

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-157-170>
УДК 556.557+551.324.63



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Методика инвентаризации приледниковых озер архипелага Шпицберген

К.В. Ромашова^{1*}, Р.А. Чернов²

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

² — Институт географии РАН, Москва, Россия

*hydrology2@ari.ru

Резюме

На основе картографических материалов Норвежского полярного института предложена методика поиска и инвентаризации приледниковых озер архипелага Шпицберген. Их формирование обусловлено дегляциацией, продолжающейся с начала XX в. Инвентаризация приледниковых озер архипелага позволяет фиксировать их текущие морфометрические характеристики для исследования климатических изменений в будущем.

По состоянию на 2008–2012 гг. на архипелаге выявлено 705 приледниковых озер. Их распространение охватывает все области архипелага, где отмечено отступление ледников. В юго-западной (ЮЗ) и северо-западной (СЗ) частях архипелага в области горного оледенения большинство приледниковых озер сгруппировано на моренах горно-долинных ледников близ побережья. В восточной (В) части архипелага приледниковые озера рассредоточены вдоль границ покровного оледенения, и большинство из них имеют контакт с ледником. Согласно предложенным признакам местоположения и условию подпруживания ледником или мореной, было выделено 5 типов озер. Описание типов и средние характеристики приледниковых озер представлены для трех климатических районов Шпицбергена (В, СЗ, ЮЗ). Практически равное количество озер с формирующимися (ледяными) и уже сформированными берегами указывает на активную фазу процесса распространения и увеличения площади приледниковых озер на архипелаге.

Ключевые слова: дистанционные методы, озерность, тип приледникового озера, Шпицберген.

Для цитирования: Ромашова К.В., Чернов Р.А. Методика инвентаризации приледниковых озер архипелага Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 2. С. 157–170. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-157-170>.

Поступила 21.02.2023

После переработки 11.05.2023

Принята 15.05.2023

Inventory methodology of periglacial lakes in Spitzbergen (Svalbard)

Kseniia V. Romashova^{1*}, Robert A. Chernov²

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² — Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*hydrology2@aari.ru

Summary

The paper discusses periglacial lakes, which were formed after the Little Ice Age due to the reduction of Spitzbergen (Svalbard) glaciation. A method for inventorying the periglacial lakes in Spitzbergen (Svalbard) is proposed based on the Norwegian Polar Institute cartographic materials and remote sensing methods. Such lakes have been formed due to deglaciation in Svalbard since the beginning of the 20th century after the Little Ice Age. Three morphological features of the periglacial lake were used as selection criteria: the lake is in contact with the glacier, the lake is located within the terminal moraine or borders on it, each of which is sufficient.

As a result of the inventory, 705 periglacial lakes have been found in Spitzbergen (Svalbard). The largest number of lakes is located in the northeastern part of the archipelago, where the relief is poorly dissected. The largest clusters of lakes are found on the moraines of mountain-valley glaciers located on the warmer western coasts. The periglacial lakes were divided into 5 types: glacier-dammed lakes (19%), lakes in contact with the glacier front (30%), thermokarst lakes on the moraine (27%), moraine-dammed lakes (15%) and lakes in contact with the terminal moraine (9%). The most numerous were periglacial lakes adjoining the glacier (about 50%). Their total area is 162 km² and accounts for 87% of the total area of all periglacial lakes. The other half of the lakes have formed shores, and their transformation is likely to be much slower in the future. The quantitative ratio of lake types testifies to the active phase of the process of lake expansion in the archipelago. This ratio of lakes by groups can be a clear indicator of climate change in the archipelago.

Keywords: lake percentage, remote methods, Spitzbergen (Svalbard), type of periglacial lake.

For citation: Romashova K.V., Chernov R.A. Inventory methodology of periglacial lakes in Spitzbergen (Svalbard). *Arctic and Antarctic Research*. 2023, 69 (2): 157–170. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-157-170>.

Received 21.02.2023

Revised 11.05.2023

Accepted 15.05.2023

ВВЕДЕНИЕ

Последнее оледенение на Шпицбергене закончилось быстрой дегляциацией приблизительно 10000 лет назад [1]. Климат раннего голоцена был значительно мягче, и ледники Шпицбергена, вероятно, были меньше, чем в настоящее время [2]. Во время так называемого Малого ледникового периода ледники значительно расширились, их максимум относится к началу XX в. В связи с потеплением климата в XX в. ледники Шпицбергена стали снова отступать от исторического максимума, что явилось причиной появления новых приледниковых озер. В настоящее время на Шпицбергене наблюдается стремительное сокращение оледенения [3, 4], которое приводит к увеличению количества приледниковых озер.

Приледниковые озера вызывают более интенсивную абляцию горных ледников и окраин ледяных щитов при контакте с ними. На архипелаге многочисленны ледниково-подпрудные озера, которые могут вызывать значительные паводки в случаях их прорывов. Взаимодействие ледниковых озер с ледниками рассматривалось на ледниковом щите Гренландии [6], Исландии [7] и Шпицбергене [8]. Достаточно подробно была выполнена инвентаризация приледниковых озер в Гималаях [9]. Основные

аспекты дистанционных исследований ледниковых озер отражены в многочисленных работах, например, картирование ледниковых озер Альп, Памира и Гималаев с помощью спутниковых данных [10] или картографирование арктических озер с использованием снимков Landsat [11]. Ранее при исследовании 165 случаев прорывов приледниковых озер в горных странах мира были рассмотрены общие принципы их формирования [5]. На Шпицбергене попытка оценить масштабы приледниковых озер предпринимается в настоящее время [12–14]. Принципы отбора приледниковых озер четко не определены, что вызывает разногласия при сопоставлении информации. Авторами на примере отдельного водосбора была оценена совокупность озер ледникового и термокарстового происхождения и среди них выделены приледниковые озера [15]. Была предпринята попытка оценить их количество на архипелаге в целом [12], результаты которой указывают на сравнительно равномерное распределение приледниковых озер, хотя климатические изменения на Шпицбергене заметно различаются. На западе архипелага сокращение площади ледников с начала XX в. превысило 50 % [16]. На севере и северо-востоке архипелага, где преобладает покровное оледенение, климат более суровый, среднегодовые температуры ниже на 3–5 °С в сравнении с западными и юго-западными территориями [17]. На фоне масштабности процесса сокращения оледенения до сих пор остается неизученным процесс увеличения количества и роста площади приледниковых озер. Фактически до сих пор неизвестны темпы и особенности формирования озер архипелага, их взаимосвязь с типом оледенения и рельефом. Формирование новых приледниковых озер является важным признаком потепления климата на архипелаге Шпицберген.

Вопрос имеет определенную практическую ценность: пресная вода в Арктике — необходимый ресурс при планировании всех видов хозяйственной деятельности. Озера, которые аккумулируют ледниковые и талые воды, являются естественными резервуарами чистой воды в течение всего года, что очень важно при продолжительности зимнего периода 8–9 месяцев в году. В последние десятилетия на Шпицбергене вода из озер ледникового происхождения используется для нужд арктических поселков. По нашим оценкам, на территории архипелага Шпицберген около 3900 озер различных типов: лагунные, термокарстовые, наледниковые и ледниковые.

Основной целью данной работы является создание методики поиска и инвентаризации приледниковых озер архипелага Шпицберген. Полученные результаты позволяют не только количественно оценить процесс распространения и увеличения приледниковых озер, но и рассматривать его как индикатор климатических изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В настоящей работе рассматриваются приледниковые озера, которые образовались в современный период дегляциации, который длится с начала XX в. Приледниковые озера имеют контакт с ледником при подпруживании самим ледником или его конечной мореной или контактируют с фронтом ледника, занимая котловину, выработанную ледником. Ряд приледниковых озер имели контакт с ледником в недавнем прошлом и в настоящее время расположены либо в пределах конечных морен, либо на границе с ними. Основу поиска и инвентаризации озер составляют материалы аэрофотосъемки Норвежского полярного института (НПИ), представленные в картографическом сервисе [18]. Они позволяют определить положение и характеристики озер в границах конечных морен, которые сформировались после Малого ледникового периода. Границы морен четко определяются для горного оле-

денения архипелага и в большинстве случаев для покровного оледенения, так как имеют условные обозначения на электронных картах или видимы на аэрофотосъемке.

В основе картирования лежит аэрофотосъемка 2008–2012 гг. с разрешением снимков 20–40 см. Привязка ортофотоснимков всего архипелага доступна в виде динамического сервиса [18]. Оцифровка изображений на момент обращения (09.01.2023) доступна для центральных и северных территорий архипелага в виде векторного набора данных [19], соответствующего картам масштаба 1:100000. Южные территории были оцифрованы авторами с использованием динамического сервиса с мозаикой ортофотоснимков в свободной геоинформационной системе QGIS. В отдельных случаях для определения исторического положения ледников использовался динамический сервис с мозаикой ортофотоснимков 1936–1938 гг.

Данные многолетних полевых наблюдений в бассейне залива Грэн-фьорд позволили сформулировать критерии отбора озер по размерам, местоположению относительно ледников и условиям подпруживания. Озера, максимальная длина которых составляет менее 100 м, нами не учитывались, так как они мелководны. На основе полевых измерений, выполненных авторами летом в 2021 и 2022 гг., были получены оценки глубин небольших озер с помощью эхолота. По измерению 28 озер их средняя глубина составила 0,7 м. Эта величина заметно меньше средней толщины озерного льда, которая достигает 1,5 м. Таким образом, небольшие озера на морене ледника полностью промерзают зимой и на протяжении большей части года представляют собой линзы преимущественно конжеляционного льда, расположенные в понижениях рельефа. В таком случае их трудно отнести к озерам. К тому же учет многочисленных моренных озер показывает, что их суммарный вклад в площадь всех озер ничтожно мал [15].

Пример выбора озер показан на рис. 1, где точками обозначены приледниковые озера, другие озера на фрагменте карты в рассмотрение не принимались, так как они лежат за пределами моренных комплексов или их длина менее 100 м.

Использование картографических материалов НПИ позволило определить набор пространственных характеристик, положенных в основу инвентаризации. Для

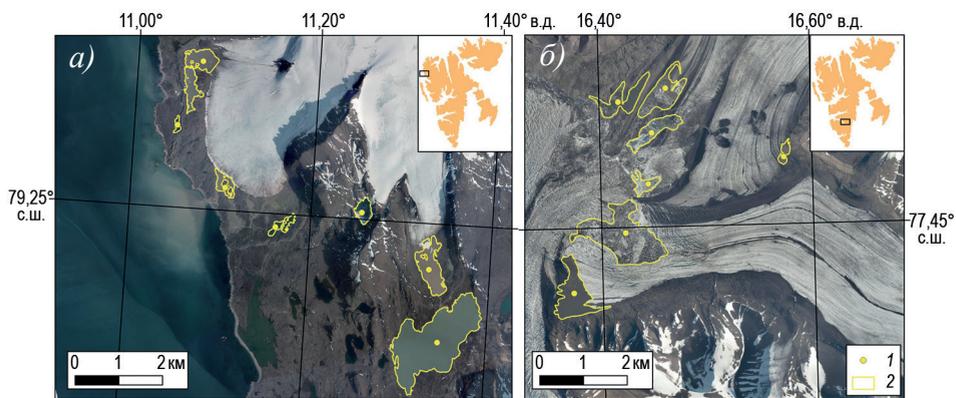


Рис. 1. Пример выбора приледниковых озер: а) озера на моренах; б) ледниково-подпрудные озера.

1 — центр приледникового озера; 2 — береговая линия приледникового озера

Fig. 1. Example of selecting periglacial lakes: а) lakes on moraines; б) ice-dammed lakes.

1 — center of the periglacial lake; 2 — periglacial lake shoreline

каждого озера фиксировались следующие характеристики: площадь, максимальная длина озера, высотное положение, протяженность ледяного берега, координаты центра озера. Центр озера устанавливался вручную и не является геометрическим, а лишь обозначает местоположение озера. Также были приняты к сведению название ближайшего ледника, название области в соответствии с территориальным делением архипелага. Территориально-земельное деление архипелага принято в соответствии с картографическим сервисом НПИ.

Измерения длины, площади озер и протяженности их ледяных берегов выполнены вручную посредством встроенных инструментов картографического сервиса [18], а также с использованием свободной географической информационной системы с открытым кодом QGIS.

Для определения максимальной протяженности озера при помощи ГИС каждый полигон разбивался на вершины и для каждого облака точек в пределах одного озера считалось расстояние между всеми точками, после чего выбирался максимум. Проверка определения длины озера выполнена на выборке из 20 озер, величина ошибки была в пределах 1–2 м. В работе сделано допущение о неучете случаев, когда озеро изогнуто и длина его посредством ГИС определяется частично по линии суши, а не по водной поверхности. Погрешность средней максимальной длины озер рассчитывалась как среднеквадратичная погрешность отрезков с точность определения каждого края отрезка 0,4 м в соответствии с заявленной точностью картографического сервиса.

Оценка площади озер выполнена с использованием открытого векторного набора картографических данных суши Шпицбергена, имеющего контент, соответствующий серии карт Шпицбергена масштаба 1:100000, и авторской оцифровки южных территорий архипелага с использованием динамического сервиса привязанных аэрофотоснимков 2008–2012 гг. [18].

Визуализация полученных объектов и работа с различными наборами изображений в целях самоконтроля выполнялись в картографическом сервисе [18] и геоинформационной системе QGIS.

Относительная погрешность площади каждого озера была принята равной 2 %. Эта величина была рассчитана для среднего по площади озера (в каждой группе) методом построения внутренней и внешней буферных зон шириной 1 м. Наши расчеты оказались сопоставимы с подобными оценками в работе [13].

Погрешность суммарной площади озер вычислялась как суммарная среднеквадратичная погрешность некоррелированных величин, т. е. погрешности площадей отдельных озер суммировались геометрически [20].

Данные о площади суши и площади оледенения по отдельным районам Шпицбергена получены также на основе картографических материалов Норвежского полярного института [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Наше исследование направлено на создание методики поиска и инвентаризации озер, сформированных в непосредственной близости от ледников архипелага в результате современного сокращения оледенения. При выборе приледниковых озер принималось во внимание их местоположение. Таким образом, выделены три группы озер: озера в непосредственном контакте с ледником, в пределах современных конечных морен или в контакте с границами конечных морен. При наличии хотя

бы одного признака озеро могло контактировать с ледником в период современной дегляциации. Применение трех достаточных признаков позволило эффективно провести поиск приледниковых озер, так как границы ледников и современных морен хорошо различимы на аэрофотосъемке и обозначены на электронных картах. В отдельных случаях при рассмотрении объектов на периферии покровного оледенения, где границы морен нечеткие, мы обращались к данным аэрофотосъемки НПИ 1936 г. Озера, удаленные от края ледника по состоянию на 1936 г., не рассматривались.

Следует отметить, что ледниково-подпрудные озера могут находиться в краевой части ледника, но при этом располагаться значительно выше его фронта. Поэтому рассматривалась вся площадь горного и горно-покровного оледенения.

Распределение приледниковых озер на территории архипелага показано на рис. 2. Сплошная линия указывает границы рассматриваемых климатических районов: северо-западный (СЗ), юго-западный (ЮЗ) и восточный (В). Деление архипелага на районы принято в соответствии с [17].

В результате отбора, используя предложенную методику по уточненным относительно предыдущей работы авторов [12] признакам, на архипелаге было определено

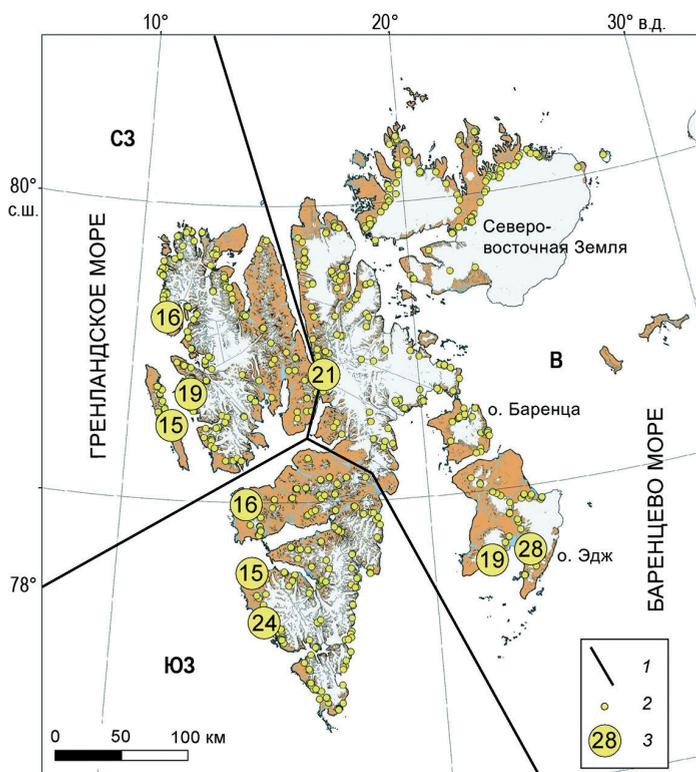


Рис. 2. Карта-схема приледниковых озер архипелага Шпицберген на 2008–2012 гг.

1 — границы районов [17]; 2 — отдельные приледниковые озера; 3 — скопление приледниковых озер (под условным обозначением) и их количество

Fig. 2. Map-scheme of the periglacial lakes on Spitzbergen (Svalbard) for 2008–2012.

1 — borders of regions [17]; 2 — individual periglacial lakes; 3 — accumulation of periglacial lakes (under the symbol) and their number

**Характеристики приледниковых озер и озерность территории
районов архипелага Шпицберген**

Table 1

**Characteristics of the periglacial lakes and periglacial lake percentage
in the regions of Spitzbergen (Svalbard)**

Часть архипелага	Количество озер (длиной более 100 м)	Количество озер с ледяными берегами	Средняя высота уреза воды, м	Суммарная площадь озер (2008–2012), км ²	Площадь, занятая ледниками, км ²	Площадь суши без ледников, км ²	Озерность по всей площади суши, %	Озерность без ледников, %
СЗ	184	79	103	51,71 ± 0,43	6 205	7 183	0,38	0,71
ЮЗ	221	77	124	32,89 ± 0,25	5 438	6 980	0,26	0,47
В	300	185	141	103,04 ± 0,32	22 132	10 700	0,31	0,96
Весь архипелаг	705	341	126	186,65 ± 0,34	33 775	24 863	0,32	0,75

705 приледниковых озер. Определение пространственных характеристик озер позволило оценить средние показатели по отдельным районам архипелага, отличающимся по климату и типу оледенения. Данные представлены в табл. 1.

На СЗ и ЮЗ распространено горное оледенение, а площади суши и ледников соизмеримы. Здесь количество озер с ледяными берегами практически одинаково. Доля озер, не имеющих контакта с ледниками, в полтора раза больше на юге, чем на севере, что указывает на климатические различия архипелага. При этом озера на севере крупнее, чем на юге, их средние площади равны 0,28 и 0,15 км² соответственно. Эти различия могут быть определены характером рельефа, так как на юге архипелага он более расчленен.

На востоке архипелага, где развито покровное оледенение, площадь суши без ледников в полтора раза больше, чем на ЮЗ или СЗ. Здесь на периферии оледенения расположено 300 приледниковых озер. Климатически этот район Шпицбергена заметно холоднее, кроме того, приледниковые озера здесь расположены несколько выше. Поэтому две трети озер имеют ледяные берега (см. табл. 1). Слаборасчлененный рельеф определяет наибольшие показатели средней площади озера — 0,34 км².

По оценке С.В. Рянжина [21], озерность полярной области Северного полушария составляет около 0,5 %. Озерность архипелага Шпицберген, с учетом площади приледниковых озер, оказалась в два-три раза выше. При этом приледниковые озера сосредоточены в узкой полосе, обрамляющей ледники. За последние полвека оледенение архипелага сократилось на величину около 2500 км² [4]. Значение озерности на новых территориях, освобожденных от ледников, составляет 7–8 %.

Расположение озер и условие их подпруживания позволили выделить 5 типов озер, принципиально отличающихся по своему пространственному положению: ледниково-подпрудные озера — ЛПО, контактирующие с ледниками озера — КЛЮ, моренно-подпрудные озера — МПО, термокарстовые озера на морене — ТМО и озера, контактирующие с конечной моренной, — КМО. Усредненные характеристики типов озер показаны в табл. 2.

Самым многочисленным типом оказались озера, контактирующие с ледниками. Вместе с ледниково-подпрудными озерами они составляют половину всех прилед-

**Тип и средние морфометрические характеристики
приледниковых озер архипелага Шпицберген**

Table 2

Type and average morphometric characteristics of the periglacial lake of Spitzbergen (Svalbard)

Тип озера	Количество озер	Доля озер, %	Средняя высота над уровнем моря, м	Средняя максимальная длина озера, м	Средняя площадь озера, км ²	Общая площадь озер, км ²
ЛПО	137	20	278	746,0 ± 7,0	0,330 ± 0,022	45,15 ± 0,26
КЛО	204	29	112	925,5 ± 8,6	0,575 ± 0,036	117,38 ± 0,52
МПО	106	15	105	376,2 ± 6,2	0,082 ± 0,005	8,64 ± 0,05
ТМО	192	27	39	252,0 ± 8,3	0,025 ± 0,001	4,75 ± 0,02
КМО	66	9	136	586,9 ± 4,9	0,162 ± 0,008	10,72 ± 0,06

никовых озер. Их формирование продолжается, так как они имеют ледяные берега. Среди этих озер встречаются самые большие озера на архипелаге, длина которых превышает несколько километров. Также многочисленный тип озер — термокарстовые озера, образовавшиеся на моренах ледника по мере его отступления. Их развитие связано с термокарстовыми процессами при протаивании морен и мертвых льдов, покрытых мореной. Эти небольшие озера распространены на моренах горных ледников, фронты которых спускались на низкие гипсометрические уровни. Их скопления отмечены около крупных горно-долинных ледников (см. рис. 2). Средняя высота таких озер составляет 39 м. Характерной особенностью ТМО является голубой или зеленоватый цвет воды в отличие от проточных озер с водой бурого оттенка. ТМО после формирования имеют преимущественно снеговое питание, большинство из них не имеют постоянного стока.

Моренно-подпрудные озера образованы за счет подпруживания конечной мореной ледника. Большинство из этих озер в недавнем прошлом контактировало с ледниками, но в настоящее время формирующий их ледник отступил. Наиболее вероятно, что, по мере сокращения ледников и отступления их фронтов, этот тип озер будет увеличиваться.

Пятым типом озер являются конечно-моренные озера, т. е. контактирующие с конечной мореной ледника. Как правило, они занимают котловину, которая сформировалась в более ранние периоды развития оледенения. Все КМО перехватывают ледниковый сток, как и озера типов КЛО и КМО, и являются ловушками для ледниковых наносов. КМО малочисленны, на архипелаге их насчитывается 66, а их общая площадь составляет около 10 км². В среднем по площади они значительно превышают озера, расположенные на морене (см. табл. 2). На ранней стадии отступления ледника эти озера могли контактировать с ледником. Об этом говорят материалы аэрофотосъемки 1936–1938 гг., представленные на картографическом сервисе Норвежского полярного института [18]. КМО наиболее характерны для периферии покровного оледенения и лишь для некоторых горных ледников, расположенных значительно выше береговой зоны. Показатель средней высоты этого типа озер уступает лишь группе ледниково-подпрудных озер. В отличие от других типов, КМО возникли ранее 1936 г. и существовали около ледников в период их максимального развития, но продолжали свое формирование в современный период дегляциации.

ОБСУЖДЕНИЕ

В области горного и покровного оледенения выявление приледниковых озер имеет свои особенности, что связано с необходимостью установления современных границ конечных морен. Для территории горного оледенения эти границы очевидны и даже обозначены на электронных картах. Приледниковые озера редко обнаруживаются у небольших ледников в узких горных долинах. В большинстве случаев они сосредоточены на моренах около крупных горно-долинных ледников. Здесь образуются озера практически всех типов и особенно распространены бессточные термокарстовые озера.

Особенностью выявления приледниковых озер, расположенных на периферии покровного оледенения, являются трудности с распознаванием границ конечных морен Малого ледникового периода. Отдельные участки с видимыми границами показывают небольшие расстояния отступления края ледникового купола в пределах 200–300 м. Поэтому мы имеем узкую полосу для распознавания приледниковых озер. Многие из них существовали до 1936 г., на что указывают материалы аэрофотосъемки 1936–1938 гг.

На северо-западе архипелага и в восточной части о. Западный Шпицберген, где развито горно-покровное оледенение, поиск озер аналогичен области с горным оледенением. Здесь для береговых территорий наиболее характерны выводные ледники, дренирующие накопление льда в центральной области оледенения. Некоторые из них отступили от берега моря и формируют обширные моренные комплексы. В этой части Шпицбергена по периферии выводных ледников обнаруживается большое количество ледниково-подпрудных озер и озер, подпруженных мореной.

Предложенная типизация озер в соответствии с их расположением и условием подпруживания позволяет выделить 5 типов, полностью описывающих все 705 обнаруженных озер. Выбранная в работе [13] типизация озер на основе признака подпруживания (ледником или мореной) оставляет некоторые озера без определенного типа.

Цвет воды озера условно указывает на его тип, что также подтверждается в работе [14]. Например, термокарстовые озера имеют зеленоватый или голубой оттенок, так как они не имеют непосредственного притока талых вод с ледника, несущих наносы. Большинство моренно-подпрудных озер, расположенных в ледниковых котловинах, являются проточными, несут большое количество взвешенных наносов и имеют бурый цвет воды [22].

Результаты инвентаризации приледниковых озер по состоянию на 2012 г. показывают, что в настоящее время почти половина озер имеет ледяные берега, что соответствует типам КЛЮ и ЛПО (рис. 3), при этом их суммарная площадь составляет 87 % площади всех озер архипелага. Другая половина озер имеет сформированные берега, и их трансформация будет происходить значительно медленнее в будущем. Логично предположить, что в начале процесса увеличения количества и роста площади приледниковых озер они преимущественно имели контакт с ледником, а по мере исчезновения ледников будут преобладать озера типов МПО, ТМО и КМО, т. е. расположенные в естественных впадинах морен и ледниковых котловин. В текущий момент мы отмечаем изменения площади и количества приледниковых озер. Как было отмечено выше, озера с ледяными берегами (КЛЮ и ЛПО) составляют около половины всего количества, но абсолютно преобладают по площади и тем более по

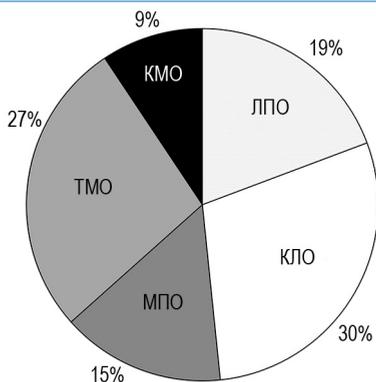


Рис. 3. Количество приледниковых озер разного типа

Fig. 3. Number of periglacial lakes of different types

объему. Дальнейшие изменения озер этих типов будут служить важным индикатором климатических изменений на архипелаге в период сокращения оледенения. При этом, в отличие от реакции ледников Шпицбергена на потепление климата, изменчивость приледниковых озер может быть не однонаправленной и различаться по масштабам в различных частях Шпицбергена. На их динамику в значительной степени могут влиять скорости отступления фронтов ледников, таяние массивов мертвых льдов, масштабные прорывы ледниково-подпрудных озер, изменение русел приледниковых рек. Формирование и распространение приледниковых озер требует более детального изучения с учетом динамики оледенения и климатических изменений в различных районах Шпицбергена.

ВЫВОДЫ

Изменения климата на Шпицбергене с начала XX в. привели к сокращению оледенения архипелага, и на освободившейся от ледников территории формируются приледниковые озера. На основе картографического сервиса НПИ разработана методика поиска и инвентаризации приледниковых озер. В качестве критерия отбора объектов были предложены следующие признаки: наличие контакта озера с ледником, расположение озера в пределах конечной морены или в контакте с ней. Соответствие озера любому из признаков указывает на его формирование в период современной дегляциации территории.

В результате отбора по состоянию 2008–2012 гг. на архипелаге обнаружено 705 приледниковых озер. Их распространение охватывает все области архипелага, где отмечено отступление ледников. В ЮЗ и СЗ частях архипелага в области горного оледенения большинство приледниковых озер сгруппировано на моренах горно-долинных ледников близ побережья. В этих областях Шпицбергена также расположены многочисленные ледниково-подпрудные озера. В восточной части архипелага приледниковые озера рассредоточены вдоль границ покровного оледенения. Здесь преобладают озера с ледяными берегами, и поэтому они находятся в стадии формирования. Также на периферии покровного оледенения отмечены наибольшие показатели средней площади озер и озерности территории, что очевидно связано со слаборасчлененным рельефом.

Выделено пять типов озер, различных по своему местоположению относительно ледника, конечной морены и условий подпруживания. Около половины всех

выявленных озер не имеют контакта с ледником, т. е. их береговая линия уже сформирована. Но «контактные» озера значительно крупнее — их суммарная площадь, равная 163 км², составляет 87 % общей площади всех приледниковых озер. Эти два факта указывают на активную фазу процесса распространения, увеличения количества и площади приледниковых озер на архипелаге. Картографические материалы позволили выполнить инвентаризацию и с высокой точностью получить пространственные характеристики озер. Изменение пространственных характеристик и преобладающих типов озер в будущем может являться индикатором климатических изменений на архипелаге.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Разработка методики поиска и инвентаризации приледниковых озер Шпицбергена и анализ данных выполнены при поддержке гранта РФФИ № 23-27-00312 «Формирование приледниковых озер архипелага Шпицберген в условиях изменения климата».

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The development of the search and inventory methodology of the Spitzbergen (Svalbard) periglacial lakes and data analysis were supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-27-00312. “Formation of periglacial lakes of the Svalbard under the conditions of climate change”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mangerud J., Svendsen J.I. Deglaciation chronology inferred from marine sediments in a proglacial lake basin, western Spitsbergen, Svalbard // *Boreas*. 1990. V. 19. № 3. P. 249–272.
2. Førland E.J., Benestad R.E., Hanssen-Bauer I., Haugen J.E., Skaugen T.E. Temperature and precipitation development at Svalbard 1900–2100 // *Advances in Meteorology*. 2011. V. 17. P. 1–14. doi.org: 10.1155/2011/893790.
3. 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.org: 10.1029/2007GL030681.
4. Nuth C., Kohler J., König M., von Deschwanden A., Hagen J.O., Käab A., Moholdt G., Pettersson R. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 1603–1621. doi.org: 10.5194/tc-7-1603-2013.
5. Harrison S., Karge J.S., Hugge, C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimeš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Vilimek V. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. P. 1195–1209. doi.org: 10.5194/tc-12-1195-2018.
6. Carrivick J.L., Fiona S.T. A review of glacier outburst floods in Iceland and Greenland with a megafloods perspective // *Earth-Science Reviews*. 2019. № 196. P. 102876. doi.org:10.1016/j.earscirev.2019.102876.
7. Schomacker A. Expansion of ice-marginal lakes at the Vatnajökull ice cap, Iceland, from 1999 to 2009 // *Geomorphology*. 2010. V. 119. № 3–4. P. 232–236. doi.org: 10.1016/j.geomorph.2010.03.022.
8. Liestøl O., Repp K., Wold B. Supra-glacial lakes in Spitsbergen // *Nor. Geogr. Tidsskr.* 1980. № 34 (2). P. 89–92.
9. Mohanty L., Maiti S., Dixit A. Spatio-temporal assessment of regional scale evolution and distribution of glacial lakes in Himalaya // *Frontiers in Earth Science*. 2023. V. 10. P. 1038777. doi: 10.3389/feart.2022.1038777.

10. Strozzi T., Wiesmann A., Käseb A., Joshi S., Mool P. Glacial lake mapping with very high resolution satellite SAR data // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2012. V. 12. № 8. P. 2487–2498. doi.org: 10.5194/nhess-12-2487-2012, 2012.
11. Paltan H., Dash J., Edwards M. A refined mapping of Arctic lakes using Landsat imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2015. V. 36. № 23. P. 5970–5982. doi.org: 10.1080/01431161.2015.1110263.
12. Чернов Р.А., Ромашиова К.В. Современное состояние приледниковых озер архипелага Шпицберген // *Криосфера Земли*. 2022. Т. 26. № 1. С. 36–45. doi: 10.15372/KZ20220104.
13. Wiczorek I., Strzelecki M., Stachnik L., Yde J., Malecki J. Inventory and classification of the post Little Ice Age glacial lakes in Svalbard // *The Cryosphere. Discussions*. 2022. doi.org: 10.5194/tc-2021-364.
14. Urbański J.A. Monitoring and classification of high Arctic lakes in the Svalbard Islands using remote sensing // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. V. 112. P. 102911. doi.org: 10.1016/j.jag.2022.102911.
15. Ромашиова К.В., Чернов Р.А. О формировании новых приледниковых озер в бассейне залива Грэнфьорд (Шпицберген) в 1938–2010 гг. // *Лед и снег*. 2022. Т. 62. № 2. С. 193–202. doi.org/10.31857/S2076673422020125.
16. Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) // *Лед и снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 462–472. doi.org: 10.15356/2076-6734-2018-4-462-472.
17. Hanssen-Bauer I., Førland E.J., Hisdal H., Mayer S., Sandø A.B., Sorteberg A. (eds). *Climate in Svalbard 2100 — a knowledge base for climate adaptation*. Norway, Norwegian Centre of Climate Services (NCCS) for Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet). 2019. 208 p. (NCCS report 1/2019). doi.org: 10.13140/RG.2.2.10183.75687.
18. Norwegian Polar Institute's topographical Svalbard map service. URL: <https://toposvalbard.polar.no/> (дата обращения: 09.01.2023).
19. Kartdata Svalbard 1:100 000 (S100 Kartdata) / Map Data [Data set]. Norwegian Polar Institute. 2014. doi.org: 10.21334/npolar.2014.645336c7.
20. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
21. Рянжин С.В., Субетто Д.А., Кочков Н.В., Ахметова, Н.С., Вейнмейстер Н.В. Полярные озера мира: современные данные и состояние исследований // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37. № 4. С. 387–397. doi.org: 10.1134/S0097807810040019.
22. Kavan J., Wiczorek I., Tallentire G.D., Demidionov M., Uher J., Strzelecki M.C. Estimating Suspended Sediment Fluxes from the Largest Glacial Lake in Svalbard to Fjord System Using Sentinel-2 Data: Trebrevatnet Case Study // *Water*. 2022. V. 14. № 12. P. 1840. doi.org: 10.3390/w14121840.

REFERENCES

1. Mangerud J., Svendsen J.I. Deglaciation chronology inferred from marine sediments in a proglacial lake basin, western Spitsbergen, Svalbard. *Boreas*. 1990, 19 (3): 249–272.
2. Førland E.J., Benestad R.E., Hanssen-Bauer I., Haugen J.E., Skaugen T.E. Temperature and precipitation development at Svalbard 1900–2100. *Advances in Meteorology*. 2011, 2011: 1–14. doi.org: 10.1155/2011/893790.
3. 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.org: 10.1029/2007GL030681.

4. Nuth C., Kohler J., König M., von Deschanden A., Hagen J.O., Kääb A., Moholdt G., Pettersson R. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard. *The Cryosphere*. 2013, 7: 1603–1621. doi.org: 10.5194/tc-7-1603-2013.
5. Harrison S., Karge J.S., Hugge, C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimeš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Vilimek V. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*. 2018, 12: 1195–1209. doi.org: 10.5194/tc-12-1195-2018.
6. Carrivick J.L., Fiona S.T. A review of glacier outburst floods in Iceland and Greenland with a megafloods perspective. *Earth-Science Reviews*. 2019, 196: 102876. doi.org: 10.1016/j.earscirev.2019.102876.
7. Schomacker A. Expansion of ice-marginal lakes at the Vatnajökull ice cap, Iceland, from 1999 to 2009. *Geomorphology*. 2010, 119 (3–4): 232–236. doi.org: 10.1016/j.geomorph.2010.03.022.
8. Liestøl O., Repp K., Wold B. Supra-glacial lakes in Spitsbergen. *Nor. Geogr. Tidsskr.* 1980, 34 (2): 89–92.
9. Mohanty L., Maiti S., Dixit A. Spatio-temporal assessment of regional scale evolution and distribution of glacial lakes in Himalaya. *Frontiers in Earth Science*. 2023, 10: 1038777. doi.org: 10.3389/feart.2022.1038777.
10. Strozzi T., Wiesmann A., Kääb A., Joshi S., Mool P. Glacial lake mapping with very high resolution satellite SAR data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2012, 12 (8): 2487–2498. doi.org: 10.5194/nhess-12-2487-2012, 2012.
11. Paltan H., Dash J., Edwards M. A refined mapping of Arctic lakes using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2015, 36 (23): 5970–5982. doi.org: 10.1080/01431161.2015.1110263.
12. Chernov R.A., Romashova K.V. Current state of the proglacial lakes of the Svalbard. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2022, 26 (1): 36–45. [In Russian]. doi.org: 10.15372/KZ20220104.
13. Wieczorek I., Strzelecki M., Stachnik L., Yde J., Malecki J. Inventory and classification of the post Little Ice Age glacial lakes in Svalbard. *The Cryosphere. Discussions*. 2022. doi.org: 10.5194/tc-2021-364.
14. Urbański J. A. Monitoring and classification of high Arctic lakes in the Svalbard Islands using remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022, 112: 102911. doi.org: 10.1016/j.jag.2022.102911.
15. Romashova K.V., Chernov R.A. Formation of new periglacial lakes in the Grønfjord basin (Svalbard) in 1938–2010. *Led i sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (2): 193–202. [In Russian]. doi.org: 10.31857/S2076673422020125.
16. Chernov R.A., Muraviev A.Y. Contemporary changes in the area of glaciers in the western part of the Nordenskjöld Land (Svalbard). *Led i sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (4): 462–472. [In Russian]. doi.org: 10.15356/2076-6734-2018-4-462-472.
17. Hanssen-Bauer I., Førland E.J., Hisdal H., Mayer S., Sandø A.B., Sorteberg A. (eds). Climate in Svalbard 2100 — a knowledge base for climate adaptation. Norway, Norwegian Centre of Climate Services (NCCS) for Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet). 2019: 208 p. (NCCS report 1/2019). doi.org: 10.13140/RG.2.2.10183.75687.
18. Norwegian Polar Institute's topographical Svalbard map service. Available at: <https://toposvalbard.npolar.no/> (accessed 09.01.2023).
19. Kartdata Svalbard 1:100 000 (S100 Kartdata) / Map Data [Data set]. Norwegian Polar Institute. 2014. doi.org: 10.21334/npolar.2014.645336c7.
20. Novitskii P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostei rezul'tatov izmerenii*. Estimation of errors in measurement results, Leningrad: Energoatomizdat, 1985: 248 p. [In Russian].

21. *Ryanzhin S.V., Subetto D.A., Kochkov N.V. et al.* Polar Lakes of the World: Current Data and Status of Investigations. *Vodnye resursy*. Water Resources. 2010, 37 (4): 427–436. [In Russian]. doi.org: 10.1134/S0097807810040019.

22. *Kavan J., Wieczorek I., Tallentire G.D., Demidionov M., Uher J., Strzelecki M.C.* Estimating Suspended Sediment Fluxes from the Largest Glacial Lake in Svalbard to Fjord System Using Sentinel-2 Data: Trebrevatnet Case Study. *Water*. 2022, 14 (12): 1840. doi.org: 10.3390/w14121840.