

КРУПНЫЕ ПРИЛЕДНИКОВЫЕ ОЗЁРА АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН: ИХ СОСТОЯНИЕ В 2008–2012 Г. И ДИНАМИКА С 1991 ПО 2022 Г.

© 2023 г. Р. А. Чернов^{1,*}, К. В. Ромашова²

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: chernov@igras.ru

Поступила в редакцию 01.06.2023 г.

После доработки 23.07.2023 г.

Принята к публикации 02.10.2023 г.

По состоянию на 2008–2012 гг. на Шпицбергене существовало 35 приледниковых озёр размерами свыше 1 км². Они составляли около 1% от общего количества всех озёр архипелага, а их суммарная площадь была равна трети площади озёрного фонда архипелага. В последние десятилетия на западе архипелага крупные озёра значительно увеличились по площади. Рассмотрена динамика крупных озёр архипелага в период с 1991 по 2022 г.

Ключевые слова: ледниково-подпрудные и морено-подпрудные озёра, площадь озёр, уровень озера, ледяные берега, Шпицберген

DOI: 10.31857/S207667342304004X, **EDN:** HCKBOJ

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия во многих горных регионах мира наблюдается увеличение количества, площади и объёма ледниковых озёр, что объясняется глобальным потеплением (Shugar et al., 2020). Наиболее масштабные изменения происходят в Патагонии, на тихоокеанском побережье Аляски, северо-востоке Гренландии, где площадь ледниковых озёр велика. С 1990 г. отмечено увеличение количества ледниковых озёр в Гренландии, Исландии и Скандинавии, а площадь их за последние 30 лет возросла на 130–150% (Shugar et al., 2020). Информация о состоянии ледниковых озёр Шпицбергена и их изменениях до сих пор не учитывалась в глобальных оценках из-за отсутствия сведений.

Современное потепление климата Шпицбергена привело к сокращению его оледенения и расширению территорий, ранее занятых ледниками. Морено-грядовый рельеф на окраине ледников и ледниковые котловины способствовали образованию многочисленных озёр. Их контакт с ледниками или мёртвыми льдами непосредственно влияет на таяние льда (Chernos et al., 2016), а потери ледников при таянии в озёрах могут вносить заметный вклад в их баланс массы (Zang et al., 2023). Мы рассматриваем крупные приледниковые озёра, так как они в значительной степени определяют потери льда на таяние при контакте с ледниками, а их пространственные изменения

служат главным фактором масштабных изменений озёр на архипелаге.

Другим аспектом современных исследований ледниковых озёр в различных горных районах Земли становится оценка рисков в случае их прорывов (Zang et al., 2015; Докукин и др., 2022). В полярных регионах опасность прорывов ледниковых озёр снижена или несущественна при отсутствии населённых пунктов и инфраструктуры. Тем не менее, случаи прорывов ледниковых озёр около действующих полярных станций уже были отмечены на Шпицбергене и Антарктиде (Listol et al., 1980; Боронина, 2022). Важно отметить и возможные масштабы прорывов крупных озёр в полярных областях, объёмы перемещённой массы воды могут в десятки и сотни раз превышать прорывы горных ледниковых озёр (Чернов, Муравьёв, 2020; Муравьёв, Чернов, 2023). Интерес к ледниковым озёрам в полярных областях возник также в связи с влиянием наледниковых озёр на гидротермическое состояние толщи ряда выводных ледников Гренландии (Vox, Ski, 2007).

В настоящее время возникают попытки оценить количественные показатели ледниковых озёр на Шпицбергене на основе дистанционных методов (Чернов, Ромашова, 2022; Urbański, 2022; Wiczorek et al., 2023). Цель исследования – зафиксировать состояние крупных озёр по данным 2008–2012 гг. и исследовать их динамику на рубеже XX века, что позволит оценить основной фактор изменений озёрного фонда архипелага в усло-

виях потепления климата. В работе рассмотрены особенности распространения приледниковых озёр в разных частях архипелага.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

По данным Атласа ледников Шпицбергена (Hagen et al., 1993;) оледенение архипелага покрывает около 60% площади его суши, 1668 ледников имеют площадь около 33700 км² (Nuth et al., 2013). В связи с современными климатическими изменениями в Арктике оледенение на Шпицбергене значительно сократилось; наиболее масштабные изменения произошли во второй половине XX века (Pfeffer et al., 2014; Чернов и др., 2018). С начала XX века на западе архипелага сокращение площади оледенения достигло 51% (Kohler et al., 2007). Наибольшие темпы сокращения оледенения отмечены в 1990-е годы на юго-западе архипелага, Земле Принца Карла и Земле Норденшельда (Chernov et al., 2019). На рубеже XX и XXI вв. в западной части Шпицбергена относительное сокращение площади ледников за декаду составляло 5–10%, а на востоке, в области покровного оледенения – около 3% (Nuth et al., 2013), что обусловлено климатическими различиями западного и восточного побережий.

Предварительные оценки показывают, что количество озёр на архипелаге существенно превышает количество ледников. Несмотря на климатические различия и масштабы сокращения оледенения в западных и восточных районах архипелага, приледниковые озёра распределены сравнительно равномерно по периферии оледенения (Чернов, Ромашова, 2022). На севере и востоке архипелага более пологий рельеф способствует образованию озёр, размеры которых в среднем больше чем на юге и юго-западе в области горного оледенения. На юге архипелага скопления озёр наблюдаются в основном в пределах конечных морен горно-долинных ледников, которые значительно отступили от своего максимума после окончания малого ледникового периода (Mangerud et al., 1992; Ромашова, Чернов, 2022).

Работа выполнена на основе дистанционных методов, материалов аэрофотосъёмки Норвежского полярного института (далее – НПИ) и отдельных полевых наблюдений авторов с целью количественной оценки текущего состояния крупных озёр и выделения наиболее значимых и динамичных объектов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе используются сведения о количестве и суммарной площади озёр разного генезиса: термокарстовые озёра, древние озёра ледникового происхождения, наледниковые, приледниковые и искусственные озёра. Лагунные озёра не рас-

сматривались, поскольку их изолированность от морской акватории невозможно оценить дистанционными методами. Информация о количестве озёр разного генезиса, расположенных на архипелаге, получена при помощи картографического сервиса НПИ (toposvalbard.npolar.no) по состоянию на 2008–2012 гг. К крупным озёрам отнесены объекты размером свыше 100 га (1 км²).

НПИ предоставляет доступ к связанному с сервисом набору векторизованных данных, в том числе с оцифрованными контурами озёр (geodata.npolar.no). Мы использовали береговую линию озёр в программе QGIS для определения суммарной площади озёр разного генезиса в 2008–2012 гг. Сведения о приледниковых озёрах архипелага приведены из материалов инвентаризации приледниковых озёр Шпицбергена (Чернов, Ромашова, 2022).

Наше внимание направлено на изучение крупных озёр, так как их размеры определяют озёрный ресурс территории. На примере отдельного водосбора (Ромашова, Чернов, 2022) крупные озёра содержат до 98% объёма озёрной воды и до 91% площади озёр. Поэтому масштабы их пространственных изменений являются определяющими для статистических оценок всей совокупности озёр.

Основу исследования составляют данные картографического сервиса НПИ, которые отображают состояние объектов в 2008–2012 гг. с пространственным разрешением 0.4 м/пикс. Сервис имеет наиболее высокое из имеющихся изображений разрешение, позволяющее подробно и достаточно достоверно определить границы водных объектов архипелага, определить их линейные размеры и площадь. Используя встроенные в сервис инструменты, мы получили длину ледяных берегов озёр, контактирующих с ледниками. Определение высоты объектов (в том числе высоты уреза воды в озёрах) сервис даёт с точностью до 1 м.

Для описания состояния крупных приледниковых озёр в другие периоды использованы данные дистанционного зондирования архипелага Шпицберген. Для 2022 г. взяты спутниковые снимки Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м/пикс. Для периода 2000–2002 гг. использованы снимки Landsat 7 с пространственным разрешением 15 м/пикс (панхроматический канал), для периода 1990–1992 гг. – Landsat 5 с пространственным разрешением 30 м/пикс. Более ранние космические снимки не принимались во внимание из-за низкой точности дешифрирования. Спутниковые изображения за все исследуемые периоды выбирались за июль–август как наиболее тёплые месяцы и имеющие наименьшее покрытие снежного покрова. Частота пролёта спутников и облачность, закрывающая часть

Таблица 1. Общее количество и площадь озёр различного генезиса на архипелаге Шпицберген, в том числе крупных озёр размерами более 1 км² по состоянию на 2008–2012 гг.

Название группы озёр	Общее количество озёр на архипелаге	Общая площадь озёр, км ²	Озёра размерами более 1 км ²		
			количество крупных озёр	суммарная площадь озёр, км ²	доля площади крупных озёр, %
Наледниковые	356	13.1 ± 0.1	—	—	—
Приледниковые	554	185.5 ± 0.3	35	127.6	32.3
Древние ледниковые	53	26.0 ± 1.5	9	20.3	5.1
Термокарстовые	2825	169.1 ± 10.9	15	25	6.3
Искусственные	2	1.3 ± 0.3	1	1.2	0.3
Всего	3790	395 ± 12.3	60	174.1	44.1

озёр, не позволили ограничиться изображениями одного года в периоды 1990–1992 и 2000–2002 гг.

Наиболее ранние оценки состояния крупных озёр на архипелаге получены на основе аэрофотоснимков 1936–1938 гг., представленных на электронном картографическом сервисе НПИ, мы же отмечали лишь факт существования озера или его отсутствия. Длина приледникового озера определена в программе QGIS как наибольшее расстояние между вершинами полигона, ограничивающего озеро. Исходя из пространственного разрешения данных 2008–2012 гг., точность определения длины озера округлена до 1 м. Величина погрешности определения площади озера вычислялась путём построения внутренних и внешних буферных зон, составляющих половину величины разрешения использованных источников. Приблизительная оценка изменения объёма ряда озёр вычислена как произведение их площади по состоянию на 2012 г. и выявленного падения уровня. Величина суммарного объёма приледниковых озёр была получена ранее в работе (Чернов, Ромашова, 2022).

Для расчётов пространственных изменений двух крупнейших озёр были использованы спутниковые снимки: озера Требр Landsat-5 от 29.08.1992 (LT05_L1TP_220003_19920829_20200914_02_T2) и Sentinel-2 от 23.08.2022 (S2A_M-SIL2A_20220823T131731_N0400_R124_T33XVH_20220823T184957); озера Ганд Landsat-5 от 31.07.1991 (LT05_L2SP_207004_19910731_20200915_02_T1) и Sentinel-2 от 20.08.2022 (S2A_M-SIL1C_20220820T112641_N0400_R080_T33XX-G_20220820T150909).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Арктические озёра – важный элемент ландшафта и многие из них служат естественными ре-

зервуарами пресной воды в течение зимнего периода. Всего по состоянию на 2008–2012 гг. на архипелаге насчитывается около 3790 озёр разного генезиса, размерами более 0.01 км² (1 га). Их суммарная площадь составляет 395 км² (табл. 1). Самая многочисленная группа – это небольшие озёра, расположенные в естественных котловинах в прибрежной зоне, на обширных тундровых участках и в горных долинах за пределами современных морен. Как правило, их формирование связано с термокарстовыми процессами, поэтому мы условно обозначили эту группу как термокарстовые озёра. Также многочисленны приледниковые озёра, которые расположены в пределах современных морен и образовались сравнительно недавно, методика инвентаризации и статистические сведения о приледниковых озёрах Шпицбергена приведены в работе (Чернов, Ромашова, 2022). Их формирование происходит в настоящее время на территориях, освободившихся от ледников, так как большинство из них имеют ледяные берега. По нашим оценкам суммарная площадь приледниковых озёр (размерами более 0.01 км²) равна 186 км² и составляет 47% всей площади озёр архипелага (см. табл. 1). Древние озёра ледникового происхождения немногочисленны, и их суммарная площадь невелика. Образование этих озёр связано с сокращением оледенения архипелага в прошлом. Среди них озеро Линне (Linnevatnet) – одно из крупных ледниковых озёр на архипелаге, оно образовалось более 7000–8000 тыс. лет назад (Mangerud, 1992). Также на архипелаге существует два искусственных озера, подпруженных дамбами. Они используются для обеспечения водой арктических посёлков Лонгйир и Нью-Алесун.

По состоянию на 2008–2012 гг. на архипелаге существовало 60 крупных озёр, площадь которых превышала 1 км². В совокупности их общая площадь составляла 174.1 км² или около 44% площади всех озёр (см. табл. 1). Более половины из них – приледниковые озёра, которые на наш

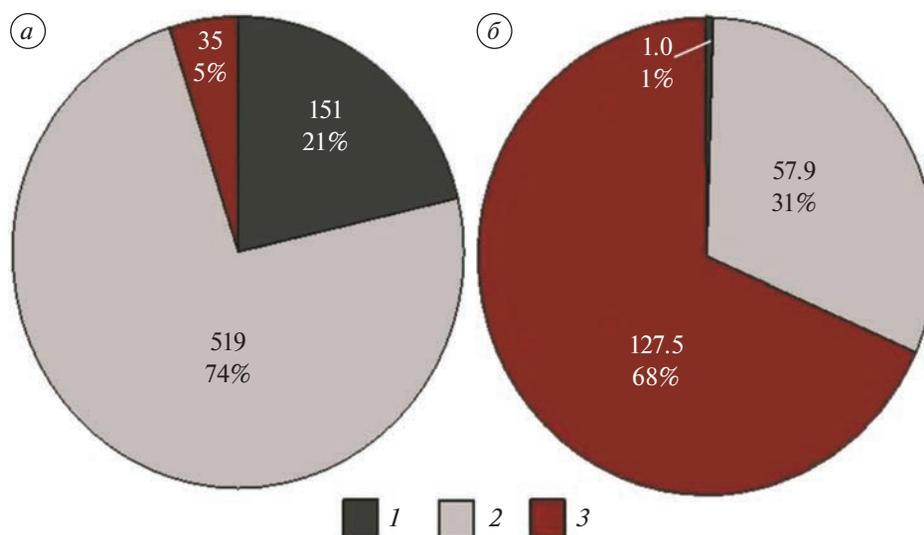


Рис. 1. Соотношение количества приледниковых озёр (а) и их площади (б) для трёх диапазонов площади по состоянию на 2012 г.: 1 – до 0.01 км²; 2 – от 0.01 до 1 км²; 3 – свыше 1 км² (крупные озёра).

Fig. 1. The ratio of the number of near-glacial lakes (a) and their area (b) for three area ranges as of 2012: 1 – up to 0.01 km²; 2 – from 0.01 to 1 km²; 3 – over 1 km² (large lakes).

взгляд представляют наибольший интерес, так как эти озёра находятся в стадии формирования и, по-видимому, их динамика отражает современные климатические изменения озёрного фонда на архипелаге.

Расположение и характеристики крупных приледниковых озёр. С начала XX века образование приледниковых озёр отмечено на всей территории архипелага (Чернов, Ромашова, 2022; Wieszorek et al., 2023). По состоянию на 2012 г. на архипелаге мы обнаружили 705 приледниковых озёр. Из них 519 имели площадь от 0.01 до 1 км² и 35 крупных озёр, размерами свыше 1 км². На рис. 1 показаны соотношения количества и общей площади приледниковых озёр в трёх диапазонах, которые условно можно разделить на диапазоны малых, средних и крупных озёр. Как правило, малые озёра размерами до 1 га не учитываются в оценках водных ресурсов, так как их вклад в площадь и объём невелик. По нашим оценкам на примере отдельного водосбора доля площади малых озёр составляет менее 2%, доля объёма – менее 1% (Ромашова, Чернов, 2022). При этом, крупные озёра составляют две трети площади всех приледниковых озёр и около одной трети площади всех озёр на архипелаге.

По-видимому, крупные приледниковые озёра находятся в активной стадии формирования, так как основные изменения их площади происходят за счёт разрушения ледяных берегов. По материалам аэрофотосъёмки в 2012 г. мы определили, что все крупные приледниковые озёра имеют ледяные берега, их суммарная протяжённость состав-

ляет 78.1 км (около 2.2 км на озеро) или в среднем около 20% их береговой линии.

Следует предположить, что темпы формирования береговой линии озёр зависят от скорости отступления ледников, которые различаются в разных частях архипелага. В ряде работ отмечено, что на западе и юго-западе горное оледенение стремительно сокращается, в то время как на северо-востоке и востоке темпы сокращения ледников заметно ниже (Nuth et al., 2013). Пространственное распределение озёр на архипелаге не показывает каких-либо явных различий в разных частях архипелага. Распространение крупных озёр на архипелаге оказалось фактически равномерным (рис. 2). Мы предполагаем, что климатические различия в пределах архипелага, которые отмечены в масштабе сокращения оледенения, проявляются в динамике формирования озёр. Материалы аэрофотосъёмки 1936–1938 гг. показывают, какие из крупных озёр существовали до 1936 г. Результаты сравнения выявили различия между западными и восточными территориями. Мы полагаем, что почти все крупные приледниковые озёра, расположенные на западе архипелага, появились после 1936 г. (зелёные точки). На востоке большинство приледниковых озёр существовало ранее 1936 г. Исключение составляет территория о. Эдж, где расположено несколько крупных приледниковых озёр, как новых, так и старше 1936 г.

Озёра, которые не относятся к приледниковым, сосредоточены в основном на северных территориях, где пологие формы рельефа способ-

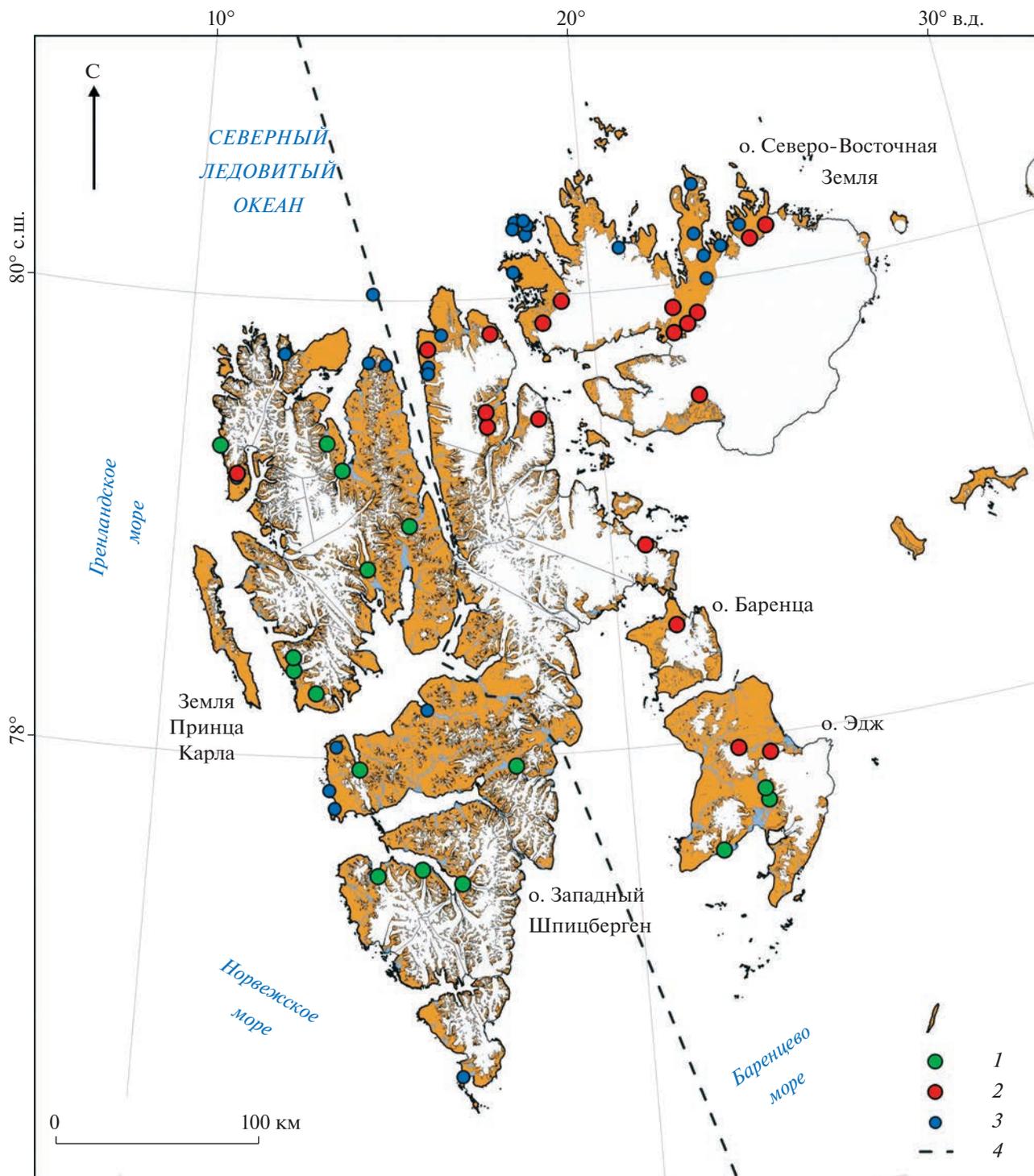


Рис. 2. Расположение крупных озёр на арх. Шпицберген: 1 – новые приледниковые озёра (после 1936 г.); 2 – приледниковые озёра, которые существовали до 1936 г.; 3 – озёра различного генезиса (не приледниковые); 4 – граница западной и восточной частей Шпицбергена.

Fig. 2. Location of the largest lakes in the Svalbard archipelago: 1 – new periglacial lakes (after 1936); 2 – periglacial lakes that existed before 1936; 3 – lakes of various genesis (not periglacial); 4 – border of the western and eastern parts of Svalbard.

ствуют существованию крупных озёр. В западной части Шпицбергена на Земле Норденшельда общая закономерность нарушается. Здесь расположены несколько крупных озёр разного генезиса:

древнее ледниковое озеро Линне (Linnevatnet), большие термокарстовые озёра на морской террасе и искусственное озеро около пос. Лонгир (см. рис. 2).

На основе ГИС-методов рассчитаны морфометрические характеристики 35 крупнейших приледниковых озёр (табл. 2). Они расположены в порядке убывания площади озёр по состоянию на 2012 г. Озёра, не имеющие собственного названия, обозначены по названию питающего ледника. Озёра лежат в широком диапазоне высот, их средний уровень равен 89.5 м. Ледниково-подпрудные озёра, как правило, расположены выше, чем моренно-подпрудные. Несколько озёр, лежащих в естественных котловинах на краю покровного оледенения, имеют наибольшие абсолютные высоты (см. табл. 2). По состоянию на 2008–2012 гг. все крупные приледниковые озёра контактировали с ледниками. Величина длины ледяных берегов обусловлена в большинстве случаев шириной фронта ледника. Сравнение длины озера с протяжённостью его ледяного берега косвенно указывает на возможные изменения береговой линии озёр в будущем в связи с таянием ледяных берегов.

Общая площадь крупных приледниковых озёр составляет $127.5 \pm 0.6 \text{ км}^2$, их средняя площадь — $3.64 \pm 0.02 \text{ км}^2$. Оценки погрешности площади озёр, рассчитанные ГИС-методами, оказались значительно меньше величины годовых изменений их площади, что позволяет оценить их временную динамику.

Изменения площади крупнейших приледниковых озёр. Из 35 крупных приледниковых озёр архипелага в его западной части расположено 14 озёр. За исключением озера Дисет Северный, они образовались после 1936 г. Два озера не существовали ранее 1991 г. Приледниковые озёра на западе архипелага обнаруживают значительную динамику изменений площади на рубеже XX и XXI вв. Мы сравнили пространственные изменения площади озёр с 1991 по 2022 г. для трёх периодов 1991–2002, 2002–2012 и 2012–2022 гг. (табл. 3). Изменения площади озёр запада чрезвычайно масштабны и для 8 объектов площадь кратно увеличилась. Суммарно за 30 лет площадь озёр в западной части архипелага выросла более чем в два раза (на 113%). Укрупнение озёр происходило в основном до 2012 г., а впоследствии их суммарная площадь даже несколько уменьшилась. Основной вклад дали самые большие по площади морено-подпрудные озёра Требр, Ядерин, Эдем и Ваттердамен за счёт разрушения фронтов ледников, спускающихся в озёра. В 2012–2022 гг. изменения были неоднозначны, шесть озёр уменьшились в размерах в большей степени, чем произошло укрупнение остальных озёр. Сокращение площади озёр произошло в связи с размывом подпруживающих морен, а в случае озёра, расположенного у ледника Пенк, в связи подвижкой ледника в котловину озера.

На востоке архипелага насчитывается 21 крупное приледниковое озеро. За последние 30 лет изменения их площади оказались менее масштабны по сравнению с озёрами, расположенными в западной части архипелага. Суммарная площадь этих озёр по состоянию на 1991–1992, 2008–2012 и 2022 гг. была равна 63, 74 и 77 км² соответственно. Изменения их площади за весь период составили 13.7 км² (22%). Основное приращение площади, так же как и на западе, произошло в период с 1991 по 2010 г. Преимущественно это был вклад двух морено-подпрудных озёр Ганд и Крокет на о. Эдж, которые, разрушая ледяные берега ледников, увеличили площадь своих акваторий. Эти озёра образовывались после 1936 г. (см. рис. 2) и являются скорее исключением в группе озёр на востоке архипелага. Динамика озёр Ганд и Крокет более соответствует озёрам запада. Хотя о. Эдж относится к восточной части архипелага, он расположен преимущественно южнее 78 градуса широты, и поэтому климат острова более соответствует юго-западной части Шпицбергена, об этом свидетельствует и значительное сокращение оледенения острова (Nuth et al., 2013).

Детальные изменения пространственных границ двух самых больших приледниковых озёр Требр и Ганд показаны на рис. 3. Береговая линия со стороны конечных и боковых морен фактически неизменна. Приращения площади происходят по мере отступления фронтов ледников, оканчивающихся в озере. За период 1991–2022 гг. ледник отступил на расстояние около 4 км, расширив акваторию оз. Требр. Фронт ледника Ганд отступил из котловины озера почти на 2 км.

Различия озёр востока и запада архипелага ещё более очевидны, когда мы рассматриваем озёра по факту их существования в 1936 г. Это максимально отдалённый срок, когда мы можем подтвердить их наличие по материалам аэрофотосъёмки НПИ. Сравним изменения площадей 16 приледниковых озёр, образовавшихся после 1936 г., и 19 озёр, которые уже существовали в 1936 г. (рис. 4). Порядок озёр на диаграмме соответствует увеличению их площади слева направо, цифрами указаны номера озёр (см. табл. 2).

В целом в обеих группах наблюдается увеличение площади озёр в период с 1991–2002 по 2002–2012 гг. Наибольшие изменения площади характерны для самых больших озёр. Процесс пространственных изменений новых озёр и озёр, сформированных ранее 1936 г., на рубеже XXI века различен. Основной вклад дали новые озёра. До 2012 гг. фактически все озёра увеличивались (см. рис. 3, а). Озёра, существовавшие ранее 1936 г., увеличились десятикратно меньше. В период 2012–2022 гг. происходили и положительные и отрицательные изменения площади озёр (см. рис. 3), и площадь старых озёр даже уменьшилась

Таблица 2. Характеристики крупных приледниковых озёр Шпицбергена по состоянию на 2008–2012 г.

№	Название озера или питающего ледника	Координаты центра озера	Абсолютная высота озера над ур. моря, м	Длина озера, м	Протяжённость ледяного берега, м	Площадь озера по состоянию на 2008–2012 г., км ²	Тип озера
1	Требр	78.82506°с.ш., 14.43698°в.д.	30	7931	4060	17.31	мп*
2	Брайн	79.78787°с.ш., 22.00294°в.д.	3	5327	5420	10.97	к
3	Ганд	77.71357°с.ш., 22.81509°в.д.	14	7161	7220	9.85	мп
4	Фемилсион	79.78611°с.ш., 15.87055°в.д.	27	7992	1010	7.58	к
5	Кроксион	79.89795°с.ш., 22.04735°в.д.	248	6760	1140	6.42	к
6	Ядерин	79.25511°с.ш., 13.81527°в.д.	10	4016	1493	5.85	мп
7	Эдем	78.37686°с.ш., 12.84774°в.д.	40	5731	3920	5.17	мп
8	Пенк (ледник)	77.51238°с.ш., 15.61592°в.д.	16	2122	1490	4.32	мп
9	Речерч	77.48015°с.ш., 14.72364°в.д.	2	3359	3063	3.89	мп
10	Ратиорна	77.95604°с.ш., 17.61677°в.д.	26	3418	1300	3.71	мп
11	Хочтетер	78.88028°с.ш., 20.77939°в.д.	25	3634	1230	3.48	мп
12	Венесон	79.86286°с.ш., 22.64040°в.д.	241	3954	3240	3.37	к
13	Флайсон	79.81992°с.ш., 22.36555°в.д.	133	5176	5370	3.27	к
14	Клуфт	79.44151°с.ш., 17.27764°в.д.	218	5663	1140	3.27	лп**
15	Крокет	77.91946°с.ш., 22.96952°в.д.	159	3606	5730	3.12	лп
16	Стауп	79.46519°с.ш., 18.51905°в.д.	87	2972	5100	3.10	лп
17	Марсон	77.95427°с.ш., 22.31769°в.д.	174	3936	1612	2.89	лп
18	Велсем	78.51939°с.ш., 21.29331°в.д.	193	4031	1690	2.55	мп
19	Ваттерндамен	78.27868°с.ш., 13.34876°в.д.	35	2554	2150	2.41	мп
20	Дисет северный	79.22657°с.ш., 11.34840°в.д.	23	2680	0	2.29	к***
21	Кухр	77.51719°с.ш., 21.76820°в.д.	1	2123	0	1.90	мп
22	Треди	79.34466°с.ш., 10.90834°в.д.	10	2435	1670	1.78	мп

Таблица 2. Окончание

№	Название озера или питающего ледника	Координаты центра озера	Абсолютная высота озера над ур. моря, м	Длина озера, м	Протяжённость ледяного берега, м	Площадь озера по состоянию на 2008–2012 г., км ²	Тип озера
23	Вайб	79.50483°с.ш., 22.43017°в.д.	243	2675	3530	1.70	к
24	Вулф	79.97270°с.ш., 19.26677°в.д.	186	2584	1140	1.69	мп
25	Исунген	80.15181°с.ш., 24.21686°в.д.	86	2433	1790	1.65	мп
26	Сейд	77.76402°с.ш., 22.76986°в.д.	18	2767	3090	1.65	мп
27	Бретьорна	77.95002°с.ш., 14.31251°в.д.	5	2280	129	1.64	мп
28	Карла	79.37165°с.ш., 13.43944°в.д.	40	1877	523	1.60	мп
29	Баска (ледник)	79.88248°с.ш., 18.76685°в.д.	176	3534	1480	1.57	мп
30	Листол	77.44816°с.ш., 16.42000°в.д.	90	1530	3960	1.55	мп
31	Грейв	79.84628°с.ш., 17.43358°в.д.	92	1825	599	1.45	мп
32	Грушион	78.43365°с.ш., 12.82809°в.д.	60	2122	320	1.16	мп
33	Фоул	79.50500°с.ш., 17.25663°в.д.	135	1619	608	1.14	лп
34	Орм	80.19735°с.ш., 24.68036°в.д.	137	2471	1410	1.11	мп
35	Университет	79.01474°с.ш., 15.39250°в.д.	140	1916	480	1.10	мп

*Морено-подпрудное озеро; **ледниково-подпрудное; ***озеро, расположено в естественной котловине около ледника.

(см. рис. 3, б). Процесс укрупнения озёр, сформированных ранее 1936 г., идёт крайне медленно, что, по-видимому, связано с суровостью климата на востоке и северо-востоке архипелага. Вероятно, пространственные изменения береговой линии озёр на востоке также определены их ледовым режимом, так как в летний период озёра лишь на 1–1.5 месяца освобождаются от ледяных полей. Продолжительность разрушения ледяных берегов в летний период невелика.

Таким образом, вклад озёр, расположенных в восточной части Шпицбергена, большинство из которых существовали ранее 1936 г., даёт увеличение площади на порядок меньше, чем озёра на западе архипелага. Сокращения площади оледенения западных и восточных частей Шпицбергена также различаются в 5–10 раз (Hagen et al., 1993; Nuth et al., 2013; Чернов, Муравьев, 2018),

что явно указывает на климатический характер изменений озёр.

Изменения уровня воды в озёрах. Исследование возможных изменений уровня воды в последние десятилетия выполнено для всех крупных озёр на основе картографического сервиса НПИ (табл. 4). Материалы сервиса для 2008–2012 гг. позволяют определять отметку уреза воды в озере и высоты береговых объектов с точностью 1 м. Следы береговых террас обнаружены нами у шести озёр. Эти террасы с равными высотами по периметру озера, что указывает на их формирование в соответствии с урезом воды в озере. Вероятно, существование этих террас не превышает несколько десятков лет, так как процессы разрушения склонов постепенно их стирают. Полевые наблюдения на оз. Бретьорна показывают, что береговые террасы, соответствующие 30-летней давности, факти-

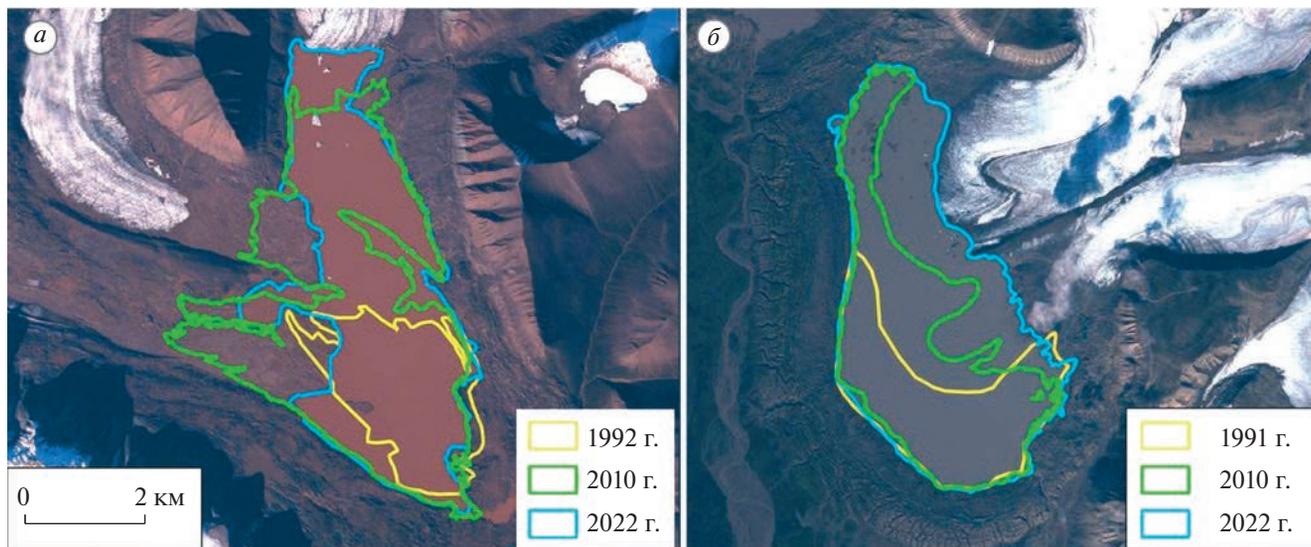


Рис. 3. Изменения границ самых крупных озёр арх. Шпицберген: Требр (а) и озёра Ганд (б) в период с 1990 по 2022 г.
Fig. 3. Changes in the boundaries of the largest lakes of the Svalbard archipelago: Lake Trebvatnet (a) and Lake Gandvatnet (b) in the period from 1990 to 2022.

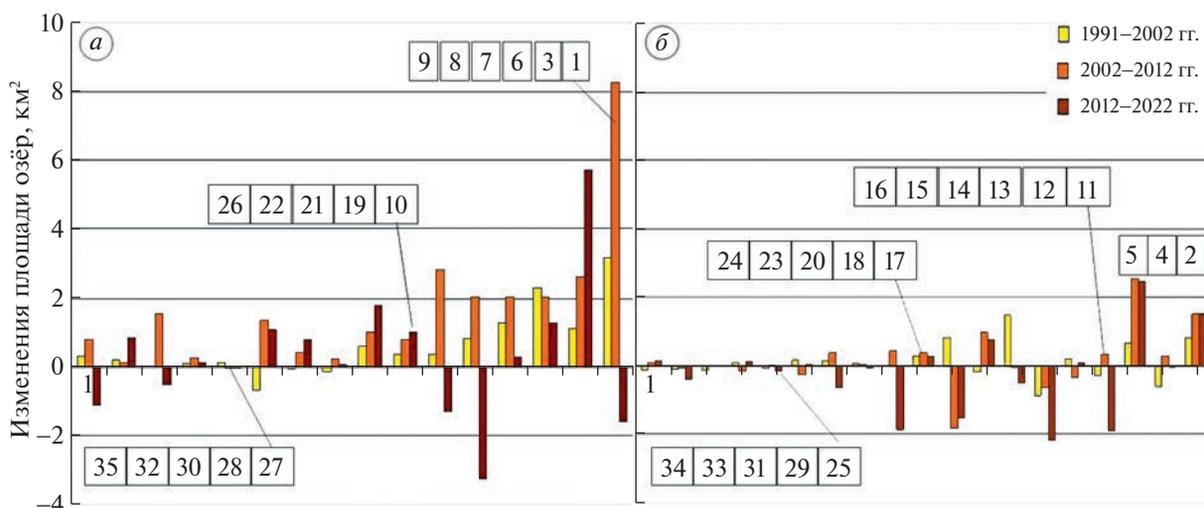


Рис. 4. Изменение площади крупных приледниковых озёр в группе новых озёр (а) и озёр, существовавших ранее 1936 года (б) в периоды с 1990–2002, 2002–2012 и с 2012–2022 гг. Цифры соответствуют номерам в табл. 2.
Fig. 4. Change in the area of the largest near-glacial lakes in the group of new lakes (a) and lakes that existed before 1936 (b) in the periods from 1990–2002, 2002–2012 and from 2012–2022. The numbers correspond to the numbers in Table 2.

чески стёрты процессами солифлюкции и эрозии склонов.

Материалы аэрофотосъёмки НПИ показывают, что у мореноподпрудных озёр Требр (Trebvatnet) и Пенк (Penck) произошло образование канала стока озера в речную долину при размыве морены. Ледниково-подпрудные озёра Стауп (Staurvatnet) и Фоул (Folevatnet) (см. табл. 4) образовали маргинальные каналы стока вдоль края ледника. Озеро Клүфт (Kluftvatnet), подпруженное ледником, не имеет постоянного

стока и, вероятно, является прорывным. Возможно, это единственное озеро среди всех крупных озёр архипелага, для которого свойственны масштабные спуски по внутренним каналам ледника.

Исходя из величины изменения отметки уреза воды и площади озера, получим изменение объёма воды в озёрах (см. табл. 4). Приблизительный объём озера вычислен как произведение его площади по состоянию на 2012 г. и падения уровня воды. Возможное расширение площади озера за

Таблица 3. Изменение площади крупных приледниковых озёр в западной части арх. Шпицберген с 1991 по 2022 г.

Название озера (номер в соответствии с табл. 2)	Площадь озера, км ²				Изменение площади за период, км ²			
	1991–1992 гг.	2000–2002 гг.	2008–2012 гг.	2022 г.	1991–2002	2002–2012	2012–2022	1990–2022
Требр (10)	5.89 ± 1.12	9.04 ± 0.36	17.31 ± 0.06	15.73 ± 0.52	3.15	8.27	–1.58	9.84
Ядерин (6)	1.50 ± 0.54	3.80 ± 0.15	5.85 ± 0.02	7.13 ± 0.32	2.3	2.05	1.29	5.63
Эдем (7)	1.83 ± 1.08	3.12 ± 0.12	5.17 ± 0.04	5.44 ± 0.64	1.29	2.05	0.28	3.61
Ратиорна (10)	2.55 ± 0.42	2.91 ± 0.12	3.71 ± 0.01	4.72 ± 0.23	0.36	0.8	1.01	2.16
Вэттердамен (19)	0.78 ± 0.39	1.39 ± 0.06	2.41 ± 0.01	4.21 ± 0.19	0.61	1.02	1.80	3.43
Треди (22)	1.42 ± 0.49	1.36 ± 0.05	1.78 ± 0.01	2.57 ± 0.15	–0.06	0.42	0.79	1.15
Речерч (9)	0.67 ± 0.22	1.04 ± 0.04	3.85 ± 0.01	2.56 ± 0.15	0.37	2.81	–1.29	1.89
Дисет север. (20)	2.17 ± 0.50	2.25 ± 0.09	2.29 ± 0.01	2.25 ± 0.18	0.08	0.04	–0.05	0.07
Грушион (32)	0.80 ± 0.26	1.02 ± 0.04	1.16 ± 0.01	2.00 ± 0.21	0.22	0.14	0.84	1.20
Карла (28)	1.24 ± 0.29	1.33 ± 0.05	1.60 ± 0.01	1.73 ± 0.12	0.09	0.27	0.12	0.49
Бретьорна (27)	1.55 ± 0.37	1.68 ± 0.07	1.64 ± 0.01	1.60 ± 0.15	0.13	–0.04	–0.04	0.05
Пенк (8)	1.47 ± 0.59	2.28 ± 0.09	4.32 ± 0.01	1.07 ± 0.13	0.81	2.04	–3.25	–0.40
Листол (30)	–	–	1.55 ± 0.01	1.04 ± 0.11	–	1.55	–0.51	1.04
Университет (35)	–	0.30 ± 0.01	1.10 ± 0.01	–	0.3	0.8	–1.10	0.00
Суммарно	21.87 ± 2.3	31.52 ± 0.47	53.74 ± 0.10	52.05 ± 1.50	9.65	22.22	–1.69	30.18

Таблица 4. Максимальное падение уровня приледниковых озёр и соответствующие изменения объёма на рубеже XX и XXI вв.

Название озера (номер в соответствии с табл. 2)	Тип озера	Площадь озера км ²	Высота уреза воды над ур. морья, м	Максимальное падение уровня воды, м	Уменьшение объёма озера, км ³
Требр (1)	мп*	17.31	17	–45	–0.78
Пенк (8)	мп	4.32	18	–31	–0.13
Клуфт (14)	лп**	3.27	218	–39	–0.13
Крокет (15)	лп	3.12	158	–7	–0.02
Стауп (16)	лп	3.10	87	–42	–0.13
Фоул (33)	лп	1.14	135	–36	–0.04
Суммарный объем	–	–	–	–	–1.23

*Морено-подпрудное озеро; **ледниково-подпрудное.

счёт берегового склона в данном случае не учитывалось. Тем не менее, потери объёма в последние десятилетия оказались соизмеримы с общим объёмом воды в приледниковых озёрах и составили 1.2 км³. Ранее на основе инвентаризации приледниковых озёр по нашим предварительным оценкам общий объём составил около 2 км³ (Чернов, Ромашова, 2022).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Самое крупное озеро на архипелаге на период 2008–2012 гг. – озеро Требр (Trebrevatnet), распо-

ложенное в центральной части Шпицбергена. Озеро занимает обширную котловину трёх ледников и подпружено моренным валом высотой до 60 м. Наибольшая площадь озера наблюдалась в 2013 г. и составила 20.87 км² (Wieczorek et al., 2023). Уровень воды в озере заметно меняется в летний период, что связано с особенностью стока через морену с ледяным ядром. Не исключены колебания уровня озера в связи с активным летним таянием на ледниках. Однако в период с 2013 по 2014 г. из озера Требр проходил сброс воды, о чём свидетельствует значительное сокращение площади озера (см. табл. 3 и 4). Уровень воды



Рис. 5. Озеро Бретьерна и ледники Восточный (1) и Западный Гренфьорд (2). Фото Чернова Р.А., 2020 г.

Fig. 5. Lake Bretjorna and Austre Grenfjordbreen (1) and Vestre Grenfjordbreen (2) glaciers. Photo by Chernov R.A., 2020.

упал до 45 м. После 2014 г. озеро остаётся достаточно глубоким, так как в северной части его акватории плавают айсберги. Их надводная часть указывает на возможную максимальную глубину озера около 26–28 м, однако южная часть озера, по-видимому, мелководна и имеет много мелей и островов.

Озеро Брайн (Branevatnet) – второе по величине озеро площадью 10.9 км² расположено в естественной котловине на северо-востоке архипелага. Граничит с ледниковым куполом, имеет протяжённые ледяные берега. Уровень озера стабилен, так как из озера вытекает река.

Среди крупных озёр Шпицбергена отмечена группа быстро растущих озёр, которые обозначаются в научной литературе как “melting lake”. Для них характерен контакт с ледником, фронт которого быстро разрушается в период летнего таяния. Среди них самое большое – морено-подпрудное озеро Ганд (Gandvatnet) на острове Эдж. Оно характеризуется быстрым увеличением площади водного зеркала и при устойчивости подпруживающей морены. Увеличение озера произошло за счёт постепенного разрушения двух языков ледника Ганд (Gandbreen) после их пульсации в 1990-е годы. Подобные изменения произошли в озере Ядерин (Jaderinvatnet), при отступании фронта ледника площадь озера увеличилась в 5 раз. На западном побережье архипелага отмечено озеро Ваттерндамен (Vetterndammen). Также формируется морено-подпрудное озеро Ратиорна (Ratjorna) – одно из крупных озёр в восточной части о. Шпицберген (см. табл. 3). Оно постепенно увеличивается в размерах за счёт таяния фронта ледника, спускающегося в озеро. С 1990 по 2022 г. его площадь увеличилась на 2.2 км².

Озеро Бретьерна (Bretjorna) – единственное озеро на западной территории архипелага, которое практически не изменилось в размерах с начала 1990-х годов. Оно образовано в котловине горно-долинных ледников Западный и Восточный Гренфьорд (рис. 5). Самые заметные изменения зеркала озера в связи с отступанием ледников Восточный и Западный Гренфьорд происходили ранее 1990 г. Изменения фронтов ледника и берега озера отражены в работе (Чернов, Муравьев, 2018).

Сравнение наших сведений о крупных приледниковых озёрах с инвентаризацией приледниковых озёр польских исследователей, опубликованной в 2023 г. (Wiczorek et al., 2023) показывает совпадение данных по большинству объектов по состоянию на 1991 и 2008–2012 гг. Это очевидно, так как измерения проводились с использованием одного и того же электронного ресурса (ресурс toposvalbard.npolar.no). Расхождения величин площади озёр не превышают 0.02 км² для 1991 г. и менее 0.01 км² для 2008–2012 гг. Тем не менее обнаружены расхождения в количестве крупных озёр. По состоянию на 2008–2012 гг. у нас числятся 35 озёр, а в польской инвентаризации – 31 озеро. Не учтены крупные озёра Бретьерна, Пенк, Речерч, Ратьорна, Листол, которые контактировали с ледниками в 2012 г. и соответственно должны быть включены в список. По-видимому, предложенная инвентаризация не является достаточно исчерпывающей, и сказывается субъективный фактор в выборе объектов. В нашем списке нет крупного озера Сторлик (Storlykkja), так как оно не приледниковое и образовано в естественной впадине на удалении от ледника Ауствонна (Земля Принца Оскара). Озеро питается ледниковой рекой (о чём свидетельствует перепад высоты

водной поверхности), поэтому озеро Сторлик не может контактировать с ледником.

Различия инвентаризаций в оценках суммарной площади крупных озёр составляют около 14 км², эту величину дают площади неучтённых озёр. Следует отметить, что принадлежность озера Листол к приледниковым озёрам – это спорный вопрос по причине того, что озеро образовано вследствие подвижки ледника Натхорст в 2000-х годах и подпруживания стока ледников Листольбрин и Докторбрин.

В целом, наши выводы относительно динамики озёр в последние три десятилетия совпадают. В обоих исследованиях отмечено, что в 1990-е годы процесс увеличения площади озёр был наиболее заметен и после 2012 г. замедлился.

Мы отметили лишь несколько случаев, указывающих на спуск крупных озёр. Вполне очевидно, что трансформация ландшафта после отступления ледников приводит к множеству таких событий. По данным (Wiczogoc et al., 2023) на архипелаге Шпицберген в период с 1936 по 2020 г. выявлено 134 случая осушения и прорыва приледниковых озёр. Наибольшая интенсивность этих событий характерна для последних трёх десятилетий. Чаще всего наблюдались прорывы морено-подпрудных озёр. В рассматриваемые периоды мы нашли шесть крупных приледниковых озёр, для которых характерно значительное падение уровня воды (см. табл. 4).

Для северных регионов характерна изменчивость уровней и площади зеркала озёр (Измайлова, 2020). Крупные приледниковые озёра Шпицбергена оказались не стабильны, изменения их площади велики. С 1991 г. до настоящего времени 35 крупных озёр увеличились на 65% (43.9 км²), а их площадь в 1991 и 2022 гг. – на 85.0% (128.9 км²) соответственно. Те озёра, уровень которых значительно понизился (см. табл. 4), уменьшились в размерах, их потери площади в 1991–2022 гг. составили 10.5 км². При этом потери объёма воды в озёрах в связи с понижением их уровней оказались очень большими и составили около 1.2 км³. Это сопоставимо с нашими оценками объёма всех приледниковых озёр Шпицбергена (Чернов, Ромашова, 2022). При этом суммарный объём приледниковых озёр равен или несколько превышает 2 км³ (как мы оценивали ранее) и сравним с оценками этой величины в Исландии и Скандинавии: 2.3 и 3.2 км³ соответственно (Shugar et al., 2020).

По результатам исследования отмечено, что возникновение крупных приледниковых озёр связано с условиями подпруживания, но их изменчивость во многом определяется процессами таяния морен и ледяных фронтов ледников. Для крупных приледниковых озёр архипелага характерна механическая абляция ледяных берегов.

Материалы аэрофотосъёмки НПИ показывают наличие плавающих айсбергов в акватории озёр. Механическая абляция и таяние льда ледяных фронтов способствует быстрому расширению площади озёр, и этот процесс характерен для многих регионов (Chernos et al., 2016; Watson et al., 2020; Zang et al., 2023). Предполагают, что в настоящий период основное увеличение площади крупных озёр происходит именно таким образом.

Динамика приледниковых озёр Шпицбергена в период 1991–2020 гг. подобна изменениям, выявленным на Тибетском плато (Zhang et al., 2017). Обнаружено значительное увеличение площади ледниковых озёр в Тибете до 2010 г. и в дальнейшем снижение темпов этого процесса. Вероятно, качественное совпадение хода экспансии озёр на арктическом архипелаге и крупнейшем высокогорном плато обусловлено общими климатическими трендами и схожими процессами их формирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе картографического сервиса НПИ на Шпицбергене выявлено множество озёр различного генезиса. По состоянию на 2008–2012 гг. насчитывалось 3790 озёр (размерами более 0.01 км²), а их суммарная площадь была равна 395 км². Большинство озёр – это небольшие и мелководные озёра, расположенные в естественных котловинах на прибрежной территории. Особая группа – приледниковые озёра, которые формируются в наше время в результате отступления ледников. Среди 60 крупных озёр архипелага (размером водного зеркала более 1 км²) 35 озёр – приледниковые и имеют ледяные берега, т.е. процесс их формирования продолжается. Их суммарная площадь составляет 127.6 ± 0.3 км² или треть площади всего озёрного фонда архипелага. Материалы аэрофотосъёмки НПИ показали, что крупные приледниковые озёра на западе архипелага образованы при подпруживании конечной мореной ледников или самими ледниками. На востоке характерны озёра, образованные в естественных котловинах на периферии покровного оледенения. Несмотря на различия климата и типа оледенения приледниковые озёра встречаются на всей территории архипелага.

Сравнение современного положения озёр с историческими данными выявили, что на западе архипелага большинство крупных приледниковых озёр образовалось на освободившихся от ледников территориях после 1936 г. Напротив, на востоке архипелага все крупные озёра уже существовали до 1936 г. Обработка спутниковых снимков показала, что крупные приледниковые озёра в последние десятилетия имели тенденцию к увеличению площади. На западе архипелага

этот процесс идёт активнее, чем на востоке. В 1991–2012 гг. укрупнение озёр шло интенсивно, но в следующем десятилетии процесс замедлился. За 30 лет увеличение площади крупных приледниковых озёр на западе составило 30.2 км² (113%). На востоке архипелага также отмечено укрупнение озёр в последние десятилетия, и после 1991 г. площадь возросла на 13.7 км² (22%).

Динамика крупных озёр различна, для некоторых озёр колебания их уровней и соответственно площадей могут достигать кратных значений. Самые масштабные изменения площади крупных озёр связаны с их прорывом через морену и подвижками ледников, спускающихся в озёра. По материалам аэрофотосъёмки НПИ выявлено шесть крупных озёр, уровни которых значительно упали в последние десятилетия. С 1991 по 2022 г. их площадь уменьшилась на 10.5 км², а суммарные потери объёма составили около 1.2 км³.

Таким образом, на территории архипелага наблюдается сложная картина формирования приледниковых озёр. На примере крупных приледниковых озёр мы отмечаем общую тенденцию увеличения их площади за счёт разрушения ледяных берегов, при этом отдельные события спуска подпрудных озёр могут иметь значительные масштабы. При интенсивном сокращении оледенения в период 1991–2012 гг. озёра заметно увеличились в размерах, но после 2012 г. процесс замедлился, хотя темпы дегляциации не уменьшились. В ближайшем будущем процесс формирования крупных озёр очевидно будет продолжаться, так как большинство из них имеет протяжённые ледяные берега. При этом динамика увеличения площади озёр будет зависеть от условий подпруживания отдельных крупных объектов.

Благодарности. Дистанционные исследования и анализ данных крупных приледниковых озёр Шпицбергена выполнены при поддержке гранта РФФ № 23-27-00312 “Формирование приледниковых озёр архипелага Шпицберген в условиях изменения климата”.

Acknowledgments. Remote survey and data analysis of the largest periglacial lakes of Svalbard was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-27-00312. “Formation of periglacial lakes of the Svalbard under the conditions of climate change”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Боронина А.С. Крупные прорывы озёр антарктических оазисов: обобщение современных знаний // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 141–160.
<https://doi.org/10.31857/S2076673422010122>

Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Хаткутов А.В. Эволюция озёр у ледника Джикиганкез (Северное Приэльбрусье) в 1957–2020 гг. с учётом подземных каналов стока // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 47–62.
<https://doi.org/10.31857/S2076673422010115>

Измайлова А.В., Корнеева Н.Ю. Озёрность территории Российской Федерации и определяющие её факторы // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 1. С. 16–25.

Муравьёв А.Я., Чернов Р.А. Прорыв ледниково-подпрудного озера Спартаковское и изменения вывального ледника купола Семенова-Тян-Шанского в 2021 г. (Северная Земля) // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 58–68.

Ромашова К.В., Чернов Р.А. О формировании новых приледниковых озёр в бассейне залива Грэнфьорд (Шпицберген) в 1938–2010 гг. // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 2. С. 193–202.
<https://doi.org/10.31857/S2076673422020125>

Чернов Р.А., Муравьёв А.Я. Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 462–472.

Чернов Р.А., Муравьёв А.Я. Природная катастрофа ледниково-подпрудного озера Спартаковское на острове Большевик (Северная Земля) // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 4. С. 58–68.

Чернов Р.А., Ромашова К.В. Современное состояние приледниковых озёр архипелага Шпицберген // Криосфера Земли. 2022. Т. 26. № 1. С. 36–45.

Box J.E., Ski K. Remote sounding of Greenland supraglacial melt lakes: implications for subglacial hydraulics // Journ. of Glaciology. 2007. V. 53 (181). P. 257–265.

Chernos M., Koppes M.N., Moore R.D. Ablation from calving and surface melt at lake-terminating Bridge Glacier, British Columbia, 1984–2013 // Cryosphere. 2016. V. 10. P. 87–102.

Hagen J.O., Liestol O., Roland E., Jørgensen T. Glacier atlas of Svalbard and Jan Mayen. Oslo: Norwegian Polar Institute. 1993. P. 1–169.

Liestol O., Repp K., Wold B. Supra-glacial lakes in Spitsbergen // Nor. Geogr. Tidsskr. 1980. V. 34 (2). P. 89–92.

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.

Mangerud J., Bolstad M., Elgersma A., Helliksen D., Landvik J.Y., Lonne I., Lycke A., Salvigsen O., Sandah T., Svendsen J. The last glacial maximum on western Svalbard // Quaternary Research. 1992. V. 38 (1). P. 1–31.

Nuth C., Kohler J., König M., Deschwanden A., Hagen J.O., Kaab A., Moholdt G., Pettersson R. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard // The Cryosphere. 2013. V. 7. P. 1603–1621.

Pfeffer W.T., Arendt A.A., Bliss A., Bolch T., Cogley J.G., Gardner A., Alex S., Hagen J.-O., Hock R., Kaser G., Kienholz C., Miles E.S., Moholdt G., Molg N., Paul F., Radić Rastner P., Raup B.H., Rich J., Sharp Martin J. and the Randolph Consortium. The Randolph Glacier Inventory: A globally complete inventory of glaciers //

- Journ. of Glaciology. 2014. V. 60 (221). P. 537–552.
<https://doi.org/10.3189/2014JoG13J176>
- Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K., Kargel J.S., Watson C.S., Kennedy M.C., Bevington A.R., Betts R.A., Harrison S., Strattman K. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990 // Nature Climate Change. 2020. V. 10 (10). P. 939–945.
- Urbański J.A. Monitoring and classification of high Arctic lakes in the Svalbard Islands using remote sensing // International Journ. of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. V. 112. P. 102911.
- Watson C.S., Kargel J.S., Shugar D.H., Haritashya U.K., Schiassi E., Furfaro R. Mass loss from calving in Himalayan proglacial lakes. // Front. Earth Science. 2020. V. 7. P. 342.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00342>
- Wieczorek I., Strzelecki M., Stachnik L., Yde J., Małeckki J. Post-Little Ice Age glacial lake evolution in Svalbard: Inventory of lake changes and lake types // Journ. of Glaciology. 2023. V. 1. P. 1–17.
<https://doi.org/10.1017/jog.2023.34>
- Zhang G., Yao T., Xie H., Wang W., Yang W. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming // Glob. Planet. Change. 2015. V. 131. P. 148–157.
- Zang G., Rounce D., Bolch T., Chen W. Underestimated mass loss from lake-terminating glaciers in the greater Himalaya // Nature Geoscience. 2023. V. 16 (4). P. 1–6.
<https://doi.org/10.1038/s41561-023-01150-1>
- Zhang G., Yao T., Shum C.K., Yi S., Yang K., Xie H., Feng W., Wang L., Behrangi A., Zang H., Wang W., Xiang Y., Yu J. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. // Geophys. Research Letters. 2017. V. 44. P. 5550–5560.
<https://doi.org/10.1002/2017GL073773>
- Cartographic materials of the Norwegian Polar Institute // Электронный ресурс. <https://toposvalbard.npolar.no/> (Дата обращения: 09.01.2023).

Citation: Chernov R.A., Romashova K.V. Large periglacial lakes on the Spitsbergen (Svalbard): state in 2008–2012 and dynamics in 1991–2022. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (4): 525–539 [In Russian]. doi 10.31857/S207667342304004X

Large Periglacial Lakes on the Spitsbergen (Svalbard): State in 2008–2012 and Dynamics in 1991–2022

R. A. Chernov^{a,*} and K. V. Romashova^b

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia*

^{*}*e-mail: chernov@igras.ru*

Received June 1, 2023; revised July 23, 2023; accepted October 2, 2023

Approximately 3,790 lakes of various genesis existed in the Svalbard archipelago in 2008–2012, the total area of which reached 395 km². Among them, periglacial lakes were new objects which had been formed since the beginning of the 20th century due to the deglaciation of the archipelago. We found 554 glacial lakes which areas exceeded 0.01 km². The total area of these lakes amounted to about a half of the area of all the lakes in the archipelago – 185 km², and two thirds of this value were large glacial lakes. The paper presents the spatial distribution of large periglacial lakes and variability of them caused by the climate warming in the archipelago. At present, there are 35 periglacial lakes (over 1 km² in size); all of them are in contact with glaciers and the greater part of them are dammed by the terminal moraines or by a glacier itself. According to the cartographic data of the Norwegian Polar Institute and satellite images, the areas of large lakes were determined successively in 1991, 2002, 2012, and 2022. For the period from 1991 to 2012, there was a twofold increase in their area from 24.4 to 53.7 km², but in 2012–2022 this process slowed down. On the east of the archipelago, where the inland ice is widespread, the process of the lake formation is much slower. It had been noted that on the west all large glacial lakes were formed after 1936 due to active retreat of the glaciers. At the same time, both on the north and east, most of the large glacial lakes existed prior to 1936. During the periods under consideration, changes in the areas of individual objects reached multiple values. The most large-scale changes in the lake areas were associated with the ablation of glacial fronts in contact with the lake, a glacier surge, and outbursts of a few dammed lakes. Six lakes were identified, where the water level drop reached tens of meters. Despite the slowdown in the formation of lakes in the last decade, the enlargement of lakes continues. Relative increase in the total area of the large periglacial lakes over the past 30 years on the west and east of the archipelago is in direct proportion to decreasing in glaciation of these regions. Thus, the process of formation of large periglacial lakes may be used as an indicator of climate change in the archipelago.

Keywords: ice-dammed and moraine-dammed lakes, area of lakes, lake level, ice shores, Svalbard

REFERENCES

- Boronina A.S.* Large outbursts of lakes of the Antarctic oases: generalization of modern knowledge. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (1): 141–160 [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010122>
- Dokukin M.D., Savenyuk E.A., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Khatkutov A.V.* Evolution of lakes near the Jikiungankez glacier (Northern Elbrus region) in 1957–2020 including underground drainage channels. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (1): 47–62 [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010115>
- Izmailova A.V., Korneenkova N.Yu.* The lake character of the territory of the Russian Federation and its determining factors *Vodnie Resursy*. *Water resources*. 2020, 47 (1): 16–25 [In Russian].
- Muravyov A.Ya., Chernov R.A.* Breakthrough of the ice-dammed lake Spartakovskoye and changes in the outlet glacier of the Semenov-Tyan-Shansky dome in 2021 (Severnaya Zemlya). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (1): 58–68 [In Russian].
- Romashova K.V., Chernov R.A.* On the Formation of New Glacial Lakes in the Basin of the Grönfjord Bay (Spitsbergen) in 1938–2010. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (2): 193–202 [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S2076673422020125>
- Chernov R.A., Muravyov A.Ya.* Modern changes in the area of glaciers in the western part of Nordenskiöld Land (Spitsbergen archipelago). *Led i Sneg. Ice and snow*. 2018, 58 (4): 462–472 [In Russian].
- Chernov R.A., Muravyov A.Ya.* Natural catastrophe of the ice-dammed lake Spartakovskoe on Bolshevik Island (Severnaya Zemlya). *Kriosfera Zemli. Earth Cryosphere*. 2020, 24 (4): 58–68 [In Russian].
- Chernov R.A., Romashova K.V.* The current state of the glacial lakes of the Spitsbergen archipelago. *Kriosfera Zemli. Earth Cryosphere*. 2022, 26 (1): 36–45 [In Russian].
- Box J.E., Ski K.* Remote sounding of Greenland supraglacial melt lakes: implications for subglacial hydraulics. *Journ. of Glaciology*. 2007, 53 (181): 257–265.
- Chernos M., Koppes M.N., Moore R.D.* Ablation from calving and surface melt at lake-terminating Bridge Glacier, British Columbia, 1984–2013. *Cryosphere*. 2016, 10: 87–102.
- Hagen J.O., Liestol O., Roland E., Jørgensen T.* Glacier atlas of Svalbard and Jan Mayen. Oslo: Norwegian Polar Institute. 1993: 1–169.
- Liestol O., Repp K., Wold B.* Supra-glacial lakes in Spitsbergen. *Nor. Geogr. Tidsskr.* 1980, 34 (2): 89–92.
- Kohler J., James T.D., Murray T., Nuth C., Brandt O., Brand N.E., Aas H.F., Luckman A.* Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers. *Geophys. Research Letters*. 2007, 34 (18): L18502.
- Mangerud J., Bolstad M., Elgersma A., Helliksen D., Landvik J.Y., Lonne I., Lycke A., Salvigsen O., Sandah T., Svendsen J.* The last glacial maximum on western Svalbard. *Quatern. Research*. 1992, 38 (1): 1–31.
- Nuth C., Kohler J., König M., Deschwanden A., Hagen J.O., Kaab A., Moholdt G., Pettersson R.* Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard. *The Cryosphere*. 2013, 7: 1603–1621.
- Pfeffer W.T., Arendt A.A., Bliss A., Bolch T., Cogley J.G., Gardner A., Alex S., Hagen J.-O., Hock R., Kaser G., Kienholz C., Miles E.S., Moholdt G., Molg N., Paul F., Radić Rastner P., Raup B.H., Rich J., Sharp Martin J. and The Randolph Consortium.* The Randolph Glacier Inventory: A globally complete inventory of glaciers. *Journ. of Glaciology*. 2014, 60 (221): 537–552. <https://doi.org/10.3189/2014JoG13J176>
- Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K., Kargel J.S., Watson C.S., Kennedy M.C., Bevington A.R., Betts R.A., Harrison S., Strattman K.* Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*. 2020, 10 (10): 939–945.
- Urbaniski J.A.* Monitoring and classification of high Arctic lakes in the Svalbard Islands using remote sensing. *Intern. Journ. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022, 112: 102911.
- Watson C.S., Kargel J.S., Shugar D.H., Haritashya U.K., Schiassi E., Furfaro R.* Mass loss from calving in Himalayan proglacial lakes. *Front. Earth Sci.* 2020, 7: 342. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00342>
- Wieczorek I., Strzelecki M., Stachnik L., Yde J., Małeckki J.* Post-Little Ice Age glacial lake evolution in Svalbard: Inventory of lake changes and lake types. *Journ. of Glaciology*. 2023, 1: 1–17. <https://doi.org/10.1017/jog.2023.34>
- Zhang G., Yao T., Xie H., Wang W., Yang W.* An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. *Glob. Planet. Change*. 2015, 131: 48–157.
- Zang G., Rounce D., Bolch T., Chen W.* Underestimated mass loss from lake-terminating glaciers in the greater Himalaya. *Nature Geoscience*. 2023, 16 (4): 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01150-1>
- Zhang G., Yao T., Shum C.K., Yi S., Yang K., Xie H., Feng W., Wang L., Behrangi A., Zang H., Wang W., Xiang Y., Yu J.* Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. *Geophysical Research Letters*. 2017, 44: 5550–5560. <https://doi.org/10.1002/2017GL073773>
- Cartographic materials of the Norwegian Polar Institute.* Retrieved from: <https://toposvalbard.npolar.no/> (Last access: January 09, 2023).