

## СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.324.63

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-5(73-81)

СОВРЕМЕННОЕ СОКРАЩЕНИЕ ГОРНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ  
ЗЕМЛИ ПРИНЦА КАРЛА (АРХИПЕЛАГ ШПИЦБЕРГЕН)Р.А. Чернов<sup>1</sup>, А.Я. Муравьев<sup>1</sup>, А.Н. Тополева<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия; rob31@mail.ru<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

Результаты полевых исследований, проведенных в центральной части Земли Принца Карла в 2016 г., выявили признаки разномасштабного сокращения горных ледников. Сравнение исторических данных и космических снимков показывает, что за последние 80 лет площадь ледников острова уменьшилась почти вдвое. На протяжении XX в. темпы сокращения ледников возрастали и достигли максимума в конце столетия. Сильнее сократились небольшие горные ледники, расположенные ниже 500 м, поскольку оказались лишены области питания в связи с подъемом климатической снеговой линии. Крупные ледники, расположенные в северной, наиболее возвышенной части острова, отступили в меньшей степени, так как сохранили области питания. С 1936 по 2017 г. площадь ледников Земли Принца Карла сократилась приблизительно на 58 км<sup>2</sup> и в 2017 г. составила (56.01 ± 3) км<sup>2</sup>. В 2008–2017 гг. темпы сокращения площади ледников района составляли 1.23 км<sup>2</sup> в год (или 2 % всей площади оледенения). За последнее столетие для ледников Земли Принца Карла характерны наибольшие темпы сокращения в сравнении с другими районами Шпицбергена.

*Площадь ледников, горные ледники, сокращение, Земля Принца Карла, Шпицберген, отступление ледников*

DEGRADATION OF THE MOUNTAIN GLACIATION  
OF PRINS KARLS FORLAND (SVALBARD)R.A. Chernov<sup>1</sup>, A.Ya. Muraviev<sup>1</sup>, A.N. Topoleva<sup>2</sup><sup>1</sup>Institute of Geography, RAS, 29, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia; rob31@mail.ru<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

The results of field research carried out on the glaciers of Prins Karls Forland in 2016 have revealed the signs of significant degradation. Comparison of topographic maps of the last century and of satellite images indicates that over the past 80 years the area of the glaciers of the island has decreased threefold. In the first half of the twentieth century, the rate of glacial reductions had increased to reach its peak at the end of the century. The smallest mountain glaciers located below 500 meters a.s.l. had decreased most of all, as they had been deprived of the feeding area due to the rise of the snow line. Large glaciers, located in the northern and most elevated part of the island, retreated to a lesser extent, as they had preserved areas of alimentation. Since 1936, the area of the glaciers of the Prins Karls Forland has decreased by approximately 58 km<sup>2</sup>, in 2017 their area had been (56.01 ± 3) km<sup>2</sup>. Reduction of the area of glaciers in 2008–2017 had been on average 1.23 km<sup>2</sup> per year, or 2 % of the total glaciation area of the island. Over the last century, the glaciers of Prins Karls Forland have revealed the maximum rate of decline in comparison with the other areas of Svalbard.

*Area of glaciers, degradation, mountain glaciers, Prins Karls Forland, Svalbard, retreat of glaciers*

## ВВЕДЕНИЕ

Земля Принца Карла (ЗПК) – вытянутый в меридиональном направлении остров, расположенный на западе архипелага Шпицберген, отделенный от острова Западный Шпицберген проливом Форландсундет (рис. 1). Остров имеет относительно небольшое по площади горное оледенение, получившее свое развитие на горных хребтах в его центральной части. В сравнении с общей площадью оледенения Шпицбергена, рав-

ной 33 922 км<sup>2</sup> [Pfeffer et al., 2014], ледники ЗПК занимают лишь 0.15 %. Первые детальные сведения о ледниках этого района были получены Шотландской геологической экспедицией в 1906 г., по их оценкам площадь ледников занимала территорию около 150 км<sup>2</sup> [Tirrell, 1922]. К концу XX в. оледенение острова значительно сократилось – его площадь в середине 1990-х гг. составила ~80 км<sup>2</sup> [Атлас..., 1997].

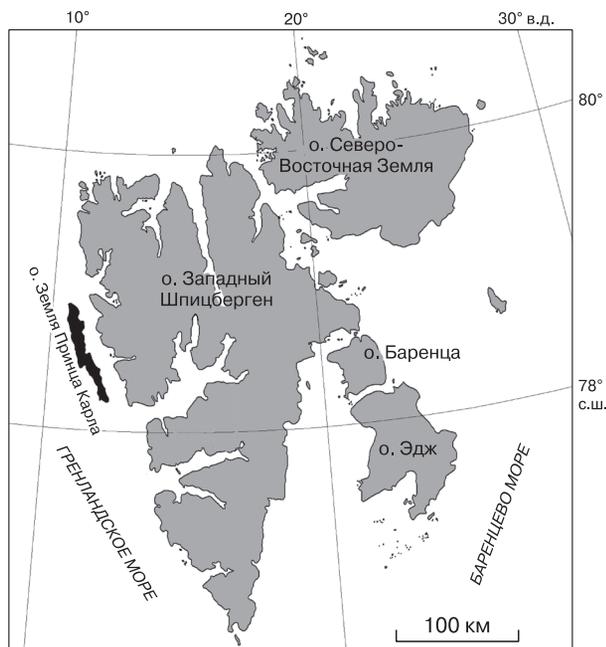


Рис. 1. Месторасположение Земли Принца Карла.

Потепление в Арктике привело к существенному сокращению оледенения Шпицбергена [Hagen, Liestol, 1990; Hagen et al., 2003]. Особенно заметно этот процесс происходил на его западных территориях – Земле Норденшельда, Земле Диксона, ЗПК. Сокращение ледников происходило за счет отступления их фронтов и уменьшения площади языков [Bamber et al., 2005]. При этом темпы сокращения горных ледников Западного Шпицбергена в начале XXI в. увеличились в 3–4 раза в сравнении с серединой XX в. [Kohler et al., 2007]. Результаты сравнения старых карт 1936–1938 гг. и современных цифровых моделей рельефа (ЦМР) для территории ЗПК дают значительную ошибку по высоте [Kohler et al., 2007], поэтому детальное рассмотрение реакции ледников острова возможно лишь для площадных измерений. Оценка изменений площади ледников выявляет различные масштабы их деградации в зависимости от морфологических особенностей ледников.

#### ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Ландшафт ЗПК крайне неоднороден. Южная часть острова, западное побережье и его северная оконечность представляют собой низменность, обширные пространства которой заняты тундрой. Вдоль центральной части острова тянется горный хребет, высота которого постепенно увеличивается в направлении с юга на север. В южной части хребта распространены небольшие каровые и карово-долинные ледники. Из-за низкого горного обрамления они располагаются в узком высотном

интервале от 100 до 450 м. В северной части острова вершины хребта достигают высоты 1000 м (г. Монако – 1084 м). Здесь расположены наиболее крупные ледники, которые спускаются к восточному побережью. Ледники-амфитеатры Sore Buchananisen, Nordre Buchananisen и Murraybreen образуют обширные ледовые поля, достигая берега пролива. По-видимому, условная граница группы северных и южных ледников находится между ледниками Alfredbreen и Sore Buchananisen на 78°35' с.ш.

Несмотря на высокоширотное положение, климат острова относительно теплый со среднегодовым количеством осадков около 600 мм. По данным метеостанции Нью-Алесунд, расположенной в 30 км к востоку от острова, в последнем десятилетии средние зимние температуры воздуха в январе были около  $-6^{\circ}\text{C}$ , а в июле – около  $6^{\circ}\text{C}$ . Современное повышение температуры воздуха на Шпицбергене и сокращение ледников было отмечено с 1920-х гг. [Forland, Hanssen-Bauer, 2003; Kohler et al., 2007; Nuth et al., 2013; Malecki, 2016]. В западной части Шпицбергена рост летних (июнь–август) температур воздуха, по данным метеостанции в Баренцбурге, составил  $0.08^{\circ}\text{C}$  в год за 50-летний период (1950–2000) [https://rp5.ru], на метеостанции Лонгиер  $0.04^{\circ}\text{C}$  в год за 40-летний период (1967–1997) и  $0.17^{\circ}\text{C}$  в год за последующий 10-летний период. Незначительное увеличение количества зимних осадков во второй половине XX в. на территории Западного Шпицбергена [Осокин и др., 2010], по-видимому, не компенсирует убыль льда от летнего таяния. В последние десятилетия на западном побережье Шпицбергена количество зимних осадков стало уменьшаться, а летнее таяние усиливаться [https://rp5.ru]. В связи с этим в конце периода абляции снеговая линия устойчиво поднимается выше 500 м над уровнем моря, что на 150–200 м выше в сравнении с 1970–1980 гг. [Троцкий и др., 1975; Корякин, 1988; Nuth et al., 2007].

В силу своего периферийного положения горные ледники острова оказались крайне чувствительными к климатическим изменениям, что отразилось на их современном состоянии.

#### ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе были использованы: 1) спутниковый снимок Sentinel-2 уровня обработки L1C (13.09.2017) с пространственным разрешением 10 м; 2) данные полевых наблюдений, полученные в августе 2016 г.; 3) база данных “CryoClim GAO” [König et al., 2014]; 4) данные электронного ресурса Норвежского полярного института “Kart over Svalbard” [https://toposvalbard.npolar.no/]; 5) цифровая модель рельефа ArcticDEM версии 2.0 [ArcticDEM, 2018]; 6) ЦМР Норвежского

полярного института “Terrengmodell Svalbard” [Norwegian Polar Institute, 2014].

Полевые наблюдения проводились в августе 2016 г. на восточном побережье ЗПК в районе бухты Кулпен. Базовый лагерь располагался на северном берегу бухты, откуда были организованы маршрутные исследования к ближайшим ледникам. В большинстве случаев маршруты охватывали нижние части ледников и их моренные комплексы, на ледниках Doddsbreen и Magdabreen были осмотрены верховья. В результате полевых наблюдений получены сведения о положении фронтальных частей ряда ледников по отношению к их конечным моренам и массивам мертвых льдов, образовавшихся после отступления ледников. Отмечены значительные различия в величине отступления краев ледников от своих конечных морен, сформированных в конце XX в. Наличие ядер мертвого льда указывало на то, что морены достаточно молодые. Величина отступления краев ледников колебалась от 150 до 1500 м. Таким образом, полевые исследования выявили на качественном уровне существенные различия в реакции ледников на потепления климата. В ходе маршрутов отмечались следующие признаки отступления ледников: отступление фронта ледника, наличие вытаивающих ригелей и донной морены в области абляции, понижение поверхности ледника относительно боковых морен.

Дешифрирование границ ледников на спутниковом снимке Sentinel-2 было проведено вручную по методике международного проекта GLIMS [Raup, Khalsa, 2010]. Точность пространственной привязки снимков Sentinel-2 находится в пределах 11 м с уровнем доверия 95.5 % [SENTINEL, 2018]. На основе результатов дешифрирования были созданы цифровые карты границ ледников в векторном формате в картографической проекции UTM Zone 33N на эллипсоиде WGS 1984. Вклад погрешности, обусловленной разрешающей способностью спутниковых снимков Sentinel-2 и точностью их пространственной привязки, оценивался путем построения буферной зоны вдоль границ ледников, ширина которой равнялась удвоенной величине точности пространственной привязки данных снимков.

При проведении ледоразделов и оценке высот высших и низших точек ледников использовались результаты обработки ЦМР (растровые изображения экспозиции и уклонов поверхностей): 1) “ArcticDEM Mosaik” с пространственным разрешением 5 м [ArcticDEM, 2018]; 2) ЦМР Норвежского полярного института с пространственным разрешением 5 м [Norwegian Polar Institute, 2014] (на участках, не покрытых данными ArcticDEM).

Разработчики ArcticDEM в разделе описания данных на сайте проекта указывают, что горизонтальные и вертикальные характеристики точности

данных этой ЦМР не были проверены [ArcticDEM, 2018]. Покрытие мозаики ArcticDEM на район исследований сформировано из результатов обработки 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. То есть вертикальная точность ArcticDEM должна существенно превосходить точность ASTER GDEM2, которая находится в пределах 17 м с уровнем доверия 95 % [Tachikawa et al., 2011].

Покрытие ЦМР Норвежского полярного института на территорию ЗПК приведено по состоянию на 2008 г. [Norwegian Polar Institute, 2014]. Данная ЦМР создана на основе результатов обработки данных аэрофотосъемки. Оценок горизонтальной и вертикальной точности данных разработчики этой ЦМР не приводят.

Из базы данных “CryoClim GAO” [König et al., 2014] на район ЗПК использовались данные о ледниках по состоянию на 1936 и 1990 гг., которые были получены в результате обработки материалов аэрофотосъемки. С ресурса “Kart over Svalbard” [https://toposvalbard.npolar.no/] были получены данные о площади ледников района исследований в 2008 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки указанных материалов были определены пространственные границы ледников ЗПК и их площади по состоянию на 2017, 1990 и 1936 гг., а также площади ледников в 2008 г. Высоты высших и низших точек, площади ледников и изменения площади приведены в табл. 1. Полученные результаты свидетельствуют о существенных различиях в реакции ледников на современные климатические изменения. Так, относительное сокращение площади ледников за 1990–2008 гг. составляет от 3.3 до 71.4 %, за 2008–2017 гг. – от 0 до 58.3 %. Установлено, что одни ледники находились в стадии исчезновения и их остатки обнаруживались в глубине вмещающих цирков, другие, наоборот, лишь незначительно отодвинулись от своих конечных морен конца XX в. Сильнее всего сократились небольшие каровые и карово-долинные ледники, расположенные на юге острова. Многие каровые ледники, лежащие ниже 400 м, находятся в состоянии отмирания. Крупные ледники на севере ЗПК, занимающие обширные пространства восточного побережья, за 1990–2017 гг. сократились по площади на 26 %. Очевидно, значительные размеры и толщина льда ледниковых языков обеспечили им устойчивость. Тем не менее в XX в. потери льда на этом участке были максимальными. Понижение поверхности ледников восточного побережья достигало 145 м [Hagen, Liestol, 1990], дальнейшее тая-

Таблица 1. Изменение площади ледников о. Земля Принца Карла в 1936–2017 гг.

№ п/п	Ледник	ID ледника в "СупоСlim GAO" на 1990 г.	Высотный диапазон, м	Экспозиция	Площадь ледника, км <sup>2</sup>			Изменение площади ледника, км <sup>2</sup> /%						
					2017	2008	1990	1936	1936–1990	1990–2008	2008–2017	1936–2017		
1	Austre Vesalbreen	15111	123–718	C–B	0.57 ± 0.07	0.86	1.0	1.76	-0.76/-43.2	-0.14/-14.0	-0.29/-33.7	-1.19/-67.6		
2	Vestre Vesalbreen	15112	229–697	C–3	0.37 ± 0.05	0.54	0.68	1.62	-0.94/-58.0	-0.14/-20.6	-0.17/-31.5	-1.25/-77.2		
3	–	15199,1	353–560	C–3	0.19 ± 0.02	0.20	0.23	0.52	-0.29/-55.8	-0.03/-13.0	-0.01/-5.0	-0.33/-63.5		
4	Murraybreen	15110	0–700	B	8.58 ± 0.26	9.48	11.60	17.67	-6.07/-34.4	-2.12/-18.3	-0.9/-9.5	-9.09/-51.4		
5	Millerbreen	15113	82–752	C–3	3.86 ± 0.16	9.30	10.11	12.70	-2.59/-20.4	-0.81/-8.0	-0.97/-10.4	-4.37/-34.4		
6	Fallbreen	15109	50–623	B	4.47 ± 0.21	3.58	3.98	4.77	-0.79/-16.6	-0.4/-10.1	-0.25/-7.0	-1.44/-30.2		
7	Nordre Buchananisen	15108,3	0–792	B	3.33 ± 0.14	0.12	0.13	0.24	-0.11/-45.8	-0.01/-7.7	-0.07/-58.3	-0.19/-79.2		
8	–	15199,09	369–615	C–3	0.05 ± 0.01	5.81	6.01	9.38	-3.37/-35.9	-0.2/-3.3	-0.13/-2.2	-3.7/-39.4		
9	Nordre Buchananisen	15108,1, 15108,2	0–1116	B	5.68 ± 0.32	0.15	0.18	0.20	-0.02/-10.0	-0.03/-16.7	0.02/13.3	-0.03/-15.0		
10	–	15199,08	624–954	Ю–3	0.17 ± 0.02	0.09	0.12	0.28	-0.16/-57.1	-0.03/-25.0	-0.02/-22.0	-0.21/-75.0		
11	–	15199,07	260–517	3	0.07 ± 0.02	15.42	17.46	25.34	-7.88/-31.1	-2.04/-11.7	-2.06/-13.4	-11.98/-47.3		
12	Sore Buchananisen	15107,1–15107,4	0–994	B	13.36 ± 0.64	1.26	1.37	2.05	-0.68/-33.2	-0.11/-8.0	-0.21/-16.7	-1.0/-48.8		
13	Parnassbreen	15114	130–959	3	1.05 ± 0.10	0.79	0.84	1.08	-0.24/-22.2	-0.05/-6.0	-0.21/-26.6	-0.5/-46.3		
14	Stigbreen	15115	307–803	3	0.58 ± 0.05	3.89	4.33	5.03	-0.7/-13.9	-0.44/-10.2	-1.26/-32.4	-2.4/-47.7		
15	Alfredbreen	15106	52–336	C–B	2.63 ± 0.13	2.35	2.95	4.51	-1.56/-34.6	-0.6/-20.3	-0.83/-35.3	-2.99/-66.3		
16	Magdabreen	15105	74–359	C–B	1.52 ± 0.09	0.16	0.17	0.37	-0.2/-54.1	-0.01/-5.9	-0.06/-37.5	-0.27/-73.0		
17	–	15199,06	357–430	C	0.10 ± 0.02	0.11	0.12	0.31	-0.19/-61.3	-0.01/-8.3	-0.05/-45.5	-0.25/-80.6		
18	Scotiabreen	15199,05	257–433	C	0.06 ± 0.01	0.04	0.14	0.27	-0.13/-48.1	-0.1/-71.4	-0.01/-25.0	-0.24/-88.9		
19	–	15199,03	144–233	3	0.03 ± 0.01	0.11	0.28	0.52	-0.24/-46.2	-0.17/-60.7	-0.03/-27.3	-0.44/-84.6		
20	–	15199,04	182–310	C	0.08 ± 0.01	1.69	1.96	2.61	-0.65/-24.9	-0.27/-13.8	-0.54/-32.0	-1.46/-55.9		
21	Doddsbreen	15104	137–500	C–3	1.15 ± 0.07	0.58	0.66	0.97	-0.31/-32.0	-0.08/-12.1	-0.16/-27.6	-0.55/-56.7		
22	Tritoppbreane	15116,1	263–500	3	0.42 ± 0.04	0.65	0.72	1.23	-0.51/-41.5	-0.07/-9.7	-0.22/-33.8	-0.8/-65.0		
23	Tritoppbreane	15116,2	204–492	C–3	0.43 ± 0.04	1.27	1.52	2.53	-1.01/-39.9	-0.25/-16.4	-0.65/-51.2	-1.91/-75.5		
24	James Geikiebreen	15103,3	43–556	B	0.62 ± 0.06	1.95	2.76	4.33	-1.03/-33.1	-0.81/-29.3	-0.48/-24.6	-2.11/-67.8		
25	James Geikiebreen	15103,1	50–371	C	1.0 ± 0.08	0.08 ± 0.02	0.17	0.42	-0.54/-44.3	-0.09/-52.9	0	-0.75/-61.5		
26	James Geikiebreen	15103,2	88–397	C	0.47 ± 0.04	0.08 ± 0.02	3.10	4.53	-0.25/-59.5	-0.71/-22.9	-0.68/-28.5	-0.34/-81.0		
27	–	15199,02	249–420	C–3	1.71 ± 0.08	2.39	3.10	4.53	-1.43/-31.6	-0.53/-20.3	-0.42/-20.2	-2.82/-62.3		
28	Midtre Geikiebreen	15102	87–480	C–B	1.66 ± 0.09	2.08	2.61	4.17	-1.56/-37.4	-0.28/-12.7	-0.59/-30.7	-2.51/-60.2		
29	Archibald Geikiebreen	15101,2	93–695	B	1.33 ± 0.08	1.92	2.20	4.33	-2.13/-49.3	-0.03/-13.0	-0.1/-50.0	-3.0/-69.3		
30	Archibald Geikiebreen	15101,1	71–574	C–B	0.1 ± 0.02	0.20	0.23	0.44	-0.21/-47.7	-0.03/-13.0	-0.1/-50.0	-0.34/-77.3		
31	–	15199,01	311–471	C–3	55.72 ± 2.96	67.07	77.63	114.18	-36.55/-32.0	-10.56/-13.6	-11.35/-16.9	-58.46/-51.2		
Всего														

ние языков привело к сокращению их площади и отступанию фронта. По данным полевых наблюдений, в 2016 г. ледниковый язык ледника Sore Buchananisen был пологий и крайне истонченный, а его фронт отодвинулся от своей конечной морены 1990-х гг. на расстояние в среднем 0.9 км.

Отдельно для каждого ледника, распавшегося в период 1990–2017 гг., приведена суммарная площадь всех сегментов, которые ранее были одним ледником. К 2017 г. ледники Austre Vesalbreen, Murreybreen, Fallbreen, Magdabreen распались. Ледники Millerbreen и Fallbreen имеют протяженный ледораздел, положение которого существенно различается в настоящей работе и базе данных “CryoClim GAO” [König *et al.*, 2014]. Поэтому при сравнении современных и исторических данных о площади эти ледники целесообразно рассматривать как единый переметный комплекс. Ледник Sore Buchananisen в базе данных “CryoClim GAO” разбит на четыре отдельных ледника с протяженными ледоразделами [König *et al.*, 2014]. Авторами он представлен как единое целое (аналогично Randolph Glacier Inventory). Высотный диапазон и экспозиция ледников Sore Buchananisen, Alfredbreen, Magdabreen, Scotiabreen, James Geikiebreen определены по результатам анализа ЦМР Норвежского полярного института 2008 г. В 2008 г. ледники с ID 15103,1 и 15103,2 были частями одного ледника. На ресурсе “Kart over Svalbard” [https://toposvalbard.npolar.no/], с которого были получены данные о границах ледников в 2008 г., ледораздел между этими ледниками не проведен. Вследствие этого в табл. 1 приведена их площадь как единого целого.

Изменения границ ледников в 1936, 1990 и 2017 гг. и относительное сокращение площади представлены на рис. 2 (в подложке использован спутниковый снимок Sentinel-2 от 13.09.2017).

На рис. 2, б, в цветом показаны изменения площади ледников в периоды 1936–1990 и 1990–2017 гг. Границы ледников на рис. 2, б, в даны по состоянию на 1990 и 2017 г. соответственно. Для обоих периодов отмечается преобладание сокращения площади ледников, расположенных на юге, в сравнении с ледниками, расположенными на севере острова. Потери площади южных ледников в оба периода соизмеримы, хотя длительность первого периода вдвое больше, чем второго. Исключения составляют наиболее крупные в этой группе горно-долинные ледники Doddsbreen (№ 21), Alfredbreen (№ 15) и Magdabreen (№ 16), сокращения которых после 1990 г. усилилось в 2–3 раза.

Противоположная ситуация сложилась в северной группе ледников. Потери крупнейших ледников Murreybreen (№ 4), Nordre Buchananisen (№ 9) в период до 1990 г. оказались вдвое больше в сравнении с последующими годами, что, очевидно, связано с интенсивным сокращением их ледо-

вых полей, расположенных на побережье. Остальные ледники показали соизмеримые потери своей площади. В целом сравнение показывает, что темпы сокращения ледников как северных, так и южных, увеличились приблизительно в 2 раза, а потери площади с 1936 до 1990 г. оказались соизмеримы с потерями 1990–2017 гг.

Четыре крупнейших ледника острова Murreybreen, Millerbreen, Sore Buchananisen, Nordre Buchananisen, площадь которых составляет почти половину всей площади оледенения ЗПК, с 1990 г. отступили в пределах 1 км, а их площади сократились на 15–30 %. Эти изменения происходили в основном за счет распада их языков, выходящих в морские заливы. Более масштабные сокращения произошли с ледниками в центре острова. Ледники Alfredbreen, Magdabreen, Doddsbreen расположены в низком горном обрамлении, поэтому их область питания существенно уменьшилась. Сокращение площади этих ледников в 1990–2017 гг. составило от 39.3 до 48.5 %. Семь ледников распались на фрагменты. Малые ледники значительно сократились как на севере, так и в центре острова. В южной части района оледенения, где отмечены максимальные сокращения ледников, их верхние границы поднимаются лишь до 450 м. На момент посещения ледников в начале августа 2016 г. пятна сезонного снежного покрова на ледниках Doddsbreen, Magdabreen и Alfredbreen были отмечены на высоте 400 м – у границы скал. Учитывая, что таяние на ледниках продолжается до начала сентября, снежный остаток толщиной около 20–30 см должен был полностью исчезнуть до конца сезона абляции.

Из результатов следует, что изменение площади данных ледников связано прежде всего с их размерами и высотным положением. При сопоставлении этих величин обнаруживается закономерность, представленная на рис. 3. Ледники группы 1, верхние границы которых расположены ниже 500 м, имеют большие значения относительного сокращения площади. Группа 2 ледников, лежащих выше 500 м, характеризуется наименьшим сокращением площади. Крупнейшие ледники-амфитеатры Sore Buchananisen, Nordre Buchananisen и Murreybreen не укладываются в общую тенденцию, так как сокращение их площадей связано с разрушением низколежащих языков лопастей. В обеих группах наблюдается общая тенденция: чем меньше площадь ледника, тем больше его относительное сокращение (см. табл. 1).

При полевых изысканиях обнаружены признаки быстрого отступания ледников в центральной части острова ЗПК, к которой относится большинство ледников группы 1. На основе маршрутных наблюдений установлено, что ледники № 16, 18, 20, 22, 23, 25 (см. табл. 1; рис. 2, б, в) значительно отступили от своих конечных морен, которые

были сформированы в XX в. Об этом свидетельствует наличие под моренным чехлом мертвых льдов, наблюдавшихся во время полевых работ 2016 г. На их поверхности обнаруживаются следы просадок грунта, связанных с термокарстовыми процессами. Кроме того, на моренах отсутствует растительность.

В центральной части острова ледники отступили на 300–600 м от конечных морен, ледник Doddsbreen – на 800 м (рис. 4). Пологий и низко-расположенный язык ледника Magdabreen отступил приблизительно на 1 км. На поверхности ледников наблюдаются очевидные признаки их сокращения: уменьшение площади или полное исчезновение областей питания, пологие и истонченные языки, вытаивание донной морены в краевых частях ледников, отчленение периферии языков и образование массивов мертвых льдов. Конечные морены ледников Alfredbreen, Tritoppbreane и южной части Sore Buchananissen содержат “ледяные ядра”, толщина которых в обнажениях достигала 20 м. Эти признаки указывают на то, что процесс отступления горных ледников района происходит быстрыми темпами.

В абсолютной величине потери площади льда с 1990 по 2017 г. на юге и севере ЗПК оказались соизмеримы. На севере острова ледники, занимающие обширные низменные пространства выводящими языками, с 1990 г. освободили территорию площадью 4.5 км<sup>2</sup>, около 4 км<sup>2</sup> было освобождено ледниками на юге острова. Остальное уменьшение площади оледенения района произошло за счет сокращения небольших каровых ледников (см. табл. 1). Общие потери льда на Земле Принца Карла с 1990 по 2017 г. составили 20.3 км<sup>2</sup>.

На основе данных [Корякин, 1988] площадь оледенения о. Земля Принца Карла в период с 1936 по 1976 г. сократилась немного – на 5 км<sup>2</sup> (табл. 2). Согласно литературным источникам и настоящему исследованию, площадь ледников с 1936 по 1990 г. сократилась на 36.5 км<sup>2</sup> [König et al., 2014], а в последующие периоды 1990–2008 и 2008–2017 гг. – на 10.5 и 11.0 км<sup>2</sup> соответственно. Максимальные темпы сокращения ледников отмечены во второй половине XX в., что совпадает с аналогичными оценками на территории Западного Шпицбергена [Kohler et al., 2007]. При этом сведения, указанные в работе В.С. Корякина [1988], о площади оледенения на 1976 г. представляются авторам несколько завышенными, так как с 1936 г. оледенение острова уменьшилось лишь на 5 км<sup>2</sup>.

В связи с сокращением и распадом ледников их количество возросло, в 2017 г. на острове насчитывалось 42 ледника (см. табл. 2). При этом в 2008 г. их было меньше, чем в 1990 и 1936 гг., по причине использования разных методов определения границ ледников на ресурсах “Kart over

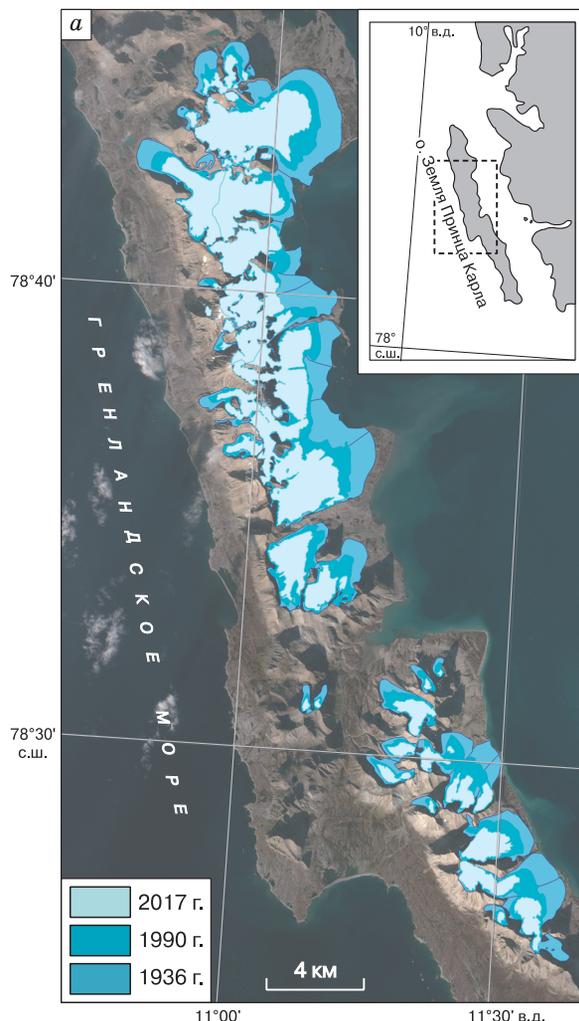
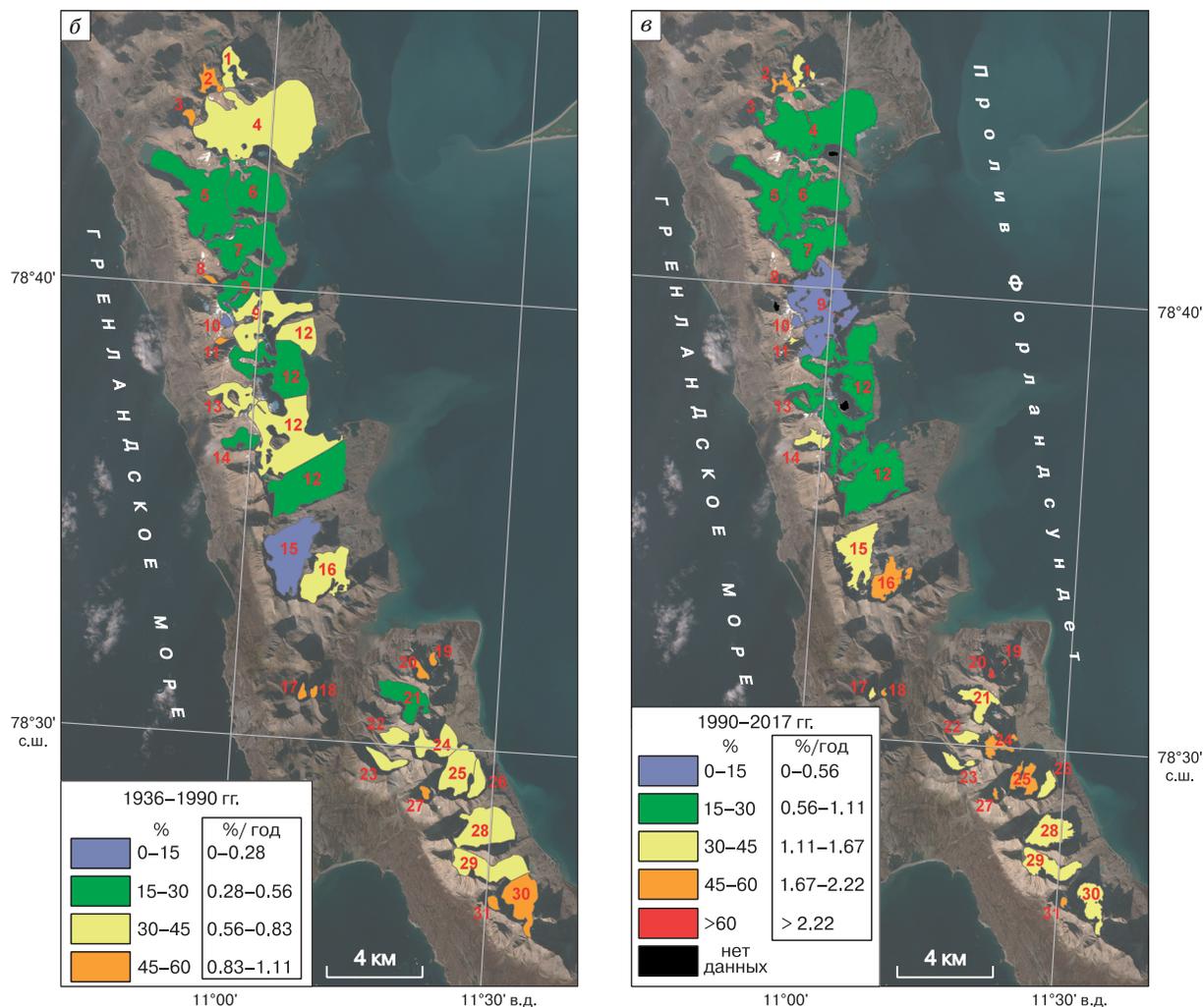


Рис. 2. Положение границ ледников Земли Принца

Svalbard” [<https://toposvalbard.npolar.no/>] и “CryoClim GAO” [König et al., 2014]. В базе данных “CryoClim GAO” несколько ледников разбиты на части протяженными ледоразделами, а на “Kart over Svalbard” такого разбиения нет.

По-видимому, до середины XX в. ледники острова получали достаточно питания, так как граница питания находилась значительно ниже современного положения – на уровне около 200–350 м [Троицкий и др., 1975]. Однако с продолжением повышения летних температур воздуха и усилением таяния ее уровень повысился до 400–450 м [Van Pelt et al., 2016]. В 1970–1980-х гг. высота границы питания на леднике Midtre Lovénbreen, расположенном восточнее в 30 км, колебалась вблизи 400 м [Hagen, Liestol, 1990]. В 2008 и 2016 гг. средний уровень границы питания на ЗПК не опускался ниже 500 м на основании данных аэрофотосъемки по “Kart over Svalbard” и полевых наблюдений авторов.



Карла в 2017, 1990 и 1936 гг. (а), сокращение (%) их площади с 1936 по 1990 г. (б) и с 1990 по 2017 г. (в).

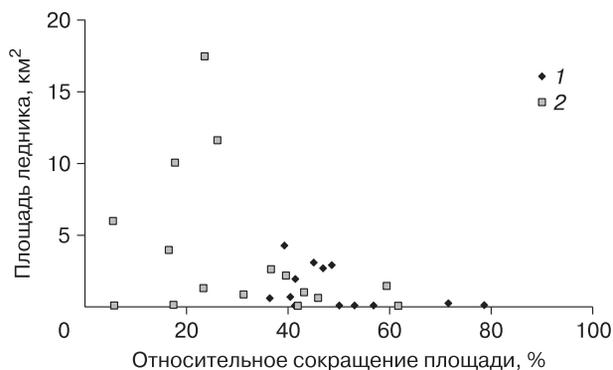


Рис. 3. Площадь ледника и его относительное сокращение (по данным 1990–2017 гг.).

1 – группа ледников, лежащих ниже 500 м; 2 – группа ледников, расположенных выше 500 м.



Рис. 4. Ледник Доддс (Doddsbreen), о. Земля Принца Карла (архипелаг Шпицберген).

Фото Р.А. Чернова. Август 2016 г.

Таблица 2. Изменение площади оледенения о. Земля Принца Карла за последние 80 лет

Год	Количество ледников	Площадь ледников, км <sup>2</sup>	Изменение площади, км <sup>2</sup> /%	Темпы сокращения ледников, км <sup>2</sup> /% в год	Сокращение площади оледенения с 1936 г., км <sup>2</sup> /%	Источник
1936	35	114.18	Н/д	Н/д	Н/д	[König et al., 2014]
1976	Н/д	109	-5.18/-4.5	-0.126/-0.11	-5.18/-4.5	[Корякин, 1988]
1990	35	77.63	-31.37/-28.8	-2.241/-2.06	-36.55/-32	[König et al., 2014]
2008	30	67.07	-10.56/-13.6	-0.587/-0.76	-47.11/-41.3	toposvalbard.npolar.no
2017	42	56.01 ± 3	-11.06/-16.5	-1.229/-1.83	-58.17/-50.9	Настоящая статья

Примечание. Н/д – нет данных.

Безусловно, изменение климата на Шпицбергене в XX в. привело к усилению таяния ледников, что обусловило сокращение их площади [Hagen, Liestol, 1990; Kohler et al., 2007]. Суммарно ледники ЗПК потеряли за последнее столетие около 2/3 площади. При этом темпы их сокращения остаются высокими (см. табл. 2). Относительно небольшие масштабы оледенения острова и особенности высотного положения ледников обуславливают значительные темпы их сокращения, которые, по-видимому, не имеют аналогов как на Шпицбергене [Чернов, Муравьев, 2018], так и в других арктических регионах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ реакции горных ледников на изменение климата на Земле Принца Карла выявил значительное сокращение их площади и отступление фронтов. С 1936 г. площадь оледенения района сократилась на 50.9 % и продолжает сокращаться в среднем на 1.23 км<sup>2</sup>, или 1.8 % в год. По результатам обработки спутникового снимка 2017 г. оледенение ЗПК представлено 42 ледниками общей площадью (56.01 ± 3) км<sup>2</sup>. Все ледники на острове находятся в стадии отступления, хотя масштабы их изменений существенно различаются. С 1990 г. наибольшие потери площади (до 78.6 %) испытали небольшие горные ледники, лежащие ниже 500 м над уровнем моря. В силу особенностей рельефа острова наименее всего сократились крупные ледники на севере острова, так как их области питания сохраняются благодаря высотному положению. Размеры ледников также оказались важным фактором их устойчивости в условиях потепления.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Полярно-альпийского ботанического сада-института РАН Д.А. Давыдову и Л.А. Коноревой за содействие в организации полевых работ.

Камеральная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60067). Обработка данных дистанционного зондирования Земли произведена в рамках Государственного

задания № 0148-2019-0004 (АААА-А19-119022190172-5) “Оледенение и сопутствующие природные процессы при изменениях климата”.

### Литература

- Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Под ред. В.М. Котлякова. М., Изд-во РАН, 1997, 392 с.
- Корякин В.С. Ледники Арктики. М., Наука, 1988, 158 с.
- Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Чернов Р.А. Оценка абляции на ледниках архипелага Шпицберген в начале XXI века // Лед и снег, 2010, № 3 (111), с. 13–18.
- Троицкий Л.С. Оледенение Шпицбергена (Свальбарда) / Л.С. Троицкий, Е.М. Зингер, В.С. Корякин, В.А. Маркин, В.И. Михалев. М., Наука, 1975, 275 с.
- Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) // Лед и снег, 2018, № 58 (4), с. 462–472.
- ArcticDEM. DEM(s) were created from Digital Globe, Inc., imagery and funded under National Science Foundation awards 1043681, 1559691, and 1542736. <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (дата публикации данных: 01.03.2018).
- Bamber J.L., Krabill W., Raper V. et al. Elevation changes measured on Svalbard glaciers and ice caps from airborne LIDAR data // Ann. Glaciol., 2005, No. 42, p. 202–208.
- Førland E.J., Hanssen-Bauer I. Past and future climate variations in the Norwegian Arctic: overview and novel analyses // Polar Res., 2003, No. 22, p. 113–124.
- Hagen J.O., Kohler J., Melvold K. Glaciers in Svalbard: Mass balance, runoff, and freshwater flux // Ibid., p. 145–159.
- Hagen J.O., Liestol O. Long term glacier mass balance investigations in Svalbard 1950–1988 // Ann. Glaciol., 1990, No. 14, p. 102–106.
- Kohler J., James T.D., Murray T. et al. Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers // Geophys. Res. Lett., 2007, vol. 34, L18502.
- König M., Kohler J., Nuth C. Glacier Area Outlines – Svalbard, version 1.0, 2013, <http://data.npolar.no/dataset/89f430f8-862f-11e2-8036-005056ad0004> Delivered by CryoClim service Norwegian Polar Institute (2014). Terrengmodell Svalbard (S0 Terrengmodell) [Data set].
- Malecki J. Accelerating retreat and high-elevation thinning of glaciers in central Spitsbergen // The Cryosphere, 2016, vol. 10, p. 1317–1329.
- Norwegian Polar Institute. Terrengmodell Svalbard (S0 Terrengmodell), 2014 [Data set], <https://doi.org/10.21334/npolar.2014.dce53a47> (дата публикации данных: 04.12.2014).

- Nuth C., Kohler J., Aas H.F. et al.** Glacier geometry and elevation changes on Svalbard (1936–90): a baseline dataset // *Ann. Glaciol.*, 2007, No. 46, p. 106–116.
- Nuth C., Kohler J., König M. et al.** Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard // *The Cryosphere*, 2013, vol. 7, p. 1603–1621.
- Pfeffer W.T., Arendt A.A., Bliss A., Bolch T.** The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers // *J. Glaciol.*, 2014, vol. 60 (221), p. 537–552.
- Raup B., Khalsa S.J.S.** GLIMS data analysis tutorial. 2010, 15 p., <https://www.glims.org/>
- SENTINEL 2 Data Quality Report.** ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR, 2018, iss. 24, 36 p. <http://earth.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-Data-Quality-Report>.
- Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A. et al.** ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. NASA, 2011, 27 p., [https://lpdaacaster.cr.usgs.gov/GDEM/Summary\\_GDEM2\\_validation\\_report\\_final.pdf](https://lpdaacaster.cr.usgs.gov/GDEM/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf)
- Tirrell G.W.** The glaciers of Spitsbergen // *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, 1922, vol. XVII, pt 1, 49 p.
- Van Pelt W.J.J., Kohler J., Liston G.E. et al.** Multidecadal climate and seasonal snow conditions in Svalbard // *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2016, vol. 121, p. 2100–2117.  
URL: [http://toposvalbard.npolar.no/\\_Kart\\_over\\_Svalbard](http://toposvalbard.npolar.no/_Kart_over_Svalbard) (дата обращения: 01.02.2018).  
URL: <https://www.yr.no/place/Norway/Svalbard/Longyearbyen/statistics> (дата обращения: 01.02.2018).  
URL: [http://rp5.ru/Архив\\_погода\\_в\\_Баренцбурге](http://rp5.ru/Архив_погода_в_Баренцбурге) (дата обращения: 01.10.2018).
- Forland E. J., Hanssen-Bauer I.** Past and future climate variations in the Norwegian Arctic: overview and novel analyses. *Polar Res.*, 2003, No. 22, p. 113–124.
- Hagen J.O., Kohler J., Melvold K. Glaciers in Svalbard: Mass balance, runoff, and freshwater flux. *Polar Res.*, 2003, No. 22, p. 145–159.
- Hagen J.O., Liestol O. Long term glacier mass balance investigations in Svalbard 1950–1988. *Ann. Glaciol.*, 1990, No. 14, p. 102–106.
- Kohler J., James T.D., Murray T. et al. Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, No. 34 (18), L18502, DOI:10.1029/2007GL030681.
- König M., Kohler J., Nuth C. Glacier Area Outlines – Svalbard, version 1.0, 2013, <http://data.npolar.no/dataset/89f430f8-862f-11e2-8036-005056ad0004> Delivered by CryoClim service Norwegian Polar Institute (2014). Terrengmodell Svalbard (S0 Terrengmodell) [Data set], <https://doi.org/10.21334/npolar.2014.dce53a47>.
- Malecki J. Accelerating retreat and high-elevation thinning of glaciers in central Spitsbergen. *The Cryosphere*, 2016, vol. 10, p. 1317–1329.
- Norwegian Polar Institute. Terrengmodell Svalbard (S0 Terrengmodell), 2014 [Data set], <https://doi.org/10.21334/npolar.2014.dce53a47>
- Nuth C., Kohler J., König M. et al. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard. *The Cryosphere*, 2013, vol. 7, p. 1603–1621.
- Nuth C., Kohler J., Aas H.F. et al. Glacier geometry and elevation changes on Svalbard (1936–90): a baseline dataset. *Ann. Glaciol.*, 2007, No. 46, p. 106–116, DOI: 10.3189/172756407782871440.
- Pfeffer W.T., Arendt A.A., Bliss A., Bolch T. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *J. Glaciol.*, 2014, vol. 60 (221), p. 537–552.
- Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial, 2010, 15 p. <https://www.glims.org/>
- SENTINEL 2 Data Quality Report.** ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR, 2018, iss. 24, 36 p. <http://earth.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-Data-Quality-Report>.
- Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A. et al.** ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. NASA, 2011, 27 p., [https://lpdaacaster.cr.usgs.gov/GDEM/Summary\\_GDEM2\\_validation\\_report\\_final.pdf](https://lpdaacaster.cr.usgs.gov/GDEM/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf)
- Tirrell G.W.** The glaciers of Spitsbergen. *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, 1922, vol. XVII, pt 1, 49 p.
- Van Pelt W.J.J., Kohler J., Liston G.E. et al.** Multidecadal climate and seasonal snow conditions in Svalbard. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2016, vol. 121, p. 2100–2117, DOI: 10.1002/2016JF003999.  
URL: [http://toposvalbard.npolar.no/\\_Kart\\_over\\_Svalbard](http://toposvalbard.npolar.no/_Kart_over_Svalbard) (last visited 01.02.2018).  
URL: <https://www.yr.no/place/Norway/Svalbard/Longyearbyen/statistics> (last visited 01.02.2018).  
URL: [http://rp5.ru/Архив\\_погода\\_в\\_Баренцбурге](http://rp5.ru/Архив_погода_в_Баренцбурге) (last visited 01.10.2018).

## References

Kotlyakov V.M. (Ed.). Atlas snezhno-ledovykh resursov mira [World Atlas of Snow and Ice Resources]. Moscow, Izd-vo RAN, 1997, 392 p. (in Russian).

Koryakin V.S. Ledniki Arktiki [Glaciers of the Arctic]. Moscow, Nauka, 1988, 158 p. (in Russian).

Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Nakalov P.R., Chernov R.A. Assessment of ablation on the glaciers of the Spitsbergen Archipelago at the beginning of the 21st century. *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2010, No. 3 (111), p. 13–18 (in Russian).

Troitsky L.S., Zinger E.M., Koryakin V.S. et al. Oledeneniye Shpitsbergena [The Glaciation of Spitsbergen (Svalbard)]. Moscow, Nauka, 1975, 275 p. (in Russian).

Chernov R.A., Muraviev A.Ya. Contemporary changes in the area of glaciers in the western part of the Nordenskjöld Land (Svalbard). *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2018, No. 58 (4), p. 462–472 (in Russian).

ArcticDEM. DEM(s) were created from Digital Globe, Inc., imagery and funded under National Science Foundation awards 1043681, 1559691, and 1542736. <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (last visited 01.03.2018).

Bamber J.L., Krabill W., Raper V. et al. Elevation changes measured on Svalbard glaciers and ice caps from airborne LIDAR data. *Ann. Glaciol.*, 2005, No. 42, p. 202–208.

*Поступила в редакцию 27 декабря 2018 г.,  
после доработки – 13 июня 2019 г.,  
принята к публикации 17 июня 2019 г.*