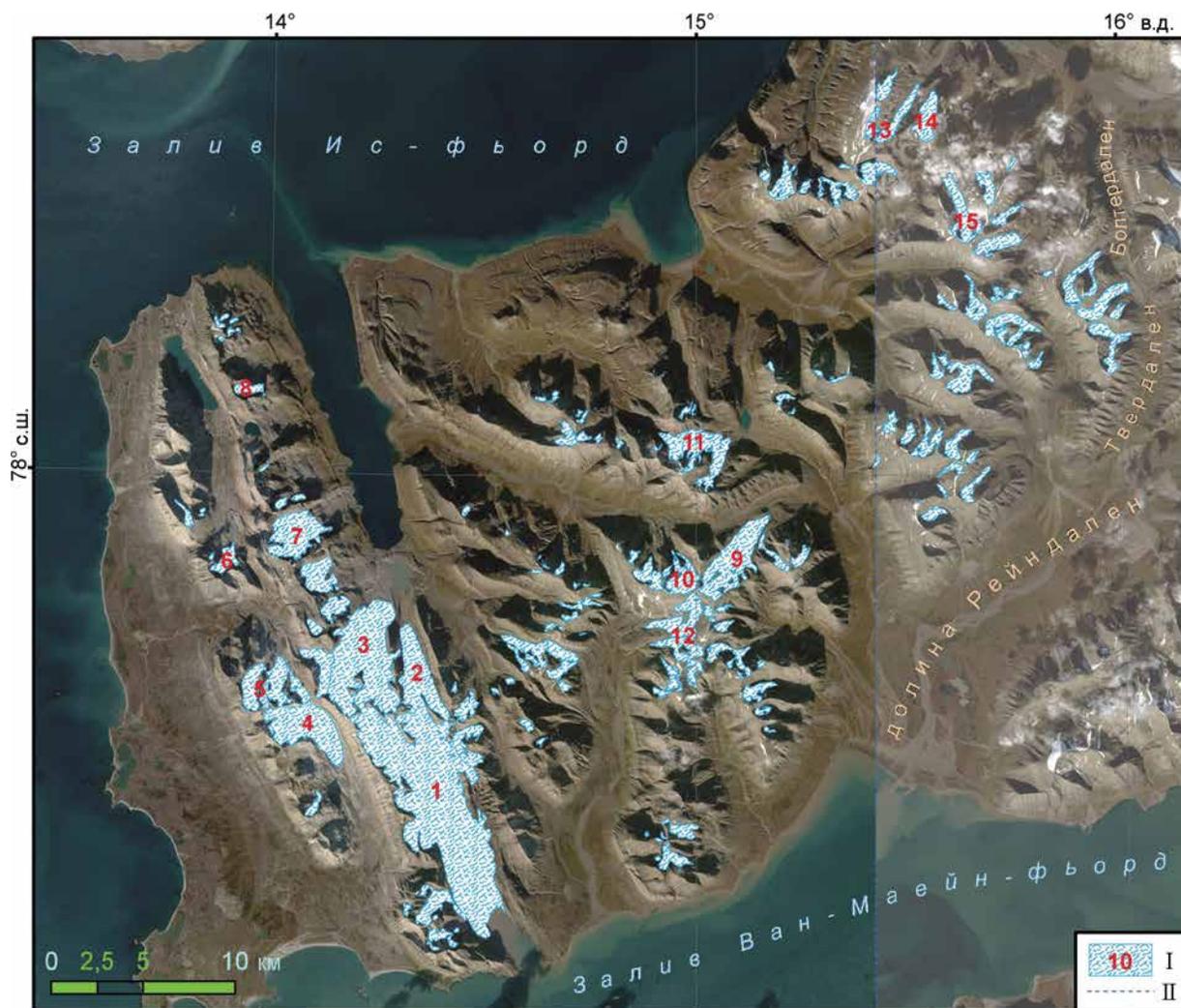


Рис. 1. Схема расположения Земли Норденшельда  
Fig. 1. Scheme of the Nordenskiöld Land location



**Рис. 2.** Схема современного оледенения западной части Земли Норденшельда.

В подложке спутниковые снимки Sentinel-2 от 13.09.2017 (западный) и 23.08.2016 (восточный). I – ледники; II – граница покрытия спутниковых снимков Sentinel-2 за разные даты. Ледники: 1 – Фритъоф; 2 – Восточный Грэнфьорд; 3 – Западный Грэнфьорд; 4 – Эрдманн; 5 – Дальфонна; 6 – Линне; 7 – Альдегонда; 8 – Вёринг; 9 – Тавле; 10 – Тунге; 11 – Пассфьель; 12 – Марштрандер; 13 – Лонгиер; 14 – Ларс; 15 – Богер

**Fig. 2.** Scheme of the modern glaciation in the west part of the Nordenskjöld Land.

On the background: the space imagery Sentinel-2 13.09.2017 (western) and 23.08.2016 (eastern). I – Glaciers; II – Sentinel-2 satellite imagery coverage boundary. The glaciers: 1 – Fridtjovbreen; 2 – Austre Grøn fjordbreen; 3 – Vestern Grøn fjordbreen; 4 – Erdmannbreen; 5 – Dahlfonna; 6 – Linnebreen; 7 – Aldegondabreen; 8 – Voringbreen; 9 – Tavlebreen; 10 – Tungebreen; 11 – Passfjellbreen; 12 – Marstranderbreen; 13 – Longyearbreen; 14 – Larsbreen; 15 – Bogerbreen

терен глубоко расчленённый рельеф: вершины гор находятся на высоте 900–1100 м, а днища долин редко поднимаются выше 200 м. Рельеф и климатические условия на Земле Норденшельда способствуют развитию горного оледенения. В самом выгодном положении по отношению к влагонесущим потокам воздуха оказались ледники, лежащие около побережья Гренландского и Баренцева морей. В центральной части Земли Норденшельда осадков выпадает заметно мень-

ше, поэтому размеры ледников невелики (рис. 2). На востоке территории, у границы с Землёй Сэбина, сложились наиболее благоприятные условия для оледенения, так как Баренцево море оказывает значительное охлаждающее влияние.

По данным метеостанции (ГМС) Баренцбург за период с 1965 по 2000 г. среднегодовое количество осадков на западе Земли Норденшельда составляло около 600 мм [12]. К центру района их количество уменьшилось до 400 мм [4]. Несмо-

тря на то, что во второй половине XX в. зимние осадки имели небольшой положительный тренд, который по данным ГМС Баренцбург составил около 0,8 мм в год, с середины 1990-х годов количество зимних осадков заметно уменьшилось и в настоящее время их величина на побережье составляет около 250 мм [13]. Распределение снегозапасов на территории Земли Норденшельда также показывает их равномерное уменьшение к центру. По данным снегомерных съёмки конца 1980-х годов, средняя величина снегозапасов на западе полуострова составляла 34 г/см<sup>2</sup>, а в центре полуострова – 20 г/см<sup>2</sup> [1, 14]. Полевые измерения снежного покрова в западной части Земли Норденшельда в 2004, 2008 и 2015 гг. подтверждают эту закономерность. Отметим, что величина снегозапасов возрастает с высотой в среднем на 12 г/см<sup>2</sup> каждые 100 м подъёма [15], однако в летний период снежный покров полностью стаивает на поверхности ледников до высоты 450–550 м на западе и до 600–750 м в центральных районах Земли Норденшельда. В 1980-х годах снеговая линия на западных ледниках проходила на уровне около 350 м [2, 3] и с тех пор поднялась на 100–200 м. Наблюдения на леднике Восточный Грэнфьорд показали, что снеговая линия ежегодно поднимается выше 450 м [15].

Климатические условия Земли Норденшельда заметно отличаются от условий в других районах о. Западный Шпицберген. Открытые на юго-запад Ис-фьорд и Ван-Майен-фьорд позволяют тёплым воздушным массам беспрепятственно продвигаться в глубь архипелага через их акватории и охватывать с двух сторон п-ов Земля Норденшельда. На берегах Ис-фьорда отмечены самые высокие среднегодовые температуры воздуха и, что более важно для таяния ледников, летние температуры выше на 1,0–1,5 °С по сравнению с прилегающими территориями архипелага [4]. Максимум летних температур воздуха смещён от западного побережья в центр полуострова, где расположен пос. Лонгйир [16].

### Данные и методы

В настоящей работе использованы: а) спутниковые снимки Sentinel-2 уровня обработки L1C (13.09.2017 и 23.08.2016) с пространственным разрешением 10 м; б) база данных Randolph

Glacier Inventory 6.0 (далее RGI 6.0) [17]; в) база данных CryoClim GAO [18]; г) цифровая модель рельефа (далее ЦМР) ArcticDEM [19].

Границы ледников на спутниковых снимках Sentinel-2 дешифрировались вручную. Точность пространственной привязки спутниковых снимков, по данным Европейского космического агентства, находится в пределах 11 м с достоверностью 95,5% [20]. На основе полученных результатов созданы цифровые карты границ ледников в векторном формате в картографической проекции UTM Zone 33N WGS 1984. Вклад погрешности, обусловленной разрешающей способностью и точностью пространственной привязки космических снимков Sentinel-2, оценивался путём построения буферной зоны вдоль границ ледников. Ширина буферной зоны равнялась удвоенной величине точности пространственной привязки данных снимков.

При проведении ледоразделов и оценке высот высших и низших точек ледников использовались результаты обработки ArcticDEM Mosaik с пространственным разрешением 5 м – растровые изображения экспозиции и уклонов поверхностей. В разделе описания данных на сайте разработчика [21] указано, что абсолютные горизонтальные и вертикальные характеристики точности данных ArcticDEM не были проверены. Покрытие мозаики данной ЦМР на западную часть Земли Норденшельда сформировано из стереопар фрагментов спутниковых снимков WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3 2012–2015 гг., точность пространственной привязки которых без использования наземных контрольных точек находится в пределах 4, 3,5 и 3,5 м соответственно. Это позволяет сделать вывод, что точность ArcticDEM должна существенно превосходить точность ASTER GDEM2 (в пределах 17 м по высоте с уровнем доверия 95% [22]) и SRTM4 (в пределах 10 м по высоте с уровнем доверия 90% [23]).

Данные о ледниках в RGI 6.0 на западную часть Земли Норденшельда датированы 2002–2004 гг. Границы ледников определены по результатам обработки спутниковых снимков ASTER и Landsat. Погрешность оценки площади ледников в RGI 6.0 оценивается в 5% [17]. По данным каталога RGI 6.0 (по состоянию на 2002–2004 гг.), в западной части Земли Норденшельда находилось 117 ледников общей площадью 231,1 км<sup>2</sup>. Из базы данных CryoClim GAO на район иссле-

Таблица 1. Изменение площади ледников западной части Земли Норденшельда с 1936 по 2017 г.

Площадь ледников, км <sup>2</sup>	Площадь ледников, км <sup>2</sup>				Изменение площади ледников, км <sup>2</sup> /%		
	2016–2017 гг.	2002–2004 гг.	1990 г.	1936 г.	с 2002–2004 по 2016–2017 гг.	с 1990 по 2016–2017 гг.	с 1936 по 2016–2017 гг.
Более 5	96,08±2,72	114,5	115,26	144,77	-18,42/-16,1	-19,18/-16,6	-48,69/-33,6
2–5	29,77±1,93	39,33	44,04	53,34	-9,56/-24,3	-14,27/-32,4	-23,57/-44,2
1–2	22,36±1,74	31,24	35,91	56,29	-8,88/-28,4	-13,55/-37,7	-33,93/-60,3
0,5–1	12,13±1,19	20,07	22,4	36,43	-7,94/-39,5	-10,27/-45,8	-24,3/-66,7
Менее 0,5	12,39±1,75	25,29	30,22	51,38	-12,9/-51	-17,83/-59	-38,99/-75,9
Всего	172,73±9,31	230,43	247,83	342,21	-57,7/-25	-75,1/-30,3	-169,48/-49,5

дований были использованы данные о ледниках по состоянию на 1936 и 1990 гг., полученные в результате обработки данных аэрофотосъёмки.

### Результаты исследований

В процессе дешифрирования современных спутниковых снимков мы идентифицировали 152 ледника общей площадью 172,73±9,31 км<sup>2</sup>. Из них: 85 ледников соответствуют ледникам, зарегистрированным в RGI 6.0 и сохранившим целостность; 53 ледника представляют собой сегменты 22 распавшихся ледников, зарегистрированных в RGI 6.0; 14 обнаруженных ледников общей площадью 1,32±0,23 км<sup>2</sup> не зарегистрированы в RGI 6.0.

Общее изменение площади ледников западной части Земли Норденшельда и изменения в группах различной площади даны в табл. 1. С 1936 по 2017 г. площадь ледников района исследований сократилась на 169,48 км<sup>2</sup> (49,5%). Максимальные темпы сокращения отмечаются в современный период: с 2002–2004 по 2016–2017 гг. площадь оледенения района сократилась на 57,7 км<sup>2</sup>, или 25% (см. табл. 1). В этот период наибольшие потери зафиксированы для крупных ледников площадью более 5 км<sup>2</sup> (-18,4 км<sup>2</sup>) и небольших ледников площадью менее 0,5 км<sup>2</sup> (-12,9 км<sup>2</sup>). При этом относительные потери небольших ледников оказались наиболее высокими – за последние 15 лет они потеряли около 51% площади. В период 1936–1990 гг. наибольшие потери площадей были характерны для малых (площадью менее 0,5 км<sup>2</sup>) и крупных долинных ледников. В последующий период с 1990 по 2002–2004 гг. эта тенденция сохранилась, но возросли потери площадей и у ледников средних размеров (площадью от 1 до 5 км<sup>2</sup>).

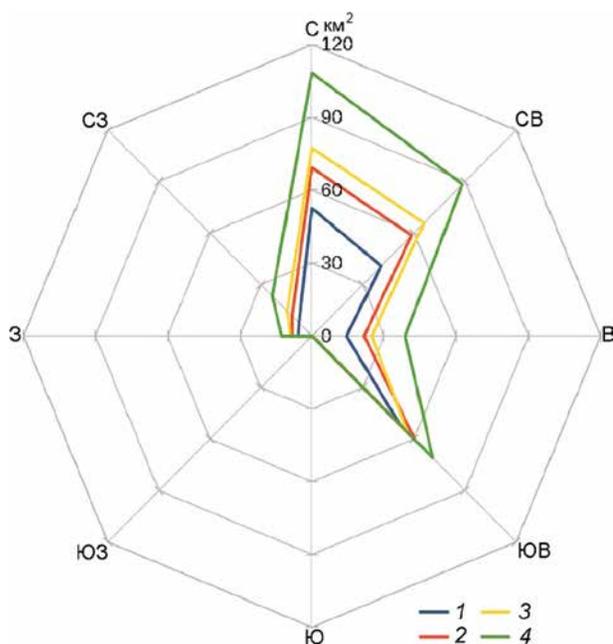


Рис. 3. Сокращение ледников Земли Норденшельда в зависимости от экспозиции.

Площадь ледников, км<sup>2</sup>: 1 – на 2016–2017 гг.; 2 – из RGI 6.0, 2002–2004 гг.; 3 – из CryoClim GAO, 1990 г.; 4 – из CryoClim GAO, 1936 г.

Fig. 3. Reduction of glaciers of the Nordenskjold Land according to the exposure.

Area of glaciers, km<sup>2</sup>: 1 – 2016–2017; 2 – RGI 6.0, 2002–2004; 3 – CryoClim GAO, 1990; 4 – CryoClim GAO, 1936

Большинство ледников в этом диапазоне площади расположено на относительно малых высотах. В целом, во всех трёх рассматриваемых периодах наблюдается общая тенденция изменения площадей – чем меньше размеры ледника, тем больше относительные потери его площади.

Исследование влияния экспозиции ледников на изменения их площади позволило установить общие черты сокращения площадей ледников (рис. 3). Большинство ледников этого района

Таблица 2. Изменение площади крупных ледников западной части Земли Норденшельда с 1936 по 2017 г.

№	Название ледника, русское (норвежское)	Экспозиция	Высота, м		Площадь ледника, км <sup>2</sup>			Изменение площади ледника, км <sup>2</sup> /%		
			низшей точки ледника	высшей точки ледника	2002–2004 гг.	1990 г.	1936 г.	с 2002–2004 по 2016–2017 гг.	с 1990 по 2016–2017 гг.	с 1936 по 2016–2017 гг.
1	Фритъоф (Fridtjofbreen)	ЮВ	0	723	50,408	46,39	55,89	–7,2/–14,3	–3,18/–6,9	–12,68/–22,7
2	Восточный Грэнфьорд (Austre Grønfjordbreen)	С	43	549	8,42	8,88	11,69	–1,91/–22,7	–2,37/–26,7	–5,18/–44,3
3	Западный Грэнфьорд (Vestre Grønfjordbreen)	СВ	68	721	18,1	19	24,21	–1,9/–10,5	–2,8/–14,7	–8,01/–33,1
4	Эрдманн (Erdmannbreen)	ЮВ	137	764	8,972	9,75	12,71	–1,13/–12,6	–1,91/–19,6	–4,87/–38,3
5	Дальфонна (Dahlfonna)	С	138	808	6,922	7,7	9,94	–1,6/–23,1	–2,38/–30,9	–4,62/–46,5
6	Линне (Linnebreen)	СВ	212	544	1,883	2,36	4,66	–0,85/–45,3	–1,33/–56,4	–3,63/–77,9
7	Альдегонда (Aldegondabreen)	СВ	141	562	6,737	7,67	10,6	–1,49/–22,1	–2,42/–31,6	–5,35/–50,5
8	Вёринг (Vøringbreen)	СВ	213	432	1,137	1,36	2,82	–0,43/–37,6	–0,65/–47,8	–2,11/–74,8
9	Тавле (Tavlebreen)	СВ	239	805	8,021	8,62	10,37	–1,31/–16,3	–1,91/–22,2	–3,66/–35,3
10	Тунге (Tungebreen)	С	242	865	2,884	2,96	4,51	–0,5/–17,5	–0,58/–19,6	–2,13/–47,2
11	Пассфьель (Passfjellbreen)	СВ, СЗ	308	952	7,462	7,66	9,48	–2,16/–29	–2,36/–30,8	–4,18/–44,1
12	Марштрандер (Marstrandbreen)	З	269	722	6,924	7,25	9,36	–1,88/–27,2	–2,21/–30,5	–4,32/–46,2
13	Лонгьер (Longyearbreen)	СВ	292	1072	2,95	3,13	3,97	–0,71/–24,1	–0,89/–28,4	–1,73/–43,6
14	Ларс (Larsbreen)	С	436	887	2,41	3	3,13	–0,38/–15,8	–0,97/–32,3	–2,1/–50,8
15	Богер (Bogerbreen)	С	378	1011	3,463	3,73	4,77	–0,75/–21,7	–1,02/–27,3	–2,06/–43,2

имеют северную и северо-восточную экспозицию, т.е. лежат на подветренных склонах относительно притока влаги, поэтому максимальные сокращения отмечены именно в северо-восточных румбах. Согласованные изменения, но меньшего масштаба, произошли на ледниках с преобладанием восточной экспозиции (см. рис. 3). Исключение составляет ледник Фритъоф, имеющий юго-восточную экспозицию. Его сокращение обусловлено не только таянием, но и процессами восстановления после пульсации, произошедшей в конце 1990-х годов [24].

В табл. 2 представлены данные об изменении площадей 15 ледников, расположенных в западной части Земли Норденшельда, на которых в разные годы проводил гляциологические наблюдения Институт географии РАН. Все ледники данной выборки претерпели значительное сокращение площади за период исследований. Наибольшее сокращение размеров отмечено для ледников, лежащих близко к побережью и расположенных на относительно небольших высотах. Так, с 1936 по 2017 г. максимальные изменения произошли на ледниках Альдегонда, Вёринг и Линне, которые потеряли более 50% площади

(см. табл. 2). Ледники Восточный Грэнфьорд, Дальфонна и Эрдманн за то же время потеряли в среднем около 43% площади. В период с 1990 по 2016–2017 гг. наибольшие темпы сокращения демонстрируют относительно небольшие ледники площадью менее 1 км<sup>2</sup>.

Значительные потери площади *долинных ледников* связаны с отступанием и отчленением их языков. Иллюстрация этого процесса – изменение фронтов ледников Альдегонда и Восточный Грэнфьорд, которые за последние 80 лет отступили более чем на 2 км. В XX в. ледник Альдегонда отступал со скоростью в среднем 20 м в год, а за последние 15 лет темпы его отступления увеличились до 35 м в год (рис. 4). Для долинного ледника Восточный Грэнфьорд характерны ещё более интенсивные изменения (рис. 5). С 2003 г. отступление его фронта составило в среднем 50 м в год. Однако его язык сокращался неравномерно: например, в 2017 г. значительная его часть отчленилась от ледника в результате вытаивания ригеля на ложе. Таким образом, за один год длина ледника сократилась на 330 м. Безусловно, эти события связаны с предельным истончением пологого ледникового языка, что обу-

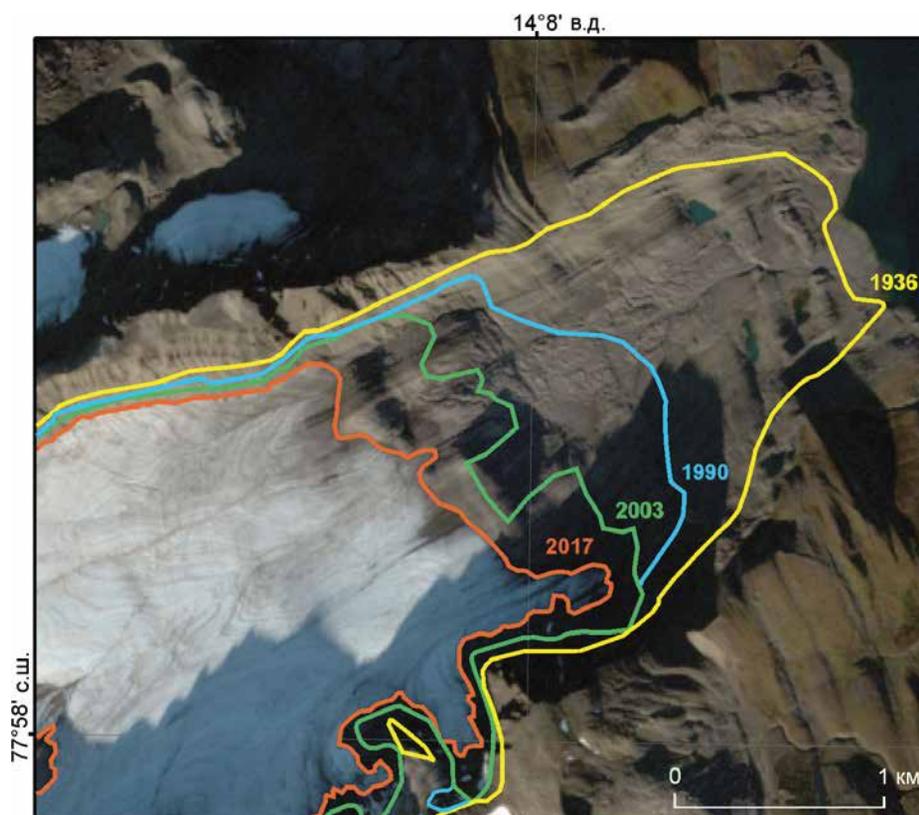


Рис. 4. Изменение границ ледника Альдегонда с 1936 по 2017 г.

Fig. 4. Change of the boundaries of the Aldegondabreen Glacier from 1936 to 2017

словлено интенсивным таянием льда (рис. 6). По данным полевых измерений, в нижней части ледника Восточный Грэнфьорд на высоте около 50 м ежегодные потери льда на таяние составляют от 3,5 до 4 м. Подобные процессы наблюдаются и на других ледниках западной части Земли Норденшельда, пологие языки которых расположены низко. В меньшей степени сокращались ледники в центральной части Земли Норденшельда, где ледники расположены гипсометрически выше. Площади ледников Тавле, Тунге и Ларс сократились с начала XXI в. в пределах 20%, а ледники, лежащие севернее, ближе к побережью Ис-фьорда, — Лонгиер, Богер, Пассфельд сократились почти на 30% (см. табл. 2).

В целом в группе рассматриваемых ледников (за исключением пульсирующего ледника Фритьоф) сокращения площади с 1936 по 2016–2017 гг. изменялись с 35 до 78% и в среднем составили 48,3%, что совпадает со средним изменением площади всех ледников западной части Земли Норденшельда за тот же период. Ледник Восточный Грэнфьод, на котором Инсти-

тут географии РАН проводит ежегодные масс-балансовые измерения, сократился на 44,3%.

### Обсуждение

Результаты исследования показали, что сокращение горных ледников обратно пропорционально их размерам (см. табл. 1). Эта тенденция характерна для всего периода исследований, но наиболее чётко выражена в период с 2002 по 2017 гг. Наименьшие изменения площади характерны для крупнейших ледников Земли Норденшельда: Фритьоф, Западный Грэнфьорд и Тавле (см. табл. 2).

*Высотное положение ледника* также относится к важному фактору, так как оно непосредственно связано с абляцией. К числу наиболее сократившихся ледников относятся ледники, *верхняя граница* которых расположена низко (см. табл. 2). Напротив, площадь ледников небольших размеров с максимальным верхним уровнем — Богер, Лонгиер, Тунге — изменилась незначительно.

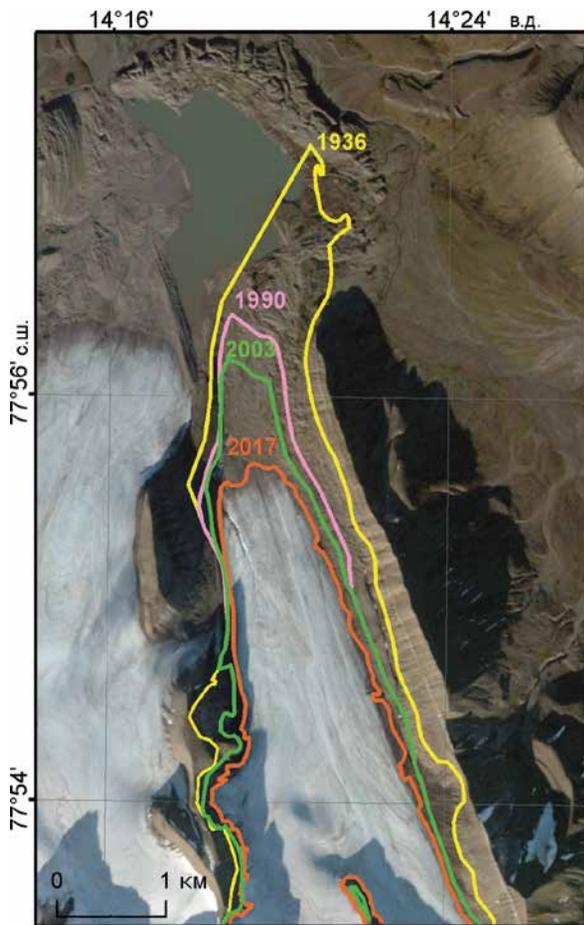


Рис. 5. Изменение границ ледника Восточный Грёнфьорд с 1936 по 2017 г.

Fig. 5. Change of the boundaries of the Eustre Grønfjordbreen Glacier from 1936 to 2017

Уровень *нижней границы* ледника оказался менее значимым параметром, так как ледники, спускающиеся низко, одновременно относятся к крупнейшим ледникам исследуемого района.

Безусловно, *летние температуры*, с которыми связана величина абляции, остаются главным фактором, влияющим на сокращение оледенения, что в итоге определяет темпы сокращения ледников. На больших высотах наблюдается увеличение количества твёрдых осадков [5], что несколько компенсирует летнее таяние ледников, расположенных на высоких гипсометрических уровнях. При этом на востоке Земли Норденшельда ледники оказались в более благоприятном положении, чем на западе.

Восточная часть Земли Норденшельда — район с развитым горным оледенением, где по состоянию на 2008 г. насчитывалось 93 ледни-

ка общей площадью 258,4 км<sup>2</sup> по данным, полученным на основании электронных карт [25]. Горные хребты в этом районе достигают высот 1000–1100 м, что способствует накоплению снега на ледниках, поверхность которых расположена выше 700–750 м. Большинство из них имеют обширные области аккумуляции. Оледенение восточного района представлено тремя группами в горных узлах, разделённых долинами Адвентдален и Рейндален. К северу от Адвентдален находится 25 ледников, которые занимают площадь 37,1 км<sup>2</sup>. Между долинами Адвентдален и Рейндален расположены 26 ледников общей площадью 96,1 км<sup>2</sup>. Южнее Рейндалена выделен наиболее крупный ледниковый район Земли Норденшельда, в котором присутствуют 42 ледника общей площадью 125,2 км<sup>2</sup>. Таким образом, площадь оледенения восточного района в полтора раза превышает площадь оледенения на западе.

Различия оледенения между западными и восточными территориями Земли Норденшельда проявляются также при сопоставлении уровня границы питания на ледниках и в области аккумуляции [2, 25]. На востоке уровень границы питания ледников на 100–200 м выше, чем на западе, и их высотное положение позволило сохранить ледникам области аккумуляции, тогда как западные ледники практически полностью лишены области аккумуляции, что обусловило большие потери льда. Значения годового баланса массы ледников Вёринг, Богер, Лонгиер и Западный Грёнфьорд, полученные в 1970–1980 гг., были равны соответственно –64, –53, –55, –67 г/см<sup>2</sup> [2]. Согласно полевым наблюдениям, средний годовой баланс массы ледника Восточный Грёнфьорд, измеренный в 2013–2017 гг., составил –168 г/см<sup>2</sup>. На основании сравнения таяния и снегонакопления балансовые значения ледника Восточный Грёнфьорд наиболее соответствуют ледникам Вёринг и Западный Грёнфьорд. Таким образом, ледник Восточный Грёнфьорд показывает значительное уменьшение баланса массы как следствие повышения летних температур. В настоящее время большинство крупных ледников на западе Земли Норденшельда оказались климатически «мёртвыми» ледниками, так как их поверхность расположена полностью в области абляции. Поэтому и изменения их площади наиболее масштабны.



**Рис. 6.** Фронт ледника Восточный Грэнфьорд (1) и отделившееся часть ледника (2). Фото Р.А. Чернова, август 2017 г.

**Fig. 6.** Front of the Eustre Grønfyordbreen Glacier (1), detached part of the glacier (2). Photo by R.A. Chernov, August 2017

### Заклучение

Анализ реакции горного оледенения Земли Норденшельда на изменения климатических условий на протяжении XX и в начале XXI вв. позволил установить существенное сокращение площади ледников. Наибольшие изменения касаются горных ледников площадью менее 0,5 км<sup>2</sup>. С 1936 по 2016–2017 гг. они потеряли 76% площади, а крупные горно-долинные ледники — до 33% площади. Относительные изменения площади ледников оказались обратно пропорциональны их размерам на протяжении всего рассматриваемого периода. Общие потери площади ледников западной части Земли Норденшельда составили 169,5 км<sup>2</sup>, или 49,5%.

В абсолютных значениях основные потери за последнее десятилетие связаны с сокращением больших долинных ледников, тогда как в прошлые годы преобладали потери на малых ледниках. Это связано, по-видимому, с предельным истончени-

ем их ледниковых языков, расположенных на низких гипсометрических уровнях. Ежегодные потери площади ледников западной части Земли Норденшельда составляют около 4 км<sup>2</sup>, или 2% общей площади оледенения исследуемого района. В настоящее время наибольшие потери несут крупные ледники, лежащие на западных рубежах Земли Норденшельда: Фритьоф, Восточный Грэнфьорд, Западный Грэнфьорд и Дальфонна.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке госзадания № 01201352474 (0148-2014-0006) «Оценки современного состояния и текущих изменений внутреннего гидро-термического режима ледников, с выделением данных по эталонным ледникам».

**Acknowledgments.** The work was carried out with the support of the state project № 01201352474 (0148-2014-0006) «Assessments of the current state and current changes in the internal hydro-thermal regime of glaciers, with data on reference glaciers».

### Литература

1. Корякин В.С. Ледники Арктики. М.: Наука, 1988. 158 с.
2. Троицкий Л.С., Зингер Е.М., Корякин В.С., Маркин В.А., Михалёв В.И. Оледенение Шпицбергена (Свальбарда). М.: Наука, 1975. 275 с.

### References

1. Koryakin V.S. *Ledniki Arktiki*. Glaciers of the Arctic. Moscow: Nauka, 1988: 158 p. [In Russian].
2. Troitsky L.S., Zinger E.M., Koryakin V.S., Markin V.A., Mikhalev V.I. *Oledenie Shpitsbergena*. The glacia-

3. Кренке А.Н., Корякин В.С., Тареева А.М. Аккумуляция снега на высоте границы питания ледников Шпицбергена // МГИ. 1986. Вып. 56. С. 90–93.
4. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Ред. В.М. Котляков. М.: изд. Российской академии наук, 1997. 392 с.
5. Van Pelt W.J.J., Kohler J., Liston G.E., Hagen J., Luks O.B., Reijmer C.H., Pohjola V.A. Multidecadal climate and seasonal snowconditions in Svalbard // Journ. of Geophys. Research. Earth Surface. 2016. V. 121. P. 2100–2117. doi: 10.1002/2016JF003999.
6. Kohler J., James T.D., Murray T., Nuth C., Brandt O., Barrand N.E., Aas H.F., Luckman A. Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers // Geophys. Research Letters. 2007. V. 34 (18). L18502. doi: 10.1029/2007GL030681.
7. Nuth C., Kohler J., König M., von Deschwanden A., Hagen J.O., Käb A., Moholdt G., Pettersson R. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard // The Cryosphere. 2013. V. 7. P. 1603–1621.
8. Hagen J.O., Kohler J., Melvold K., Winther J.G. Glaciers in Svalbard: Mass balance, runoff and freshwater flux // Polar Research. 2003. V. 22. № 2. P. 145–159. doi: 10.1111/j.1751-8369.2003.tb00104.x.
9. Malecki J. Accelerating retreat and high-elevation thinning of glaciers in central Spitsbergen // The Cryosphere. 2016. № 10. P. 1317–1329. doi: 10.5194/tc-10-1317-2016.
10. Мавлюдов Б.Р., Саватюгин Л.М., Соловьянова И.Ю. Реакция ледников Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) на изменение климата // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. Вып. 1 (91). С. 67–77.
11. Чернов Р.А., Васильева Т.В., Кудиков А.В. Температурный режим поверхностного слоя ледника Восточный Грэнфьорд (Западный Шпицберген) // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 3. С. 38–46. doi: 10.15356/2076-6734-2015-3-38-46.
12. Электронный ресурс: <https://rp5.ru/> Погода\_в\_Баренцбурге.
13. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Чернов Р.А. Оценка абляции на ледниках архипелага Шпицберген в начале XXI века // Лёд и Снег. 2010. № 3 (111). С. 13–18.
14. Троицкий Л.С., Гуськов А.Г., Осокин Н.И., Ходаков В.Г. Исследование снежного покрова Шпицбергена весной 1979 года // МГИ. 1980. Вып. 39. С. 185–192.
15. Вишивцева Т.В., Чернов Р.А. Особенности пространственного распределения снежного покрова и поля температур в верхнем слое политермического ледника // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 373–380. doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3.
16. Электронный ресурс: <https://www.yr.no/place/Norway/Svalbard/Longyearbyen/statistics>.
- tion of Spitsbergen (Svalbard). Moscow: Nauka, 1975: 275 p. [In Russian].
3. Krenke A.N., Koryakin V.S., Tareeva A.M. Accumulation of snow at the equilibrium line of glaciers in Spitsbergen. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1986, 56: 90–93. [In Russian].
4. *Atlas snezhno-ledovykh resursov mira*. World Atlas of Snow and Ice Resources. Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p. [In Russian].
5. Van Pelt W.J.J., Kohler J., Liston G.E., Hagen J., Luks O.B., Reijmer C.H., Pohjola V.A. Multidecadal climate and seasonal snowconditions in Svalbard. Journ. of Geophys. Research. Earth Surface. 2016, 121: 2100–2117. doi: 10.1002/2016JF003999.
6. Kohler J., James T.D., Murray T., Nuth C., Brandt O., Barrand N.E., Aas H.F., Luckman A. Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers. Geophys. Research Letters. 2007, 34 (18): L18502. doi: 10.1029/2007GL030681.
7. Nuth C., Kohler J., König M., A. von Deschwanden, Hagen J.O., Käb A., Moholdt G., Pettersson R. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard. The Cryosphere. 2013, 7: 1603–1621.
8. Hagen J.O., Kohler J., Melvold K., Winther J.G. Glaciers in Svalbard: Mass balance, runoff and freshwater flux. Polar Research. 2003, 22 (2): 145–159. doi: 10.1111/j.1751-8369.2003.tb00104.x.
9. Malecki J. Accelerating retreat and high-elevation thinning of glaciers in central Spitsbergen. The Cryosphere. 2016, 10: 1317–1329. doi: 10.5194/tc-10-1317-2016.
10. Mavlyudov B.R., Savatyugin L.M., Solovyanova I.Yu. The reaction of the glaciers of the Nordenskiöld Land (Spitsbergen) to climate change. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2012, 1 (91): 67–77. [In Russian].
11. Chernov R.A., Vasilyeva T.V., Kudikov A.V. Temperature regime of upper layer of the glacier East Gronfjorden (West Svalbard). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (3): 38–46. [In Russian].
12. [https://rp5.ru](https://rp5.ru/).
13. Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Nakalov P.R., Chernov R.A. Estimation of ablation on glaciers on Spitsbergen archipelago in the beginning of XXI century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2010, 3 (111): 13–18. [In Russian].
14. Troitsky L.S., Gus'kov A.G., Osokin N.I., Khodakov V.G. Study of snow cover of Spitsbergen in the spring of 1979. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1980, 39: 185–192. [In Russian].
15. Vshivtseva T.V., Chernov R.A. Spatial distribution of snow cover and temperature in the upper layer of a polythermal glacier. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 373–380. [In Russian]. doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3.
16. <https://www.yr.no/place/Norway/Svalbard/Longyearbyen/statistics>.

17. RGI Consortium (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. doi: <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>.
18. König M., Kohler J., Nuth C. Glacier Area Outlines – Svalbard, v1.0, 2013. <http://data.npolar.no/dataset/89f430f8-862f-11e2-8036-005056ad0004> Delivered by CryoClim service.
19. ArcticDEM. DEM(s) were created from DigitalGlobe, Inc., imagery and funded under National Science Foundation awards 1043681, 1559691, and 1542736. <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem>.
20. SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR. Is. 24. 36 p. <http://earth.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-Data-Quality-Report>.
21. Электронный ресурс: <https://www.pgc.umn.edu/guides/arcticdem/data-description>.
22. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. 2005. 143 p.
23. Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A., Gesch D., Oimoen M., Zhang Z., Danielson J., Krieger T., Curtis B., Haase J., Abrams M., Robert Crippen R., Carabajal C. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. 2011: 27 p.
24. Зингер Е.М., Захаров В.Г., Жидков В.А. Наблюдения за подвижкой ледника Фричьоф на Шпицбергене в 1997 г. // МГИ. 1997. Вып. 83. С. 231–233.
25. Электронный ресурс: <http://toposvalbard.npolar.no>.
17. RGI Consortium (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. doi: <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>.
18. König M., Kohler J., Nuth C. Glacier Area Outlines – Svalbard, v1.0, 2013. <http://data.npolar.no/dataset/89f430f8-862f-11e2-8036-005056ad0004> Delivered by CryoClim service.
19. ArcticDEM. DEM(s) were created from DigitalGlobe, Inc., imagery and funded under National Science Foundation awards 1043681, 1559691, and 1542736. <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>
20. SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR. Issue 24. 36 p. <http://earth.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-Data-Quality-Report>.
21. <https://www.pgc.umn.edu/guides/arcticdem/data-description>.
22. Rodriguez, E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. 2005: 143 p.
23. Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A., Gesch D., Oimoen M., Zhang Z., Danielson J., Krieger T., Curtis B., Haase J., Abrams M., Robert Crippen R., Carabajal C. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. 2011: 27 p.
24. Zinger E.M., Zakharov V.G., Zhidkov V.A. Observations of the surge of the Fridtjofbreen glacier on Spitsbergen in 1997. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies 1997, 83: 231–233. [In Russian].
25. <http://toposvalbard.npolar.no>.