

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 556.557, 551.324.63

DOI: 10.15372/KZ20220104

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР
АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕНР.А. Чернов¹, К.В. Ромашова²¹ *Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия; chernov@igras.ru*² *Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия; romashova@hotmail.com*

Показано современное состояние и приведены количественные оценки приледниковых озер на территории Шпицбергена. Эти озера образовались в котловинах в процессе современного сокращения оледенения архипелага. На основе норвежской аэрофотосъемки 2008–2012 гг. и мозаики изображений Maxar Vivid 2013–2019 гг. на архипелаге Шпицберген выявлено 629 новых приледниковых озер, которые располагаются на освободившихся от ледников территориях. Представлена карта положения новых озер на архипелаге и показано их распределение по территории и высотам. Наибольшее количество приледниковых озер расположено в западной и южной частях Шпицбергена, где отмечено масштабное отступление ледников. При этом процесс формирования новых приледниковых озер на архипелаге более выражен на северных и восточных территориях, где большинство озер имеют ледяные берега. Общая протяженность ледяных берегов 306 озер равна (233.8 ± 0.6) км по состоянию на 2008–2019 гг., что сопоставимо с длиной фронтов выводных ледников Шпицбергена. Суммарная площадь приледниковых озер составляет (173.1 ± 0.7) км², их общий объем воды находится в пределах от 2.1 до (2.3 ± 0.1) км³.

Ключевые слова: приледниковые озера, ледяной берег, отступление ледников, площадь озера, архипелаг Шпицберген.

CURRENT STATE OF GLACIAL LAKES ON SVALBARD

R.A. Chernov¹, K.V. Romashova²¹ *Institute of Geography, RAS, Staromonetny per. 29, Moscow, 119017, Russia; chernov@igras.ru*² *Arctic and Antarctic Research Institute, Bering str. 38, Saint Petersburg, 199397, Russia; romashova@hotmail.com*

The current state and the quantitative estimates of glacial lakes on Svalbard are presented. These lakes were formed in depressions under modern recession of glaciation of the archipelago. Based on Norwegian aerial photography 2008–2012 and mosaics of Maxar Vivid 2013–2019 images of Svalbard area, 629 new glacial lakes have been identified. These lakes are located on deglaciated areas. A map of new lakes and their distribution by territory and altitudes are presented. Most of glacial lakes are located in western and southern parts of Svalbard, where large-scale glacier retreat has been noted. At the same time, new glacial lakes are formed mostly in the northern and eastern parts of the archipelago where most of the lakes have ice coasts. The total length of ice coasts of 306 lakes was (233.8 ± 0.6) km in 2008–2019, which is comparable to the length of the fronts of the outlet glaciers of Svalbard. The total area of glacial lakes is (173.1 ± 0.7) km², and their total water volume ranges from 2.1 to (2.3 ± 0.1) km³.

Key words: glacial lakes, ice-contact lake, glacier retreat, lake area, Svalbard.

ВВЕДЕНИЕ

Архипелаг Шпицберген расположен в северной части Атлантического океана, его климат способствует распространению ледников различных типов. На севере и юге самого большого острова архипелага (Западный Шпицберген) преобладает полупокровное оледенение, на о. Земля Принца Карла и в центральной части Западного Шпицбергена (Земля Норденшельда, Земля Диксона и Земля Андрэ) распространены многочисленные горные ледники, на Северо-Восточной Земле,

островах Баренца и Эдж преобладает покровное оледенение. К настоящему времени ледники архипелага покрывают около 60 % площади суши [Hagen *et al.*, 1993; Zemp *et al.*, 2015], их площадь оценивается в диапазоне 33 600–33 850 км² [Nuth *et al.*, 2013; Pfeffer *et al.*, 2014]. Около 68 % площади оледенения разгружается выводными ледниками в морскую акваторию [Błaszczuk *et al.*, 2009; Nuth *et al.*, 2013]. В связи с климатическими изменениями в Арктике оледенение Шпицбергена находится в

стадии деградации, которая началась в первой половине XX в. [Троицкий и др., 1975; Гляциология..., 1985]. Максимальные величины сокращения ледников обнаруживаются на западных территориях, где фронты многих горно-долинных ледников Западного Шпицбергена отступили за минувшее столетие на 1.0–2.5 км [Чернов, Муравьев, 2018; Pfeffer et al., 2014]. Так, с 1936 г. площадь оледенения Земли Принца Карла сократилась на 51 %, Земли Норденшельда – на 49 %, в совокупности с 1936 по 2017 г. на этих территориях оледенение сократилось на 225 км² и продолжает сокращаться в среднем на 2 км² в год [Чернов и др., 2019б].

На освобожденных территориях формируется холмисто-моренный рельеф, степень расчлененности которого непосредственно связана с типом ледников [Троицкий, 1970]. Наличие котловин и гряд в моренных комплексах способствует образованию большого количества приледниковых озер. К концу прошлого века в полярных областях было обнаружено 1606 крупных озер, большинство из которых лежит на северных территориях континентов [Рянжин и др., 2010]. Современные исследования подтверждают увеличение количества приледниковых озер в Арктике, которое в первую очередь отмечено в Исландии, Канадском арктическом архипелаге и Гренландии [Luthje et al., 2006; Harrison et al., 2018; Carrivick, Fiona, 2019]. На архипелаге Шпицберген существует большое количество озер различного или смешанного происхождения, их общее количество на архипелаге неизвестно. При сравнении карт, построенных на основе аэрофотосъемки 1936–1937 гг., с современными электронными картами архипелага обнаруживаются многочисленные озера на территориях, ранее занятых ледниками. Они лежат в пределах конечных и боковых морен, которые были образованы в период максимума оледенения, т. е. в конце XIX–начале XX в. В научной литературе описания приледниковых озер Шпицбергена встречаются крайне редко [Luthje et al., 2006; Harrison et al., 2018; Carrivick, Fiona, 2019].

В высокогорных районах и Арктике отмечена экспансия озер в связи с отступанием ледников [Mool et al., 2001; Nie et al., 2018], а масштаб явления позволяет эффективно использовать дистанционные методы для поиска озер [Strozzi et al., 2012]. Региональные исследования приледниковых озер сосредоточены в высокогорье, так как они важны для оценки водных ресурсов и возможных рисков прорывов гляциальных озер. Эти опасные явления создают угрозу населению и инфраструктурам, расположенным ниже по течению [Harrison et al., 2018; Carrivick, Fiona, 2019]. В полярных регионах также известны события прорывов гляциальных озер [Гросвальд, Корякин, 1962; Чернов, Муравьев, 2020; Carrivick, Tweed, 2016; Nie et al., 2018]. Для Шпицбергена имеются сведения

лишь о нескольких озерах, где сообщается о событиях их прорыва и их формирования [Коккин, Куриллова, 2017; Liestøl, 1977; Liestøl et al., 1980; Ham-brey, 1984].

Приледниковые озера являются важной составляющей ландшафта в краевой области горных ледников и ледниковых покровов. Озера, расположенные на морене, способствуют таянию мертвых льдов, изменяют температурный режим окружающего пространства и подстилающей поверхности и в случае масштабных прорывов способны изменить ландшафт. Согласно сценарию среднего уровня выброса парниковых газов RCP4.5, к 2100 г. на Шпицбергене прогнозируется потепление на 5–8 °С и небольшое увеличение осадков в сравнении с концом XX в. В связи с этим ожидается, что ледники Шпицбергена потеряют до 50 % своей массы [Zemp et al., 2015; <http://archive.ipcc.ch/pdf...>]. Поэтому следует ожидать, что на освободившихся территориях процесс экспансии приледниковых озер будет продолжаться. В настоящей работе показано современное состояние приледниковых озер на территории архипелага Шпицберген. Количественные оценки даны в соответствии с административным делением архипелага по названию земель [<http://www.npolar.no/>]. Результаты работы могут быть полезны для оценки климатических изменений на архипелаге, учитывающих динамику формирования озер.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно первым описаниям приледниковых озер Арктики, местоположение озер может быть различным по отношению к леднику, также их различают по происхождению озерных котловин [Гросвальд, Корякин, 1962]. Для поиска приледниковых озер рассматриваются краевые области ледников и территория, покрытая моренными отложениями. На топографических картах архипелага 1937–1938 гг. площади моренных отложений ледников были отмечены условными обозначениями. Эти обозначения присутствуют и на современных электронных картах [<http://www.npolar.no/>]. При этом их внешние контуры совпадают с границами конечных морен, которые хорошо различимы в подоснове электронных карт – аэрофотоснимках 2008–2012 гг. По-видимому, они указывают на исторический максимум продвижения ледников, который был достигнут в XIX в. и на рубеже XX в. после окончания Малого ледникового периода [Mangerud et al., 1992].

Поиск озер выполнен с помощью картографического сервиса Норвежского полярного института (Norwegian Polar Institute) “KartoverSvalbard” [<http://www.npolar.no/>], в основе которого лежит аэрофотосъемка 1990 г. для юга Шпицбергена и 2008–2012 гг. для его центральных и северных территорий. Для южной части архипелага Шпиц-

берген поиск озер был произведен с использованием мозаики изображений Maxar Vivid 2013–2019 гг., доступной в наборе данных WorldImagery компании ESRI. Пространственное разрешение набора данных составляет 1.2 м. Территориально-земельное деление архипелага принято в соответствии с картографическим сервисом “Kartover-Svalbard”.

Как основа инвентаризации были рассмотрены озера, которые располагались перед фронтом ледника, на его борту в пределах боковой морены или за ее пределами, но подпруженные моренной. К рассмотрению в статье приняты приледниковые озера, длина которых была более 100 м, так как объекты меньшего размера дают значительные погрешности при измерениях их длины (в том числе длины ледяных берегов) и площади на электронных картах. Кроме того, небольшие озера с трудом различимы на доступных космических снимках. При размерах озер менее 100 м возникают также трудности в их визуальной идентификации, особенно для небольших проточных озер, которые могут быть временными сезонными объектами. Максимальная длина озера позволяет оперативно производить отбор озер, так как оценка их площади является более трудоемкой задачей. Многочис-

ленные озера, расположенные на морских террасах, удаленные от ледников и лежащие за пределами морен, не являются приледниковыми озерами и поэтому не учитывались. Также авторами не учитывались наледниковые озера, расположенные полностью на поверхности ледника, так как их существование может быть кратковременным.

Дистанционно были измерены следующие характеристики озер: площадь озера, максимальная длина, высотное положение, протяженность ледяного берега, координаты центра озера. Было принято к сведению: название ближайшего ледника, название области в соответствии с территориальным делением архипелага. Измерения длины озер, их площади и протяженности ледяных берегов выполнены вручную посредством встроенных инструментов картографического сервиса “Kartover-Svalbard”, а также с использованием свободной географической информационной системы с открытым кодом QGIS. Максимальная длина озера определялась как расстояние между наиболее удаленными точками берегов, положение которых оценивалось визуально. Поскольку измерения максимальной длины озера и его ледяных берегов выполнялись вручную, точность определения крайних точек была принята равной 10 м. Таким образом, относительная погрешность измерения длин была тем меньше, чем больше размеры озера или его ледяных берегов. Суммарная погрешность протяженности ледяных берегов озер оценена как среднее квадратичное отклонение, которое в нашем случае равно 0.6 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе электронных карт, представленных на сайте Норвежского полярного института, и мозаики изображений MaxarVivid были определены характеристики и положение приледниковых озер на всей территории архипелага. По состоянию на 2008–2019 гг. обнаружено 629 озер, максимальная длина которых превышает 100 м. Среди них около половины (306 озер) имеют ледяные берега, т. е. контактируют с ледником. Также выявлено 47 ледниково-подпруженных озер, среди которых 5 озер подпружены боковой мореной, а остальные непосредственно ледником. Максимальная длина озер лежит в диапазоне от 100 до 8640 м, средняя величина равна 600.5 м. Площадь озер меняется в широких пределах – от 0.002 до 17.34 км², среднее значение равно 0.27 км², суммарная площадь всех озер составляет (173.1 ± 0.7) км².

Положение приледниковых озер на архипелаге показано на рис. 1. Озера, которые имеют ледяные берега, очевидно, находятся в стадии формирования, так как их берега изменчивы.

Несмотря на разный масштаб сокращения оледенения, а также заметные климатические различия южных и северных территорий, приледни-

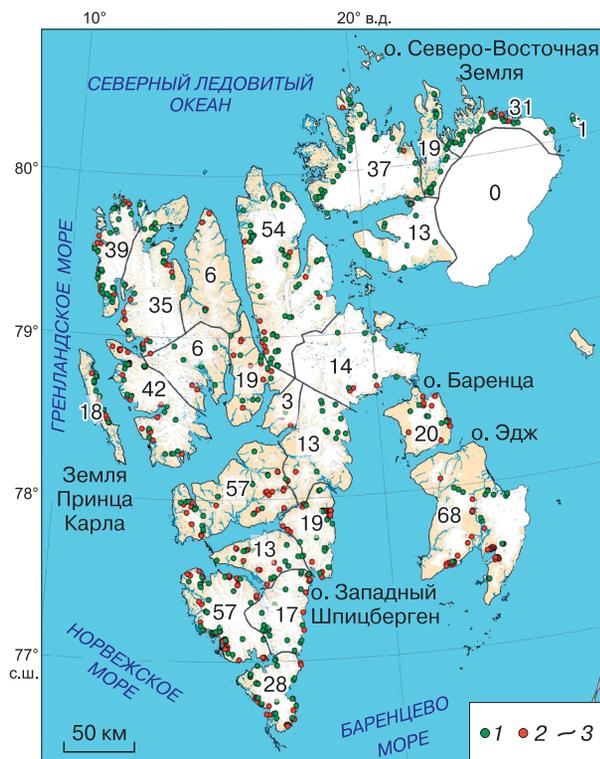


Рис. 1. Положение приледниковых озер на архипелаге Шпицберген.

1 – озера, имеющие ледяные берега (контактирующие с ледниками); 2 – озера без ледяных берегов; 3 – границы земель. Цифры – количество озер в границах земель.

Таблица 1. Расположение приледниковых озер на землях архипелага, их количество и доля озер с ледяными берегами

№	Земля	Средняя широта земли	Часть архипелага	Количество приледниковых озер	Количество приледниковых озер с ледяными берегами	Доля озер с ледяными берегами
1	Сторёя (Storöya)	80	В	1	1	1.00
2	Принца Оскара (Prins Oscars)	80	СВ	19	18	0.95
3	Густава V (Gustav V)	80	СВ	37	35	0.95
4	Густава Адольфа (Gustav Adolf)	80	СВ	13	11	0.85
5	Ню-Фрисланд (Ny-Fries)	79	С	54	43	0.80
6	Сэбина (Sabine)	78	В	13	10	0.77
7	Орвина (Orvin)	80	СВ	31	23	0.74
8	Олава V (Olav V)	79	В	14	10	0.71
9	Джеймса I (James I)	79	З	6	4	0.67
10	Альберта I (Albert I)	79	С	39	25	0.64
11	Торелла (Torell)	77	Ю	17	9	0.53
12	Диксона (Dickson)	79	Центр	19	10	0.53
13	Оскара II (Oscar II)	79	З	42	21	0.50
14	Хокона VII (Haakon VII)	79	С	35	17	0.49
15	Принца Карла (Prins Karls)	78	З	18	6	0.33
16	Бюнсова (Bunsow)	79	Центр	3	1	0.33
17	Норденшельд (Nordenskiöld)	78	Центр	57	19	0.33
18	Эдж (Edgeöya)	78	В	68	17	0.25
19	Веделя Ярлсберга (Wedel Jarlsberg)	77	Ю	57	13	0.23
20	Хир (Heer)	78	В	19	4	0.21
21	Баренца (Barentsoya)	78	В	20	4	0.20
22	Андрэ (Andree)	79	С	6	1	0.17
23	Сёркапп (Sorkapp)	77	Ю	28	3	0.11
24	Наторст (Nathorst)	78	Ю	13	1	0.08
25	Харальда V (Harald V)	79	СВ	0	0	0.00

ковые озера обнаруживаются на архипелаге повсеместно. В южной и западной частях архипелага преобладают озера, уже сформировавшиеся на моренах и не имеющие контакта с ледниками. На западном побережье архипелага и в районе Исфьорда сокращение ледников было отмечено во второй половине XX в. [Гляциология..., 1985] и происходило наиболее масштабно [Pfeffer et al., 2014]. На севере и северо-востоке архипелага преобладают озера с ледяными берегами (см. рис. 1). По-видимому, сокращение ледников началось на севере позже, чем на юге.

Сравнительно мало приледниковых озер находится в центральной области архипелага, где распространено горное оледенение. Здесь также отмечено значительное сокращение горных ледников. На Земле Андрэ (центральная часть) встречаются приледниковые озера небольших размеров, максимальной длиной до 350 м. Это может быть связано с тем, что узкие горные долины на Земле Андрэ и сложный рельеф моренных комплексов препятствуют образованию крупных озерных котловин. На восточном побережье Шпицбергена значительные территории заняты выводными ледниками. Озера расположены в основном на боко-

вых моренах, часто встречаются озера с ледяными берегами. Значительное количество озер находится на о. Эдж и в краевой части покровного оледенения о. Северо-Восточная Земля.

Общее распределение приледниковых озер по землям архипелага представлено в табл. 1. В соответствии с административным делением земель распространение приледниковых озер не отражает общей пространственной картины. Это связано с различиями в характере рельефа, площадью, занятой оледенением, и собственно размерами земель. Тем не менее доля озер с ледяными берегами (см. табл. 1) уменьшается с севера, северо-востока на юг, юго-запад (рис. 2). На северных, северо-восточных, восточных территориях, где климат более суровый, доля озер с ледяными берегами превышает 74 %, в центре архипелага составляет около половины, на западе и юге – менее 50 %. Отдельно выделяются своими показателями горные территории Земля Андрэ и Земля Торелла, где наблюдается небольшое количество озер, что обусловлено сложным горным рельефом.

Высотный диапазон распространения приледниковых озер на архипелаге очень широк – от 1 до 840 м. Однако три четверти озер лежат ниже

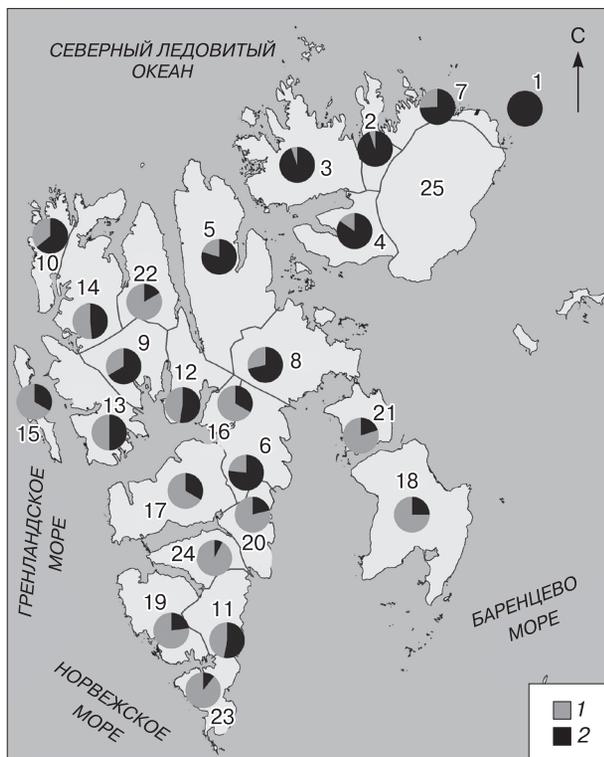


Рис. 2. Соотношения сформированных приледниковых озер (1) и озер с ледяными берегами (2).

Цифры – номера земель в соответствии с табл. 1.

200 м над ур. моря. Средний высотный уровень всех озер 127 м, среди них средний уровень озер с ледяными берегами несколько выше и равен 175 м. На рис. 3 приведена диаграмма, которая отражает высотное распределение приледниковых озер в пяти равных диапазонах высот. Очевидно, что с высотой количество приледниковых озер уменьшается, а доля озер с ледяными берегами постепенно увеличивается. При этом количество озер с ледяными берегами распространено сравнительно равномерно в пределах высоты 500 м (см. рис. 3).

По-видимому, длительное сокращение оледенения на архипелаге проявляется во всем высотном диапазоне, что отчетливо отражается в процессе формирования новых озер. В некотором смысле диаграмма иллюстрирует текущий момент экспансии озер на Шпицбергене – процесс идет к завершению на низких гипсометрических уровнях и развивается на более высоких уровнях. В целом по архипелагу процесс формирования новых озер далек от завершения, лишь около половины всех озер (51 %) сформировались окончательно и потеряли контакт с ледниками.

Среди учтенных 629 озер, протяженность которых превышает 100 м, около 13 % (87 озер) име-

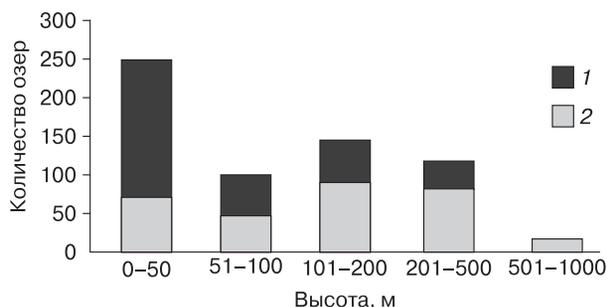


Рис. 3. Диаграмма распределения озер по высотным диапазонам.

1 – приледниковые озера; 2 – озера с ледяными берегами.

ют максимальную длину более 1 км. Средняя высота этих озер лежит на отметке 97 м. Эти два показателя (длина более 1 км и высотное положение) указывают на потенциал приледниковых озер для организации временных взлетно-посадочных полос и проектирования гидротехнических сооружений. Около 5 % (35 озер) на архипелаге имеют площадь более 1 км², и они сравнительно равномерно расположены в диапазоне от 1 до 250 м. Характеристики крупнейших приледниковых озер архипелага даны в табл. 2. Их расположение связано с обширными пологими пространствами около краевой части покровного оледенения и с широкими долинами, выработанными выводными ледниками в прошлом. Также несколько крупных озер образовалось в боковых долинах, подпруженных ледниками.

На общий характер формообразования приледниковых озер указывает корреляция между максимальной длиной озер и их площадью. Построение взаимосвязи между этими величинами показывает возникновение устойчивой зависимости по мере включения озер все больших размеров в массив данных. Небольшая корреляция этих величин характерна для озер малых размеров, длиной менее 200 м (табл. 3). Озера, длина которых не превышает 500 м, составляют около двух третей всего количества. Здесь возникает значимая статистическая взаимосвязь длин и площадей, величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.76$. Для всего массива данных точность аппроксимации улучшается, и величина R^2 достигает 0.93 (см. рис. 3).

Взаимосвязь максимальной длины (L) и площади (S) в логарифмическом масштабе показана на рис. 4 и приближенно описывается непрерывной степенной функцией:

$$L = b(S)^a, \text{ где } a = 0.5, b = 1.8. \quad (1)$$

Массив точек ограничен в нижней части подобной функцией с коэффициентом $b = 1.4$. Линия тренда фактически совпадает с зависимостью (1).

Таблица 2. Крупнейшие приледниковые озера архипелага Шпицберген

Озеро	Ледник в бассейне озера	Земля	Координаты центра озера	Высота, м	Площадь озера S , км ²	Максимальная длина L , м	Протяженность ледового берега, м
Требре (Trebrevatnet)	Морабрин (Morabreen)	Джеймса I (James I)	78.82506° с.ш., 14.43698° в.д.	17	17.31	8640	4760
Ганд (Gandvatnet)	Гандбрин (Gandbreen)	Эдж (Edgeoya)	77.71357° с.ш., 22.81509° в.д.	15	9.85	7680	7220
Брене (Brånevattet)	Этонбрин (Etonbreen)	Густава Адольфа (Gustav Adolf)	79.78787° с.ш., 22.00294° в.д.	10	8.83	5230	5420
Фемилсджен (Femilsjøen)	Лонгстафбрин (Longstaffbreen)	Нью-Фрисланд (Ny-Fries)	79.78611° с.ш., 15.87055° в.д.	27	7.58	7630	1010
Без названия	Аменфонна (Amenfonna)	Густава V (Gustav V)	79.89795° с.ш., 22.04735° в.д.	246	6.42	5650	1140
Йедерин (Jæderinvatnet)	Вонбрин (Vonbreen)	Хокона VII (Haakon VII)	79.25511° с.ш., 13.81527° в.д.	9	5.85	3950	1493
Без названия	Эйдембрин (Eidembreen)	Оскара II (Oscar II)	78.37686° с.ш., 12.84774° в.д.	2	5.17	5660	3920
Флайджен (Flysjøen)	Аустфонна (Austfonna)	Принца Оскара (Prins Oscars)	79.81992° с.ш., 22.36555° в.д.	141	4.96	4340	5370
Венесджен (Venesjøen)	Аустфонна (Austfonna)	Принца Оскара (Prins Oscars)	79.86286° с.ш., 22.64040° в.д.	244	3.75	3020	3240
Без названия	Хочстеттербрин (Hochstetterbreen)	Олава V (Olav V)	78.88028° с.ш., 20.77939° в.д.	23	3.48	3190	1230

Полученная зависимость указывает на общий характер формообразования котловин приледниковых озер, что важно при ограниченном количестве сведений о промерах глубин озер. Для оценки общего объема приледниковых озер на основе полевых гидрологических исследований приледниковых озер в окрестности залива Грэнфьорд была получена величина A как отношение средней глубины озера к его максимальной длине. Величина A варьировала от 0.010 для небольших озер до 0.021 для крупных. Одно из крупных озер этого района – оз. Бретьерна (Bretjørna), имеет максимальные длину 2280 м и глубину 28 м. Средняя глубина озера составляет 13.8 м. Максимальная глубина многочисленных небольших озер, которые встре-

чаются на моренах ледников в бассейне залива, составляет 4–5 м.

Принимая во внимание общий характер формообразования, используем величину A для оценки средней глубины озер:

$$h = AL + h_0, \quad (2)$$

где $A = 0.021$; L – максимальная длина озера; h_0 – минимальная средняя глубина.

Вид зависимости принят в соответствии с исследованием приледниковых озер в Альпах С. Кука и Д. Квинси [Cook, Quincey, 2015]. Авторами принято допущение, что в гляциальном ландшафте минимальная средняя глубина озера h_0 составляет 1.2 м. Эта величина соответствует глубинам в

Таблица 3. Значение коэффициентов в уравнении (1) в зависимости от количества рассматриваемых озер

Диапазон макс. длины, м	Количество озер	Доля озер от общего кол-ва	Коэффициенты в уравнении (1)		Достоверная аппроксимация R^2
			a	b	
100–200	152	0.24	0.30	10.5	0.53
100–500	429	0.68	0.44	3.4	0.76
100–1000	534	0.85	0.47	2.6	0.85
100–1500	572	0.91	0.49	2.2	0.88
100–2000	592	0.94	0.49	2.0	0.89
100–2500	604	0.96	0.49	1.9	0.90
100–3000	612	0.97	0.50	1.8	0.91
100–4000	619	0.98	0.50	1.8	0.92
100–9000	629	1.00	0.50	1.8	0.93

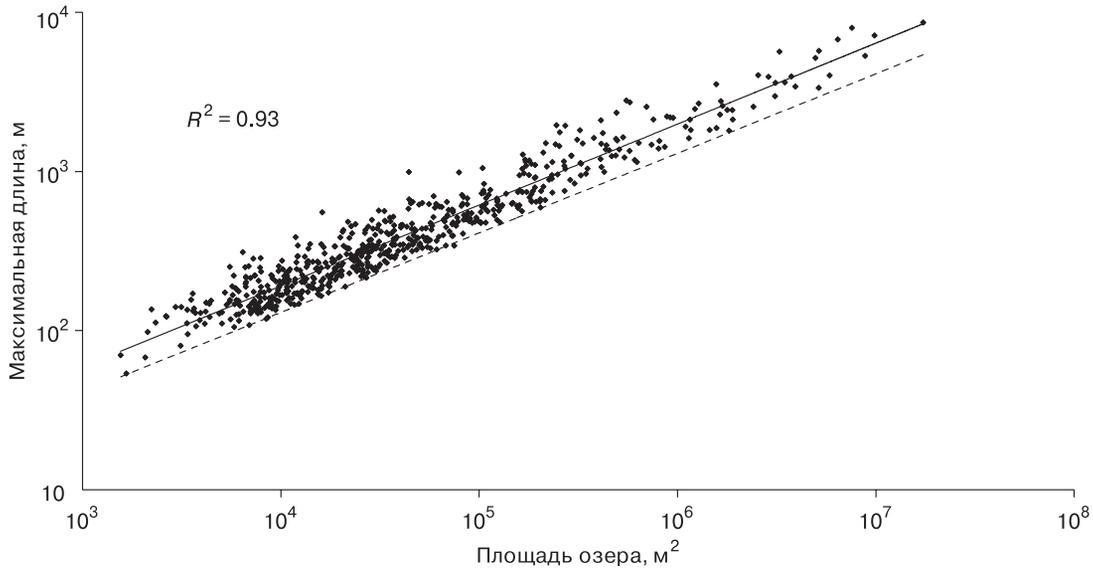


Рис. 4. Соотношение максимальной длины озер и их площади.

Точки – озера; сплошная – линия тренда всего массива точек, зависимость (1); штриховая – нижняя огибающая линия массива точек.

малых озерах-проталинах и соотносится с глубиной оттаивания пород в летний период. Зависимость (2) удовлетворяет данным полевых наблюдений для озер различного масштаба. Для крупных озер средняя глубина, как функция длины

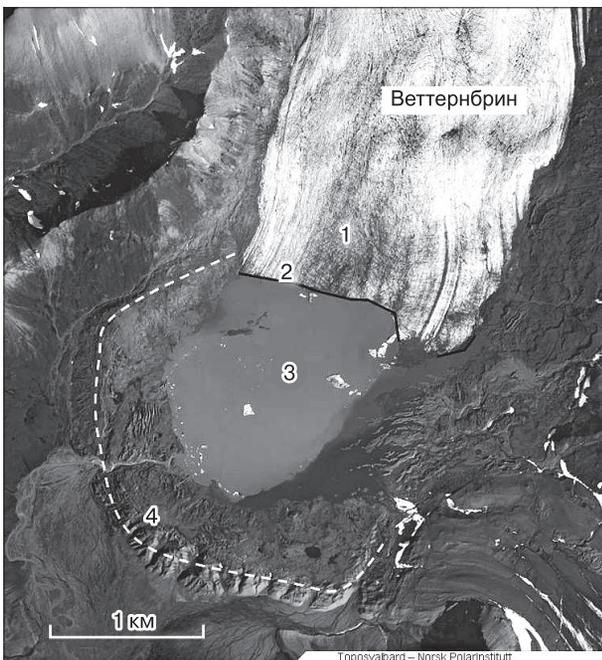


Рис. 5. Приледниковое озеро ледника Веттернбрин (Западный Шпицберген).

1 – ледник; 2 – фронт ледника; 3 – озеро; 4 – конечная морена.

озера, начинает принимать нереалистичные значения, поэтому она ограничена значением 15 м. Тогда объем каждого озера равен произведению площади озера на его среднюю глубину. Суммируя все объемы и учитывая допущения, получим оценку объема воды, заключенного в озерах архипелага. Общий объем воды в озерах составляет $(2.1 \pm 0.1) \text{ км}^3$. Для всей совокупности озер средняя глубина оказалась равной 12.5 м, что вполне правдоподобно соотносится с перепадом высот на моренно-грядовом рельефе.

В то же время при реалистичных оценках с учетом особенностей ландшафта (глубины вреза русел рек, перепад высот гряд и т. п.) минимальная глубина озер h_0 достигает 4.5 м. Тогда, согласно расчету по формуле (2), общий объем озер несколько увеличивается и становится равным $(2.3 \pm 0.1) \text{ км}^3$. Более весомый вклад в оценки объема имеет предельная величина средней глубины, которая в нашем случае составляет 15 м.

Особенностью современного состояния приледниковых озер является то, что они могут длительно находиться в стадии формирования и изменять конфигурацию, пока имеют контакт с ледником и массивами мертвых льдов. Поэтому для северных и северо-восточных территорий в настоящем и будущем возможна значительная пространственная изменчивость их границ. В целом было выделено 306 озер, имеющих ледяные берега. На основе электронных карт измерены длины ледяных берегов. Пример определения границ фронта ледника на контакте с озером приведен на рис. 5. Приледниковое озеро расположено перед

ледником Веттернбрин (Vetternbreen, Oskar II). Ледяной фронт имеет два участка на контакте с озером. Озеро формируется в котловине, образованной ледником и его конечной мореной.

По состоянию на 2008–2019 гг. общая протяженность ледяных берегов в приледниковых озерах архипелага равна (233.8 ± 0.6) км, что сопоставимо с длиной фронтов выводных ледников Шпицбергена, которая составляет около 740 км [Nuth et al., 2013]. По оценкам [Nuth et al., 2010; Martín-Español et al., 2015], ежегодно около 10 км^3 льда сбрасывается в море выводными ледниками Шпицбергена. Количество льда, стаивающего в приледниковых озерах, оценить трудно, так как скорость движения и толщина льда на фронтах ледников различны. По оценкам авторов на основе полевых измерений скорости движения льда и толщины льда в краевых частях ледников Восточный Грэнфьорд и Альдегонда [Чернов и др., 2019а], ежегодная абляция ледниковых фронтов в озерах дает величину не более 0.01 км^3 , т. е. несопоставимо меньше потерь льда за счет айсбергового стока выводных ледников.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поиск и картирование новых приледниковых озер выявили их повсеместное распространение на архипелаге (см. рис. 1). Большинство приледниковых озер расположено недалеко от побережья, так как многие выводные ледники в настоящее время отступили и оканчиваются на суше. Это особенно характерно для западной и северо-восточной частей архипелага, где распространено полупокровное и покровное оледенение. В области горного оледенения архипелага приледниковые озера распределены на территории сравнительно равномерно, за исключением Земли Принца Карла, где ледники сгруппированы лишь в восточной части острова.

Процесс формирования приледниковых озер в современный период указывает на климатические различия южных и северных областей Шпицбергена. На основе полученных сведений следует выделить северные и восточные территории архипелага как зону активного образования озер (см. табл. 1). Количественные оценки доли озер с ледяными берегами являются важной информацией для описания текущего состояния процесса экспансии озер. В настоящее время скорость отступления фронтов ледников Шпицбергена изменяется от первых десятков метров в год до 100 м и более. Так как наши статистические оценки дают средний размер озера 600 м, то величина отступления ледников за десятилетие сопоставима с размерами объекта исследования. Поэтому надо ожидать значительной изменчивости приледниковых озер в короткие периоды времени. Это указывает на возможность оценки изменений климата на Шпиц-

бергене в целом и по отдельным районам на основе сопоставления информации о состоянии приледниковых озер в различные моменты времени. В отличие от ледников, важно сравнивать статистические данные по озерам, так как отдельные водные объекты могут видоизменяться случайным образом. Выявлено, что за период около 80 лет на архипелаге появилось 629 новых озер протяженностью более 100 м. Количество небольших приледниковых озер может быть более 500, но они не учитывались в исследовании. Следует предположить, что динамика появления новых озер различается в разных частях архипелага. Так, при сопоставлении разновременной аэрофотосъемки было проведено сравнение групп озер, расположенных в центральной части Шпицбергена на Земле Харальда V. По состоянию на 1993 и 2008 гг. число озер уменьшилось приблизительно на 20 %, при этом их конфигурация и площадь также изменились. Наиболее вероятно, что такие изменения связаны с таянием мертвых льдов в морене и изменением русел ледниковых рек в районе, которые приводят к разрушению и размыву морен. По-видимому, этот пример является частным случаем изменчивости приледниковых озер в ходе общей экспансии озер на архипелаге. Тем не менее можно предположить, что количество озер будет уменьшаться в тех районах, где ледники длительно сокращаются и таяние мертвых льдов продолжается несколько десятилетий.

На основе полученных сведений о приледниковых озерах и ледяных берегах в будущем возможно делать сравнительные оценки климатических изменений как по архипелагу в целом, так и отдельно по землям.

ВЫВОДЫ

В связи с современным потеплением климата на Шпицбергене и сокращением оледенения на территории, освободившейся от ледников, образовались многочисленные озера. На основе дистанционных методов было выявлено 629 приледниковых озер, максимальная длина которых превышает 100 м. Они занимают естественные котловины моренно-грядового рельефа перед фронтом ледника или образуются за счет подпруживания боковой мореной или самими ледниками. Около трети всех озер имеют длину свыше 500 м, а средняя максимальная длина озер составляет 600.5 м.

Величина площади приледниковых озер лежит в широких пределах – от 0.002 до 17.34 км^2 . Среднее значение равно 0.27 км^2 , а общая площадь выявленных озер составляет $(173.1 \pm 0.7) \text{ км}^2$. Наибольшее количество приледниковых озер было обнаружено в южной и западной частях Шпицбергена, где сокращение площади ледников было особенно масштабным. При этом наиболее крупные озера отмечены на северных территориях

на периферии покровного оледенения, где гляциальный рельеф прилегающих территорий менее расчленен. В центральной части Шпицбергена, в области горного оледенения, количество озер оказалось наименьшим.

Процесс формирования приледниковых озер на Шпицбергене продолжается в настоящее время, около половины озер имеют ледяные берега. Они сравнительно равномерно расположены в высотном диапазоне от 1 до 500 м, что указывает на развитие процесса на всех высотных уровнях. Подавляющее количество таких озер отмечено на северных и восточных территориях архипелага, где климат более суровый и сокращение ледников началось сравнительно недавно. Сейчас общая протяженность ледяных берегов приледниковых озер архипелага составляет (233.8 ± 0.6) км, что сопоставимо с протяженностью фронтов выводных ледников архипелага, спускающихся в море.

Через соотношение максимальных длин и площадей озер выявлен общий признак формообразования, который связан с гляциальным рельефом, что позволило провести оценку их суммарного объема. Объем приледниковых озер оценен в диапазоне от 2.1 до (2.3 ± 0.1) км³.

Благодарности. Разработка методик и анализ данных выполнены в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004) “Оледенение и сопутствующие природные процессы при изменениях климата”.

Литература

Гляциология Шпицбергена / Под ред. В.М. Котлякова. М., Наука, 1985, 200 с.

Гросвальд М.Г., Корякин В.С. Прорывы ледниково-подрудных озер в советской Арктике // Материалы гляциол. исслед., 1962, вып. 6, с. 130–133.

Кокин О.В., Кириллова А.В. Реконструкция динамики ледника Грэнфьорд (Западный Шпицберген) в голоцене // Лед и снег, 2017, № 57 (2), с. 241–252.

Рянжин С.В., Субетто Д.А., Кочков Н.В. и др. Полярные озера Мира: современные данные и состояние исследований // Водн. ресурсы, 2010, т. 37, № 4, с. 387–397.

Троицкий Л.С. О влиянии структуры ледников на формирование холмисто-грядового моренного рельефа на Шпицбергене // Материалы гляциол. исслед. Хроника, обсуждения, 1970, вып. 16, с. 178–183.

Троицкий Л.С. Оледенение Шпицбергена (Свальбарда) / Л.С. Троицкий, К.М. Зингер, В.С. Корякин и др. М., Наука, 1975, 276 с.

Чернов Р.А., Кудиков А.В., Вшивцева Т.В., Осокин Н.И. Оценка поверхностной абляции и баланса массы ледника Восточный Грэнфьорд (Западный Шпицберген) // Лед и снег, 2019а, № 59 (1), с. 59–66.

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.

Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Природная катастрофа ледниково-подрудного озера Спартаковское на острове Большевик (Северная Земля) // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 4, с. 58–68.

Чернов Р.А., Муравьев А.Я., Тополева Л.Н. Современное сокращение горного оледенения Земли Принца Карла (архипелаг Шпицберген) // Криосфера Земли, 2019б, т. XXIII, № 5, с. 73–81.

Błaszczyk M., Jania J., Hagen J. Tidewater glaciers of Svalbard: Recent changes and estimates of calving fluxes // Polish Polar Res., 2009, No. 30 (2), p. 85–142.

Carrivick J., Fiona S.T. A review of glacier outburst floods in Iceland and Greenland with a megafloods perspective // Earth-Science Rev., 2019, No. 196, p. 102876.

Carrivick J., Tweed F. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods // Glob. Planet Change, 2016, No. 144, p. 1–16.

Cook S., Quincey D. Estimating the volume of Alpine glacial lakes // Earth Surf Dyn, 2015, No. 3, p. 559–575.

Hagen J., Liestøl O., Roland E. et al. Glacier Atlas of Svalbard and Jan Mayen // Norsk Polarinstittut Meddelelser, 1993, No. 129, p. 1–141.

Hambrey M. Sudden draining of ice-dammed lakes in Spitsbergen // Polar Record, 1984, No. 22 (137), p. 189–194.

Harrison S., Kargel J., Huggel C. et al. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods // The Cryosphere, 2018, vol. 12, p. 1195–1209.

Liestøl O. Setervatnet, a glacier dammed lake in Spitsbergen // Arbok Norsk Polarinstittut, 1977, No. 1975, p. 31–35.

Liestøl O., Repp K., Wold B. Supra-glacial lakes in Spitsbergen // Nor. Geogr. Tidsskr., 1980, No. 34 (2), p. 89–92.

Luthje M., Pedersen L., Reeh N., Greuell W. Modelling the evolution of supraglacial lakes on the West Greenland ice-sheet margin // J. Glaciol., 2006, No. 52, p. 608–618.

Mangerud J., Bolstad M., Elgersma A. et al. The last glacial maximum on western Svalbard // Quatern. Res., 1992, No. 38, p. 1–31.

Martín-Español A., Navarro F.J., Otero J. et al. Estimate of the total volume of Svalbard glaciers, and their potential contribution to sea-level rise, using new regionally based scaling relationships // J. Glaciol., 2015, No. 61, p. 29–41.

Mool P.K., Bajracharya S.R., Joshi S.P. Inventory of glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods: monitoring and early warning systems in the Hindu Kush-Himalayan region. Nepal, Kathmandu, ICIMOD, 2001, 254 p.

Nie Y., Qiao L., Jida W. et al. An inventory of historical glacial lake outburst floods in the Himalayas based on remote sensing observations and geomorphological analysis // Geomorphology, 2018, No. 308, p. 91–106.

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., Moholdt G., Kohler J. et al. Svalbard glacier elevation changes and contribution to sea level rise // J. Geophys. Res., 2010, vol. 115, p. F01008.

Pfeffer W., Arendt A., Bliss A., Bolch T. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers // J. Glaciol., 2014, No. 60 (221), p. 537–552.

Strozzini T., Wiesmann A., Käb A. et al. Glacial lake mapping with very high resolution satellite SAR data // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2012, No. 12, p. 2487–2498.

Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I. et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century // J. Glaciol., 2015, No. 61, p. 745–762.

URL: <http://www.npolar.no/> – норвежский полярный институт. – http://toposvalbard.npolar.no/_Kart_over_Svalbard (дата обращения: 01.08.2020).

URL: http://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf (дата обращения: 01.10.2021).

References

- Kotlyakov V.M. (Ed.). Glyatsiologiya Shpitsbergena [Glaciology of Spitsbergen]. Moscow, Nauka, 1985, 200 p. (in Russian).
- Grosvald M.G., Koryakin V.S. Outbursts of glacial lakes in the Soviet Arctic. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy* [Materials of Glaciological Research], 1962, No. 6, p. 130–133 (in Russian).
- Kokin O.V., Kirillova A.V. Reconstruction of the dynamics of the Grönfjord glacier (Spitsbergen) in the Holocene. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2017, No. 57 (2), p. 241–252 (in Russian).
- Ryanzhin S.V., Subetto D.A., Kochkov N.V. et al. Polar Lakes of the World: Current Data and Status of Investigations. *Water Resources*, 2010, vol. 37, No. 4, p. 427–436, doi.org/10.1134/S0097807810040019.
- Troitsky L.S. On the influence of the structure of glaciers on the formation of hilly-ridge moraine relief in Spitsbergen. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy* [Materials of Glaciological Research], 1970, vol. 16, p. 178–183 (in Russian).
- Troitsky L.S., Zinger E.M., Koryakin V.S., Markin V.A., Mikhailov V.I. The Glaciation of Spitsbergen (Svalbard). Moscow, Nauka, 1975, 275 p. (in Russian).
- Chernov R.A., Kudikov A.V., Vshivtseva T.V., Osokin N.I. Estimation of the surface ablation and mass balance of Eustre Grönfjordbreen (Spitsbergen). *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2019, No. 59 (1), p. 59–66 (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).
- Chernov R.A., Muraviev A.Ya. Catastrophic outburst-flood of the Spartakovskoye glacier-dammed lake on the Bolshevik Island (Severnaya Zemlya). *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. XXIV, No. 4, p. 50–59.
- Chernov R.A., Muraviev A.Ya., Topoleva A.N. Degradation of the mountain glaciation of Prins Karls Forland (Svalbard). *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, No. 5, p. 62–69.
- Błaszczak M., Jania J., Hagen J. Tidewater glaciers of Svalbard: Recent changes and estimates of calving fluxes. *Polish Polar Research*, 2009, No. 30 (2), p. 85–142.
- Carrivick J., Fiona S.T. A review of glacier outburst floods in Iceland and Greenland with a megafloods perspective. *Earth-Science Reviews*, 2019, No. 196, p. 102876.
- Carrivick J., Tweed F. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Glob. Planet Change*, 2016, No. 144, p. 1–16, doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.001.
- Cook S., Quincey D. Estimating the volume of Alpine glacial lakes. *Earth Surf Dyn*, 2015, No. 3, p. 559–575, doi.org/10.5194/esurf-3-559-2015.
- Hagen J., Liestøl O., Roland E. et al. Glacier Atlas of Svalbard and Jan Mayen. Norsk Polarinstitutt Meddelelser, 1993, No. 129, p. 1–141.
- Hambrey M. Sudden draining of ice-dammed lakes in Spitsbergen. *Polar Record*, 1984, No. 22 (137), p. 189–194, doi.org/10.1017/S0032247400005143.
- Harrison S., Kargel J., Huggel C. et al. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, 2018, vol. 12, p. 1195–1209, doi.org/10.5194/tc12-1195-2018.
- Liestøl O. Setervatnet, a glacier dammed lake in Spitsbergen. *Arbok Norsk Polarinstitutt*, 1977, No. 1975, p. 31–35.
- Liestøl O., Repp K., Wold B. Supra-glacial lakes in Spitsbergen. *Nor. Geogr. Tidsskr.*, 1980, No. 34 (2), p. 89–92.
- Luthje M., Pedersen L., Reeh N., Greuell W. Modelling the evolution of supraglacial lakes on the West Greenland ice-sheet margin. *J. Glaciol.*, 2006, No. 52, p. 608–618.
- Mangerud J., Bolstad M., Elgersma A. et al. The last glacial maximum on western Svalbard. *Quaternary Research*, 1992, No. 38, p. 1–31.
- Martín-Español A., Navarro F.J., Otero J. et al. Estimate of the total volume of Svalbard glaciers, and their potential contribution to sea-level rise, using new regionally based scaling relationships. *J. Glaciol.*, 2015, No. 61, p. 29–41, doi.org/10.3189/2015JG14J159.
- Mool P.K., Bajracharya S.R., Joshi S.P. Inventory of glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods: monitoring and early warning systems in the Hindu Kush-Himalayan region. Nepal, Kathmandu, International Centre for Integrated Mountain Development, ICIMOD, 2001, 254 p.
- Nie Y., Qiao L., Jida W. et al. An inventory of historical glacial lake outburst floods in the Himalayas based on remote sensing observations and geomorphological analysis. *Geomorphology*, 2018, No. 308, p. 91–106.
- 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., Moholdt G., Kohler J. et al. Svalbard glacier elevation changes and contribution to sea level rise. *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115, p. F01008, DOI: 10.1029/2008JF001223.
- Pfeffer W., Arendt A., Bliss A., Bolch T. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *J. Glaciol.*, 2014, No. 60 (221), p. 537–552.
- Strozzi T., Wiesmann A., Kääb A., Joshi S., Mool P. Glacial lake mapping with very high resolution satellite SAR data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2012, No. 12, p. 2487–2498, doi.org/10.5194/nhess-12-2487-2012, 2012.
- Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I. et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *J. Glaciol.*, 2015, No. 61, p. 745–762, doi.org/10.3189/2015JG15J017.
- URL:** <http://www.npolar.no/> - норвежский полярный институт. – http://toposvalbard.npolar.no/_Kart_over_Svalbard (last visited: 01.08.2020).
- URL:** http://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf (last visited: 01.10.2021).

*Поступила в редакцию 23 апреля 2021 г.,
после доработки – 26 сентября 2021 г.,
принята к публикации 7 января 2022 г.*