

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.324, 556.5

ДИНАМИКА ОЗЁР НА ЛЕДНИКЕ ФЕДЧЕНКО ЗА 2016–2021 гг.

© 2025 г. С. В. Косковецкая

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

e-mail: svkoskovetskaya@edu.hse.ru

Поступила 14.08.2024 г.

После доработки 16.11.2024 г.

Принята к печати 25.12.2024 г.

Малый уклон и сплошной моренный покров ускоряют развитие озёр на последних 11.5 км ледника Федченко на Памире. Рассматриваются площади озёр за 2016–2021 гг., выделенных на основе двух индексов по снимкам Sentinel-2. Озёра в сумме занимали около 2% площади участка, но значительно поменялись амплитуда их площади и режим, выросла сумма положительных температур, а относительная площадь небольших озёр удвоилась.

Ключевые слова: ледниковые озёра, автоматизированное дешифрирование, ледник Федченко, Памир

DOI: 10.31857/S2076673425010036, EDN: GZLRNT

ВВЕДЕНИЕ

Супрагляциальные озёра формируются путём накопления талой воды в понижениях на поверхности ледников. Каждый год в сезон абляции они появляются практически в одних и тех же местах, что обусловлено неизменностью местоположения понижений в рельефе подледникового ложа. Если вода в понижениях остаётся до конца периода абляции, то зимой она замерзает, в ином же случае просачивается через трещины и каналы во льду или стекает по поверхности ледника (Melling et al., 2023).

Отметим, что в период с 1990 по 2018 г. объём ледниковых озёр во всём мире увеличился на 48% (Lützow et al., 2023). Это подтверждается в работах, рассматривающих конкретные ледники и ледниковые долины в разных частях планеты (Stokes et al., 2007; Wendleder et al., 2021; Veettil, Kamp, 2021).

Супрагляциальные озёра активно исследуются на востоке высокогорной Азии. По нескольким ледникам Тибетского района Кхумбу был сделан важный вывод, касающийся общего тренда увеличения площади супрагляциальных озёр за 6-летний период (2017–2022 гг.), но не за счёт расширения уже существующих озёр, а из-за появления новых небольших водоёмов. Так, с каждым годом рост количества небольших озёр влияет на увеличение фильтрации, понижение альбедо поверхности ледника и, как следствие, на ускорение его таяния. Кроме того, был выявлен парадокс: рост площади супрагляциальных озёр приходился на зимние месяцы, что не должно происходить в период аккумуляции. Тем не менее есть гипотеза, что увеличенное количество

поглощаемой радиации в местах с тонким моренным покровом приводит к преждевременному таянию льда под этим слоем и формированию супрагляциальных озёр даже зимой. А так как фильтрация из-за замерзания во всех частях ледника в это время года мала, то озёра остаются на месте уже до начала периода абляции (Zeller et al., 2023).

В этом же районе, но уже на леднике Балторо, была проведена оценка доли площади, занятой супрагляциальными озёрами в разных его частях с 2016 по 2020 г. С каждым годом на леднике увеличивалось количество осадков и температура, но при этом явной корреляции с суммарной площадью озёр не было выявлено. Тем не менее выяснилось, что больше всего эта доля растёт на границе областей абляции и аккумуляции – активно развивается таяние ледника и его фирновая линия смещается вверх (Wendleder et al., 2021).

Сильно отличается от Азии динамика развития озёр на ледниках Альп: там с каждым сезоном растут супрагляциальные озёра преимущественно очень большого размера. То есть, они остаются каждый год в одном и том же понижении и становятся больше из-за увеличения притока вод. Кроме того, в Альпах много ледниково-подпрудных озёр на краях ледников, наиболее опасных с точки зрения их прорывов. Такие озёра накапливаются по несколько лет, они относительно стабильны по своей площади и объёму (Cook, Quincey, 2015).

В других регионах, где есть продолжительный период наблюдений – на Кавказе и в Кордильерах – наблюдается такая же тенденция

к увеличению количества и площади супрагляциальных, приледниковых и ледниково-подпрудных озёр. В разных частях Перуанских Кордильер с 1985 по 2015 г. ледники потеряли от 51 до 62% своей площади, из-за чего образовалось множество новых озёр: их количество выросло с 247 до 329, с общей площадью более 3.8 км² (Veettil, Kamp, 2021). На ледниках Кавказа последние 50 лет увеличивается площадь со сплошным моренным покровом. Таким образом, появляется больше места для формирования супрагляциальных озёр: по подсчётам в долине Адылсу количество зафиксированных озёр с 1985 по 2000 г. увеличилось с 16 до 24 (а их площадь выросла с 0.2423 до 0.3815 км²), то есть их стало почти в два раза больше (Stokes et al., 2007).

Супрагляциальные озёра могут влиять на ледники по-разному. Вода поглощает больше солнечной радиации, чем лёд, и это приводит к увеличению скорости таяния ледников. Кроме того, если вода затекает в трещины во льду, достаточно большие по размеру для того, чтобы попасть на ложе ледника, то скольжение ледника усиливается и, следовательно, увеличивается его общая скорость движения. Сама динамика супрагляциальных озёр отличается их быстрой фильтрацией в сезон абляции и непредсказуемым формированием новых небольших озёр, в то время как приледниковому озеру свойственно накапливать талую воду к концу сезона, оставаясь в сопоставимых границах. При изучении особый интерес может представлять оценка разницы изменений в сезонной суммарной площади между супрагляциальными и приледниковыми озёрами (Wendleder et al., 2021). При этом в моделях, воспроизводящих реакцию гидрологических ресурсов на потерю массы ледников, при расчётах часто не учитывается вода супрагляциальных озёр из-за их малого размера и нестабильности (Bazilova, Kääb, 2022).

Помимо этого, с некоторыми озёрами, преимущественно ледниково-подпрудными, связана группа проблем, касающаяся их периодических прорывов. Известно, что есть прямая корреляция между потеплением климата и увеличением количества прорывов: во время похолодания 1990-х годов количество прорывов в Высокогорной Азии снизилось до уровня 1950-х, а их пик наблюдался в 1970-х, когда ледники Памира и других регионов испытывали интенсивное таяние во время потепления (Lützow et al., 2023).

Ледник Федченко на Памире был выбран в качестве объекта исследования, так как о динамике его приледниковых и ледниково-подпрудных озёр, а также супрагляциальных озёр известно немного по сравнению с ледниками восточной части региона Высокогорной Азии, Альпийского региона и Кордильер. При этом данный ледник имеет малый уклон поверхности, сплошной моренный покров и низкие скорости движения, что даёт

положительный эффект для развития супрагляциальных озёр.

Цель исследования — проследить за динамикой морфометрических параметров трёх упомянутых выше видов озёр, выделенных автоматизированным дешифрированием на леднике Федченко на Памире.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовался участок поверхности ледника в его нижней части протяжённостью 11.4 км, который имеет наибольшую плотность распределения супрагляциальных озёр и моренного покрова. Диапазон высот на этом участке варьирует от 2900 до 3600 м над ур. моря. Для выделения границ участка использовался векторный слой границ ледников в каталоге Randolph Glacier Inventory Version 7 (рис. 1). Верхняя граница участка проводилась не



Рис. 1. Область исследования на леднике Федченко. Высотные диапазоны в м над ур. моря: 1 — 2900–3100, 2 — 3100–3300, 3 — 3300–3600

Fig. 1. Study area on Fedchenko Glacier. Altitude ranges (m a.s.l.): 1 — 2900–3100, 2 — 3100–3300, 3 — 3300–3600

по горизонтали 3600 м, а по ломаной линии, захватывая часть крупных регулярных озёр на леднике.

Ледник Федченко — самый большой ледник Памира. Его общая площадь в 2011 г. достигала 579.9 км², он занимал 26% гляциальной зоны. Располагается на высотах от 2900 до 5400 м с высотой границы питания 4700–4800 м. Последние 7 км ледника покрыты моренными отложениями при общей длине ледника в 72 км и среднем уклоне языка в 2° (Lambrecht et al., 2018).

Средние летние температуры воздуха на леднике Федченко ниже, чем в соседних бассейнах: в его средней высотной зоне температура июля составляет около 4 °С, а в фирновой не выше –2 °С. Кроме того, северная экспозиция ледника снижает влияние преобладающих юго-западных воздушных масс. На метеостанции им. Горбунова (38.8° с. ш., 72.2° в. д.), расположенной на 4169 м, в 1930–1990 гг. наблюдался тренд повышения температуры на 0.005 °С в год, со средней летней температурой около 7 °С, с чем связывали уменьшение небольших ледников Восточного Памира на 20% в этот период. По относительным оценкам суммарное уменьшение всей площади ледниковой системы Федченко в тот же период составило всего 0.005% (–2.85 км²), что крайне незначительно. Тем не менее стоит обратить внимание на нижнюю часть ледника: за период 1928–1968 гг. язык ледника сократился в длину на 460 м (Lambrecht et al., 2014).

Что касается скорости движения ледника, то в 1939–1968 гг., по данным метеостанции Ледник Федченко, нарастание скорости движения происходит на 2/3 площади ледника, начиная с верховьев, а в нижней трети она уменьшается, падая почти до нуля у края. В средней, самой активной части, средняя скорость достигает 252 м/год, то есть 69 см/сут, в фирновой зоне 60 см/сут, на языке — 40 см/сут. Средняя скорость по всей поверхности составляет 126 м/год или 34.5 см/сут (Каталог ледников СССР, 1968). Сезонный максимум скорости наблюдается дважды — в марте, когда осадков выпадает больше всего, и в августе, при максимальной температуре воздуха. По новым наблюдениям со спутника TerraSAR-X и полевым GPS измерениям, скорости

в 2009 и 2010 гг. в средней части ледника были 242–248 м/год, т.е. изменения в скорости движения ледника по сравнению с данными предыдущих измерений очень малы (Lambrecht et al., 2014).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Чтобы подобрать способ идентификации озёр, было выбрано по три тестовых снимка из коллекции Sentinel-2 MSI за сезоны абляции в 2017, 2019 и 2021 гг. Затем, когда способы идентификации были опробованы, к тестовому набору данных были добавлены снимки из той же коллекции за сезоны абляции периода 2016–2021 гг., по несколько снимков за каждый месяц, и из коллекции Landsat 8 для заполнения пробелов в данных. Все собранные снимки безоблачны, так как проверялись сразу при выборе в GEE.

Данные по температуре и осадкам были взяты из глобального интерполированного грида ERA5 (Muñoz, 2019). Он содержит большое количество переменных, описывающих климатические изменения, осреднённые за каждый час каждого дня. Из них были выбраны две: температура на высоте двух метров, переведённая из К в °С, и осадки, которые на входе тоже сразу переводились из м в мм. На участок попадали два тайла грида разрешением 0.5° на 0.5° каждый, поэтому они были обрезаны по контуру участка, а из их значений выведено среднее на всю исследуемую область. Обе переменные выгружались в формате csv через функцию ui.Chart.image.series в Google Earth Engine (GEE) и в дальнейшем осреднялись за день. В табл. 1 указаны использованные данные и их параметры, точки с датами снимков и выделением снимков с Sentinel-2 и Landsat 8 показаны.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Так как супрагляциальные озёра находятся на поверхности ледника, их можно дешифрировать по оптическим снимкам. Чаще всего для оценки динамики площади таких озёр используются снимки PlanetScope с разрешением 3 м, Sentinel-2 с разрешением 10 м или Landsat 8 с разрешением 30 м, на которых хуже различимы отдельные небольшие

Таблица 1. Параметры используемых данных

Источник данных	Разрешение	Количество использованных снимков/переменных
COPERNICUS/S2_HARMONIZED, Google Earth Engine	10 м	73
LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA, Google Earth Engine	30 м	13
ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_BY_HOUR, Google Earth Engine	0.5°	2

озёра, но прослеживается сезонный тренд изменения площади.

При идентификации супрагляциальных, приледниковых и других озёр могут возникать две основные проблемы. Первая из них касается ограничения из-за выпадающего с ноября по март снега, озёра замерзают и покрываются снежным покровом, их нельзя детектировать. Вторая заключается в том, что падающие на топографические понижения тени служат источником дополнительных ошибок при дешифрировании.

В современных исследованиях используются рассчитанные индексы, отвечающие за детектирование разных покровов ледника. Их можно использовать для автоматизированного дешифрирования, как, например, в работе по идентификации супрагляциальных озёр на востоке Высокогорной Азии, основанной на машинном обучении по пикселям (Smith, 2022). Было выбрано несколько спутниковых снимков Sentinel-2 Level 1C TOA за сезон в качестве обучающей выборки, создавались спектральные индексы NDWI (Normalised Difference Water Index), SI (Shadow Index) и другие для подготовки изображения к классификации по пикселям. Изображения классифицировались посредством кластеризации методом k-средних, основанном на минимизации квадрата расстояния между каждой точкой данных и центром кластера. Далее выделенные на снимках озёра (класса “вода”) использовали для обучения на основе случайного леса, чтобы в дальнейшем данную модель можно было использовать для выделения супрагляциальных озёр на других ледниках (Smith, 2022).

Для данной работы тоже были применены индексы, отвечающие за детектирование разных покровов ледника. Они применялись к собранным внутри GEE снимкам. Из рассмотренных индексов были выбраны два, которые наиболее контрастно показывают озёра: NDWI и SAVI_{mod} (табл. 2) (Smith, 2022).

Для эффективного использования этих индексов был написан скрипт функции, создающей маску из заданного верхнего и нижнего порогов для класса воды, весь остальной участок переходит в класс “не водных” объектов. Для значений NDWI важным было выставить такие пороги, чтобы они захватывали открытую воду, но не лёд или снег. Значения SAVI_{mod} между водой и моренным покровом изначально оказались достаточно

контрастными, и вода занимала в них минимальные значения. После маскирования два полученных растра соединялись и выводился средний между ними. Был создан скрипт функции для выделения озёр, где вводится снимок и полигон для вырезания участка.

Работа функции, идентифицирующей границы озёр на основе индексов, строится следующим образом: заданный снимок сразу на входе вырезается по полигону; из него высчитываются индексы NDWI и SAVI_{mod} с расчётом растра среднего значения, создаются бинарные растры с классом “воды” (1) и “не воды” (0); по маске класса воды создаётся векторный слой и, далее он экспортируется для сбора статистических данных.

Для того чтобы проверить достоверность выделенных озёр, из коллекции был случайным образом выбран снимок Sentinel-2 от 29.05.2018, для которого проводилось ручное дешифрирование. Затем получившиеся площади полигонов озёр, обведённых вручную (всего 128 озёр), сравнивались с полигонами, выделенными автоматически (около 200 озёр), чтобы оценить, насколько завышаются или занижаются значения площадей озёр (рис. 2). Наклон прямой тренда (1.036) мало отходит от центральной оси, но сильнее завышаются значения крупных озёр при автоматизированном дешифрировании, в то время как небольшие идентифицируются более точно. Корреляция между значениями площадей по ручному и автоматизированному дешифрированию составляет более 98%.

При обработке полигонов в ArcGIS ставилась минимальная площадь озёра в 900 м², так как у снимков с Landsat 8 и Sentinel-2 отличалось разрешение. Подобная фильтрация позволяла убирать шум в слоях, отмечая случайно выделенные пиксели льда и снега. Кроме того, несмотря на точное определение границ, на некоторых летних снимках возникала проблема с выделением свежевывающего снега в верхнем высотном диапазоне в качестве водных объектов. Вследствие этого завышалась суммарная площадь — такие выбросы хорошо отслеживались на общих точечных графиках суммарной площади по каждому использованному снимку, и лишние пиксели удалялись вручную. Для объективности полученных результатов в площадях озёр рассчитывалась оценка неопределённости на основе буферного метода: выстраивался буфер в ½ пикселя вокруг полигонов (Paul et al., 2017).

Таблица 2. Выбранные для идентификации индексы — нормализованный водный индекс разности, модифицированный индекс растительности с поправкой на почву

Индекс	Формула	Что детектирует
Normalised Difference Water Index (NDWI)	$(B_{Green} - B_{NIR}) / (B_{Green} + B_{NIR})$	Водные объекты
Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI _{mod})	$(B_{Green} - B_{NIR}) / (B_{Green} + B_{NIR} + 1) \times 2$	Моренный покров

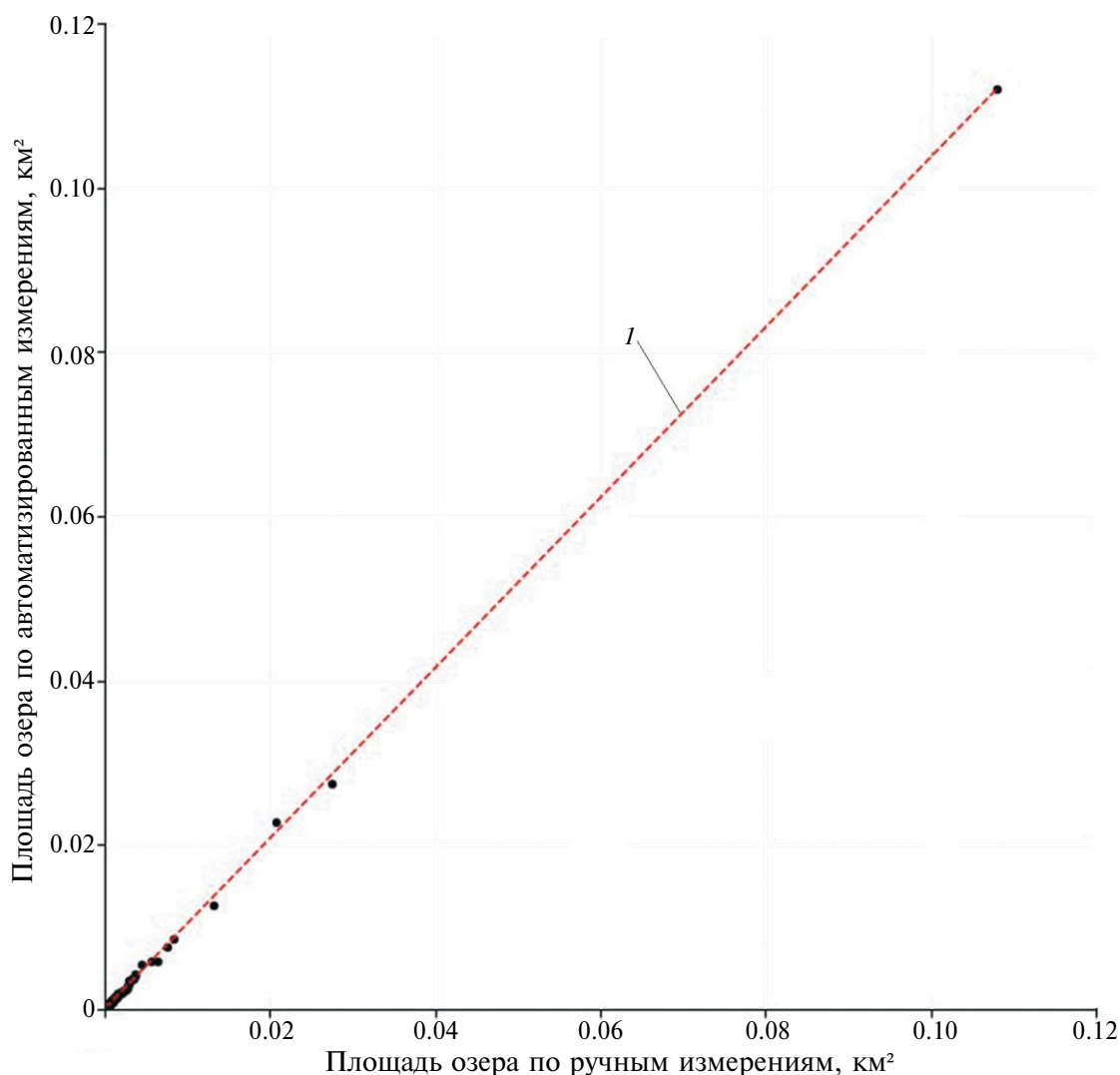


Рис. 2. Диаграмма разброса значений площадей ледниковых озёр по ручным и автоматизированным измерениям за снимок Sentinel-2 от 29.05.2018. *I* – линия тренда, наклон составляет 1.036

Fig. 2. Spread of area values of supraglacial lakes by manual and automated measurements from Sentinel-2 scene by 29.05.2018. *I* – trendline with value of inclination 1.036

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ динамики площадей трёх типов озёр – приледниковых, ледниково-подпрудного и супрагляциальных – проводился по полученным с помощью GEE и ArcGIS таблицам с данными о площадях по датам выгруженных снимков. Рассматривались как параметры площади по всему участку, так и по двум 200-метровым и одному 300-метровому высотным диапазонам, рассчитанным через ЦМР ALOS AW3D30: нижний – 2900–3100 м, средний – 3100–3300 м, верхний – 3300–3600 м над ур. моря.

Графики, основанные на измерении суммарной площади во времени, могут показать общий тренд изменения. Положительный тренд объясняется

разными причинами в зависимости от расположения: высотой местоположения озёр, изменением баланса массы ледника или общим повышением средней температуры со временем (Benn et al., 2012). Кроме того, по графикам следят за прорывами ледниково-подпрудных озёр: если площадь резко уменьшается за один год, то, скорее всего, произошёл прорыв (Bazilova, Kääb, 2021).

В данной работе площади суммировались за каждую дату по всей исследуемой области, полученные значения представлены в км² (рис. 3). В течение сезона амплитуда значений варьирует от 0.15 ± 0.008 км² в 2016 г. до 0.3 ± 0.011 км² в 2021 г. Минимум 2018 г. связан с найденным на начало апреля снимком, где снег уже не лежит на всей поверхности участка, но период таяния ещё не

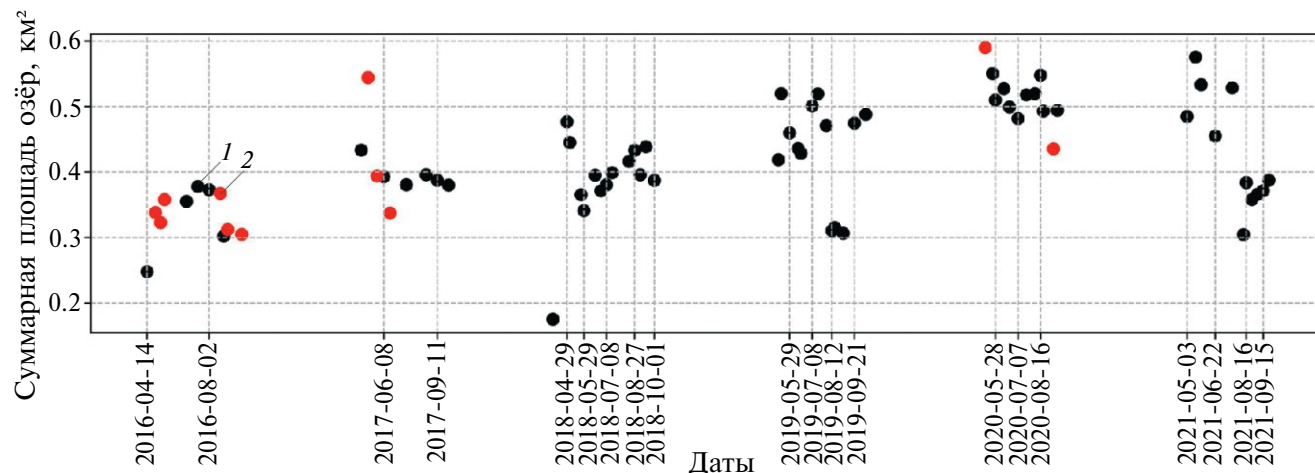


Рис. 3. График сезонных изменений суммарной площади ледниковых озёр за 2016–2022 г. 1 — снимки с Sentinel-2, 2 — снимки с Landsat 8

Fig. 3. Seasonal changes in the total area of glacial lakes, 2016–2022. 1 — scenes from Sentinel-2, 2 — scenes from Landsat 8

начался в полной мере. Если в 2016 г. нет ярко выраженного пика, то в два последующих года он один — связанный с началом сезона абляции и интенсивным таянием накопленного снега, а в период с 2019 по 2021 г. выделяются по два пика — в мае, по той же причине, и в июле, которые могут относиться к влиянию разных факторов: повышению температуры, количеству осадков, увеличению дренажа. Увеличение площади озёр чаще всего происходит в мае, июле и сентябре. Если посмотреть на график за весь рассмотренный период в 6 лет, можно увидеть не явный, но положительный тренд роста площади с каждым годом.

Для подробного анализа взаимосвязей между климатическими факторами и площадями озёр были рассмотрены сезонные зависимости площади ледниковых озёр по датам снимков от средних суточных значений температуры и суточных сумм осадков по интерполированным данным ERA5 (рис. 4). Для 2016 г. было отобрано меньше точек в связи с ограниченным количеством доступных снимков Sentinel-2. Тем не менее можно заметить, что пика площади озёр из-за таяния в мае, несмотря на большое количество осадков в регионе, не произошло. Площадь озёр варьирует в малом диапазоне ($0.15 \pm 0.008 \text{ км}^2$) и начинает уменьшаться к сентябрю. В следующем 2017 г. график похож на классический сценарий сезонного развития ледниковых озёр: их площадь наибольшая в мае и начинает снижаться к лету по мере повышения средней ежедневной температуры. Амплитуда площади внутри сезона больше, чем в предыдущем году, на $0.1 \pm 0.006 \text{ км}^2$. В 2018 г. температуры конца апреля и начала мая были ниже, чем в предыдущем году, что отразилось на суммарной площади озёр — максимальное значение за сезон практически

на $0.07 \pm 0.006 \text{ км}^2$ меньше, чем в 2017 г. Несмотря на пониженные температуры, пик 2018 г. приходится на треть месяца раньше, чем в предыдущий период, что можно связать со значительно увеличенным объёмом осадков — локальные максимумы месяца на 5 мм больше, чем в предыдущем сезоне. 2019 год характеризуется увеличенной амплитудой абсолютных значений суммарной площади внутри сезона. Майский пик в связи с началом сезона абляции соизмерим с максимальным в 2017 г. — озёра занимают площадь более $0.5 \pm 0.013 \text{ км}^2$. Абсолютные значения температур в мае в 2019 г. выше, чем в предыдущий год, на $3\text{--}4^\circ$. Повышенная температура держалась и в продолжение периода абляции, при малом количестве осадков в июле — там наблюдается падение площади на $0.2 \pm 0.009 \text{ км}^2$. В следующем 2020 г. амплитуда значений площади озёр намного меньше, но при этом режим её изменений похож на 2019 г. — максимумы значения площади (больше $0.5 \pm 0.013 \text{ км}^2$) наблюдаются и весной, и летом. Кроме того, площадь в среднем становится больше, и её максимальное значение уже приближается к $0.6 \pm 0.015 \text{ км}^2$ при высоких значениях температуры (до $7\text{--}8^\circ \text{C}$) и осадков (до 15 мм в конце июня и до 10 мм в конце августа). Последний рассмотренный 2021 год, как и 2019 г., характеризуется большой амплитудой абсолютных значений площадей (около $0.3 \pm 0.011 \text{ км}^2$ за сезон). Устойчиво высокие температуры во вторую половину сезона (выше 0°C), сопровождающиеся максимально высокой температурой за весь изучаемый период (около 10°C) в конце июля, могли привести к уменьшению суммарной площади озёр после середины августа до значений $< 0.4 \pm 0.013 \text{ км}^2$, что ниже аналогичного периода в 2020 г., когда было больше осадков.

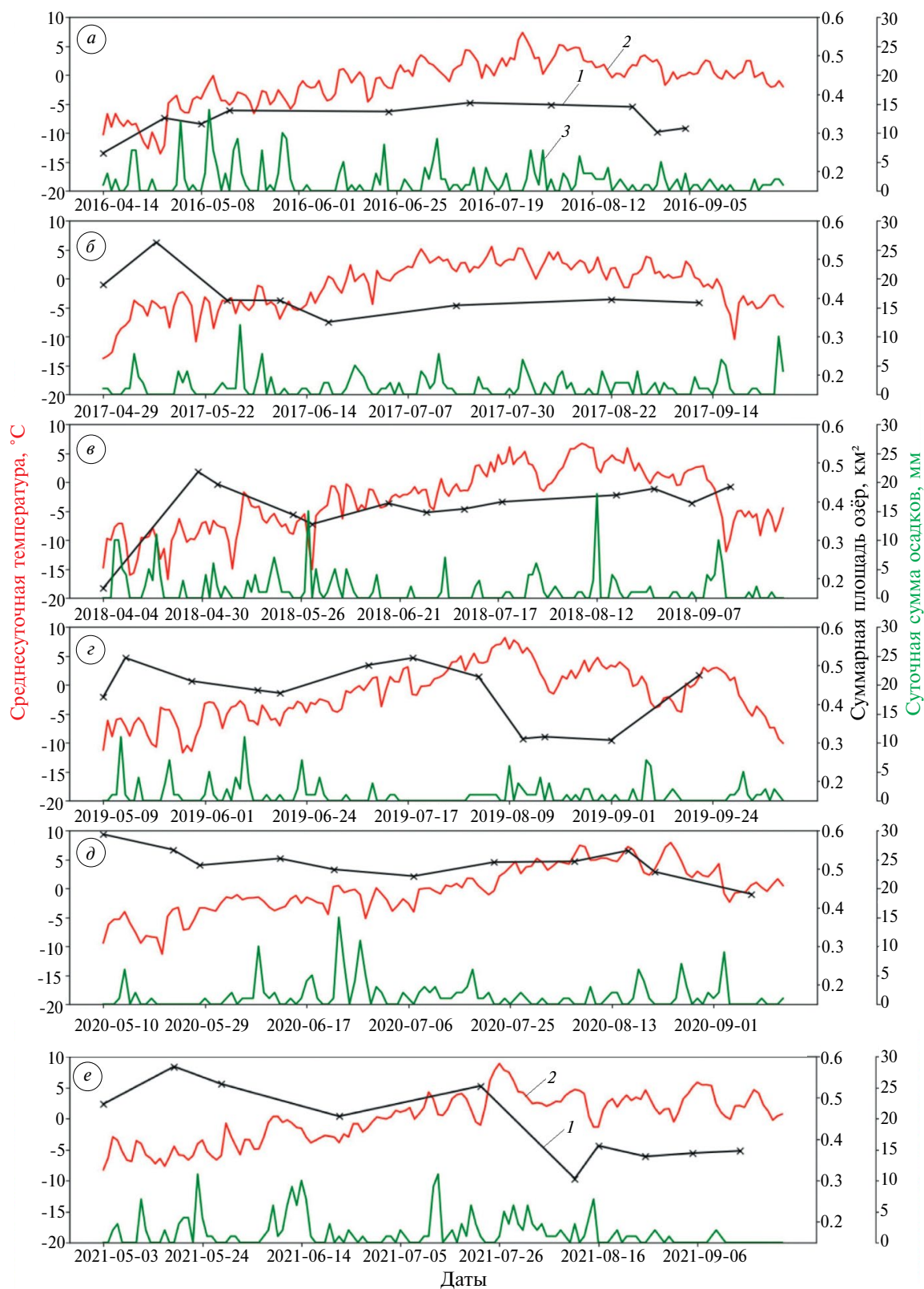


Рис. 4. Графики сезонного распределения суммарной площади озёр (1) в сравнении с температурой (2) и осадками (3). Сезоны: а – 2016, б – 2017, в – 2018, г – 2019, д – 2020, е – 2021

Fig. 4. Seasonal distribution of the total area of lakes (1) in comparison with temperature (2) and precipitation (3). Seasons: а – 2016, б – 2017, в – 2018, г – 2019, д – 2020, е – 2021

На изучаемом участке отдельно рассматривались два крупных озера — приледниковое в нижнем диапазоне высот и подпруженное моренной в верхнем, которые сильно влияют на результаты анализа по площадям, так как занимают около половины площади диапазона. Чтобы узнать, действительно ли велики отличия в динамике, в верхнем и нижнем диапазонах из суммарной площади озёр была вычтена максимальная, и сравнивались суммы площадей небольших озёр на поверхности ледника с площадями двух крупных (рис. 5, *а–б*). В первые исследуемые года площадь крупных озёр повышалась к концу сезона, а небольших, наоборот, понижалась, что хорошо отражает график за 2016 год. Затем динамика приледникового озера изменилась, и его площадь к сентябрю начала падать, притом что супрагляциальные озёра на поверхности ледника в нижнем диапазоне начали набирать площадь к концу сезона, и к 2020 г. их площадь на пике оказалась в 2 раза больше, чем 4 года назад — произошло увеличение с 0.09 ± 0.006 до 0.18 ± 0.009 км². Приледниковое озеро, несмотря на смену режима с течением сезонов, не так значительно увеличилось в площади за это время — на 0.3 ± 0.011 км². В верхнем диапазоне не произошло серьёзных изменений в динамике, но можно заметить, что площадь небольших озёр относительно ледниково-подпрудного меняется быстрее, при этом оно с каждым сезоном дольше набирается и медленнее увеличивается в площади — на графиках 2016 и 2020 гг. прослеживается, что начало преобладания площади крупного озера верхнего диапазона над суммарной площадью небольших озёр сдвигается примерно на два месяца за такой небольшой временной период.

Чтобы корректно рассмотреть долю ледниковых озёр от общей площади участка или высотного диапазона за каждый сезон, вычислялась доля по суммарной площади трёх рассмотренных типов озёр вместе и отдельно доля по площади только супрагляциальных озёр. Суммарная площадь на каждый год медианная, так как количество снимков за год не одинаковое (рис. 5, *в–е*). На графике по всему участку динамики обеих сумм площадей схожи, с ростом до пика в 2% в 2020 г. и уменьшением на 0.4% в следующем. Если сравнивать между собой доли в высотных диапазонах, то видно, что доля всех озёр в верхнем диапазоне из года в год

меняется незначительно, мало того, она даже увеличивается в 2021 г. несмотря на общее значительное понижение. Площадь остальных озёр в этом диапазоне занимает всего около 0.5% от общей площади. Самые значительные относительные перепады доли площади от общей наблюдаются в среднем высотном диапазоне, состоящем только из супрагляциальных озёр — доля площади от 2020 к 2021 г. падает почти вдвое, на 0.5%. Самую большую долю, около 5% в 2020 г., озёра занимают в нижнем диапазоне, так как приледниковое озеро самое крупное из рассматриваемых.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В сравнении сезонов между собой прослеживается постепенная смена режима изменения суммарной площади ледниковых озёр внутри сезона. От классического режима с пиком площади озёр в начале мая, когда значения снегового таяния самые высокие, он переходит в режим с двумя пиками, где второй пик наблюдается в июле, что можно объяснить повышением температур воздуха во второй половине сезона абляции. Осадки начинают оказывать более значительное влияние по сравнению с таянием как раз во вторую половину — если осадков в сезон оказывается недостаточно, то площадь к концу сезона только уменьшается, в обратном же случае, наоборот, она может увеличиваться к концу сентября и началу октября.

На основе этого замечания было проверено, как выделенные закономерности соотносятся с суммами положительных температур и осадками уже между сезонами изученного временного периода, и как они вписываются в контекст климатической нормы температур данного региона. Были составлены графики по накопленным за каждый сезон абляции (14 апреля — 14 октября) положительным температурам воздуха и значениям медианной суммарной площади озёр за этот сезон (рис. 6).

Самым тёплым годом из рассмотренных оказался последний 2021 г., причём с большим отрывом в сумме положительных температур: на 42 градуса больше, чем в 2020 г. При этом медианная площадь озёр за сезон в 2021 г. сильно упала: более чем на 0.1 ± 0.006 км² по сравнению с предыдущим 2020 г., где данный параметр имел самые высокие значения. Самым холодным сезоном по сумме

Рис. 5. Сравнение площадей супрагляциальных озёр в нижнем (1) и верхнем (2) высотных диапазонах с площадями подпруженного мореной озера (3) и приледникового озера (4): *а* — за 2016 г., *б* — за 2020 г.; Сравнение доли супрагляциальных озёр (5) с долей суммарной годовой площади всех озёр (6) от: *в* — всей площади исследования, *г* — верхнего высотного диапазона, *д* — среднего высотного диапазона, *е* — нижнего высотного диапазона

Fig. 5. Comparison of the areas of supraglacial lakes in the lower (1) and upper (2) altitude ranges with the areas of the moraine-dammed lake (3) and the proglacial lake (4). *а* — 2016, *б* — 2020; Comparing the share of supraglacial lakes (5) with the share of all glacial lakes (6) of: *в* — the entire study area, *г* — the highest altitude range, *д* — the medium altitude range, *е* — the lowest altitude range



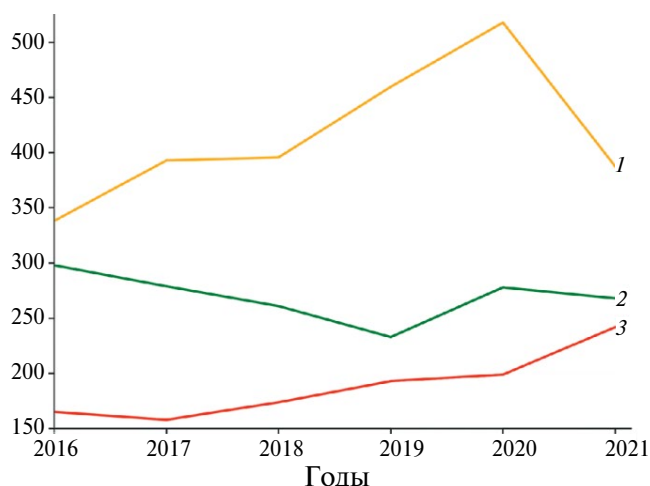


Рис. 6. Годовые значения за весь период исследования: 1 – медианной суммарной площади озёр, $0.001 \cdot \text{м}^2$, 2 – суммы осадков, мм, 3 – суммы положительных температур воздуха, градусо-дни

Fig. 6. Annual values for the entire study period of: 1 – the median total area of lakes, $0.001 \cdot \text{m}^2$, 2 – the sum of precipitation, mm, 3 – the sum of positive air temperatures, degree days

положительных температур был 2017 г., но ниже предыдущего года всего на 7 градусо-дней. В этом сравнении интересно наблюдение резкого снижения суммарной площади всех озёр во вторую половину сезона абляции 2021 г. до значений 2017 г. В эти два года – самый холодный и самый тёплый – озёра занимали на участке примерно одинаковую долю площади в 1.5%. Возможно, существует порог суммы положительных температур, после которого озёра на леднике начинают быстрее испаряться, ужимаясь по площади. Для данного исследования по используемой ранее сетке температур ERA5 были рассчитаны климатические аномалии на референтный период последних 30 лет, с 1992 по 2021 г. Предварительно были выбраны месяцы с апреля по октябрь, чтобы расчёты проводились для каждого исследуемого года именно на сезон абляции. Годом, наиболее отклоняющимся от климатической нормы в положительную сторону, оказался 2021 – на 0.46°C , а в отрицательную – 2017, на -0.31°C , что связывается с предыдущими результатами работы, но в небольшом временном периоде не объясняет влияния этого параметра на динамику озёр.

Таким образом, изменения температуры и осадков влияют на развитие ледниковых озёр внутри сезона, но не наблюдается зависимости между этими двумя метеорологическими параметрами и изменениями суммарной площади в течение сезонов. Тем не менее стоит отметить, что супрагляциальные озёра, небольшие по размеру по сравнению с приледниковыми и подпруженными

мореной, оказались намного более динамичными в течение рассматриваемого периода, сильнее крупных реагируя на изменения температуры. Именно средний диапазон только с небольшими озёрами показал наибольшую зависимость от суммы температур воздуха внутри сезона – в 2021 г. произошло наибольшее снижение доли площади из всех диапазонов по сравнению с 2020 г. Притом, если в верхнем диапазоне нет таких значительных изменений, то в нижнем суммарная площадь небольших супрагляциальных озёр возрастает вдвое за 4 года, в то время как крупные озёра изменяются относительно медленно. Кроме того, каждый год характеризуется появлением большего количества хаотично расположенных, новых небольших озёр. Их разрастание и увеличение в объёме может негативно сказываться на балансе массы ледника из-за снижения альбедо поверхности и повлиять на увеличение скорости движения из-за интенсивного дренажа.

Динамика супрагляциальных озёр на леднике Федченко действительно имеет общие черты с динамикой данных озёр в восточной части региона Высокогорной Азии. Как и в восточной части, есть тренд на повышение суммы положительных температур с каждым годом, что, тем не менее, также не отражается на стабильном увеличении площади озёр – на некоторых ледниках Тибета практически за тот же период не было статистически значимого повышения суммарной площади. В регионе небольшие озёра развиваются более активно, чем постоянные крупные, что характерно и для ледника Федченко. Тем не менее в динамике изучаемого ледника есть и отличия – рост суммарной площади малых озёр с каждым сезоном интенсивнее всё ещё в нижнем диапазоне, у самого края ледника, а не выше по языку, что уже наблюдается, например, на леднике Балторо, со средним значением доли площади озёр около 4%. Этот ледник сопоставим по размерам с ледником Федченко и расположен практически в тех же широтах, но нижняя его граница находится на высоте 3400 м, попадая, в контексте данного исследования, в верхний высотный диапазон. В этом диапазоне средняя доля площади озёр за 5 лет составляет около 1.5%, в то время как на леднике Балторо в этом диапазоне – 2–4%, повышаясь на следующем рассмотренном участке до 6–7%; возможно, большую роль в этом регионе играет перенос тёплых воздушных масс (Wendleder et al., 2021; Zeller et al., 2023). В глобальном контексте, если сравнивать с другими регионами, характеризующимися увеличением суммы положительных температур, количества и площади озёр, ледник Федченко тоже может иметь подобную тенденцию в более длительном периоде изучения. Он будет отличаться закономерностями в динамике – в Альпийском регионе за несколько последних лет до рассмотренного в данной работе

временного периода ещё происходило развитие пока только крупных, замерзающих на зиму озёр, без выраженного хаотичного появления новых небольших (Cook, Quincey, 2015; Veettil, Kamp, 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для дистанционного анализа развития озёр в течение сезонов и между сезонами были использованы регулярные безоблачные спутниковые снимки на участок исследования из двух источников: Sentinel-2 10-метрового разрешения и Landsat-8 30-метрового разрешения. Итоговый набор данных, состоящий из 70 векторных слоёв с полигонами ледниковых озёр, в дальнейшем использовался для сбора статистики по площадям и её анализа вместе с таблицами средних суточных температур воздуха на высоте 2 м в °C и суточных осадков в мм, осреднённых на участок.

В результате анализа полученных данных выяснилось, что приледниковое, подпруженное и супрагляциальные озёра вместе занимают небольшую долю площади от части ледника Федченко со сплошным моренным покровом — около 2%. Два рассмотренных метеорологических параметра — температура и осадки — локально влияют на развитие озёр внутри сезона, но нет чёткой зависимости между изменениями суммарной площади озёр и этими параметрами за весь изучаемый период. Последний рассмотренный 2021 г. оказался намного теплее предыдущих по сумме положительных температур воздуха, при этом медианная суммарная площадь всех озёр за этот сезон упала до уровня самого холодного рассмотренного года (2017 г.). Предположено, что существует порог суммы температур, после достижения которого значения площади озёр начинают стремительно падать, но установить его в таком коротком временном периоде не представляется возможным.

Отмечено, что развитие супрагляциальных озёр становится всё более хаотичным и непредсказуемым по мере стабильного увеличения суммы температур в каждый сезон абляции. При этом в данном временном периоде крупные озёра намного медленнее увеличиваются в площади, чем новые небольшие, особенно в нижнем высотном диапазоне, где температуры поверхности в среднем самые высокие. Такая сезонная динамика супрагляциальных озёр на леднике Федченко сравнима с динамикой в восточной области Высокогорной Азии, но площадь небольших озёр стремительно растёт пока только вблизи края языка ледника, а не в диапазоне ближе к фирновой линии, как на леднике Балторо.

Малая доля площади озёр на леднике Федченко пока неощутимо меняет режим ледника и мало влияет на сокращение его площади. Тем не менее, динамичное развитие озёр отражает влияние

климатических изменений, как региональных, так и глобальных, на ледники. В дальнейшем благодаря дистанционному зондированию можно собирать более длинные временные ряды данных по площадям супрагляциальных озёр, сравнивая между собой результаты исследований за разные года и формулируя закономерности их сезонного режима в зависимости от изменяющейся температуры и других глобальных факторов.

Благодарности. Благодарю своего научного руководителя Андрея Федоровича Глазовского за существенный вклад в данную работу, за помощь в анализе результатов и подборе литературы для исследования.

Acknowledgements. I want to thank my supervisor, Andrey Fedorovich Glazovsky, for his significant contribution to this work, for his help in analysis of the results and selection of literature for the study.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бассейн р. Муксу (А — система ледника Федченко) // Каталог ледников СССР. Т. 14. Вып. 3. Ч. 8А. М.: Гидрометеиздат, 1968.
- ALOS DSM: Global 30m v3.2. // Электронный ресурс. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JAXA_ALOS_AW3D30_V3_2 Дата обращения: 30.03.2024.
- Bazilova V., Käab A. Mapping Area Changes of Glacial Lakes Using Stacks of Optical Satellite Images // Remote Sensing. 2022. V. 1. № 23. P. 5973.
- Benn D., Bolch T., Hands K., Gulley J., Luckman A., Nicholson L., Quincey D., Thompson S., Toumi R., Wiseman S. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards // Earth-Science Reviews. 2012. V. 114. № 1–2. P. 156–174.
- Cook S.J., Quincey D. Estimating the volume of Alpine glacial lakes // Earth Surface Dynamics Discussions. 2015. V. 3. P. 559–575.
- Harmonized Sentinel-2 MSI. // Электронный ресурс. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_HARMONIZED Дата обращения: 20.05.2024.
- Lambrecht A., Mayer C., Aizen V., Floricioiu D., Surazkov A. The evolution of Fedchenko Glacier in the Pamir, Tajikistan, during the past eight decades // Journ. of Glaciology. 2014. V. 60. № 220. P. 233–244.
- Lambrecht A., Mayer C., Wendt A., Floricioiu D., Völksen C. Elevation change of Fedchenko Glacier, Pamir Mountains, from GNSS field measurements and TanDEM-X elevation models, with a focus on the upper glacier // Journ. of Glaciology. 2018. V. 64. № 246. P. 637–648.
- Lützow N., Veh G., Korup O. A global database of historic glacier lake outburst floods // Earth System Science Data. 2023. V. 15. № 7. P. 2983–3000.

- Melling L., Leeson A., McMillan M., Maddalena J., Bowling J., Glen E., Sandberg Sørensen L., Winstrup M., Lørup Arildsen R. Evaluation of satellite methods for estimating supraglacial lake depth in southwest Greenland // *The Cryosphere*. 2024. V. 18. № 2. P. 543–558. <https://doi.org/10.5194/tc-18-543-2024>
- Paul F., Bolch T., Briggs K., Kääb A., McMillan M., McNabb R., Nagler T., Nuth C., Rastner P., Strozzi T., Wuite J. Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers_cci project // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 203. P. 256–275. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.038>
- RGI 7.0 Consortium. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines, Version 7.0. Boulder, Colorado, USA: NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2023.
- Smith C.S.R. Observing the Seasonal Evolution of Supraglacial Ponds in High Mountain Asia: A Supervised Classification Approach // *Apollo – University of Cambridge Repository*. 2022. P. 1–132. <https://doi.org/10.17863/CAM.89716>
- Stokes C.R., Popovnin V., Aleynikov A., Gurney S.D., Shahgedanova M. Recent glacier retreat in the Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-/proglacial lake development // *Annals of Glaciology*. 2007. V. 46. P. 195–203. <https://doi.org/10.3189/172756407782871468>
- USGS Landsat 8 Collection 2 // Электронный ресурс. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_TOA Дата обращения: 20.05.2024.
- Veettil B.K., Kamp U. Glacial Lakes in the Andes under a Changing Climate: A Review // *Journ. of Earth Science*. 2021. V. 32. P. 1575–1593.
- Wendleder A., Schmitt A., Erbertseder T., D'Angelo P., Mayer C., Braun Matthias H. Seasonal Evolution of Supraglacial Lakes on Baltoro Glacier from 2016 to 2020 // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. P. 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.725394>
- Zeller L., McGrath D., McCoy S.W., Jacquet J. Seasonal to decadal dynamics of supraglacial lakes on debris-covered glaciers in the Khumbu Region, Nepal // *EGUspHERE*. 2023. P. 1–27. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1684>

Citation: Koskovetskaya S.V. Dynamics of lakes on Fedchenko Glacier from 2016 to 2021. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (1): 37–49. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010036

Dynamics of lakes on Fedchenko Glacier from 2016 to 2021

© 2025 S. V. Koskovetskaya

Federal State Educational Institution of Higher Education “National Research University “Higher School of Economics”,
Moscow, Russia
e-mail: svkoskovetskaya@edu.hse.ru

Received August 14, 2024; revised November 16, 2024; accepted December 25, 2024

The aim of this work is to investigate dynamics of lakes on Fedchenko glacier on Pamir mountains, as the area growth of lakes causes faster filtration, lower surface albedo and as consequence raises speed of the glacier and intensity of melting. Lowest part of this glacier has continuous debris cover, low velocities and nearly horizontal surface, which increases the likelihood of lakes in each season. This paper provides insight into the dynamics of the total area of lakes on the last 11.5 km of Fedchenko during 2016–2021, and provides a comparison of the area within and between each season at three altitudinal levels. Lake outlines are identified by combining two indexes – Normalised Difference Water Index and Modified Soil-Adjusted Vegetation Index – which were range-cut in range to separate water from other surfaces on the glacier. The changes in the patterns of seasonal lakes dynamics can be due to various reasons, so temperature and precipitation data are used to analyze the changes in supraglacial lake regime. Result shows that lakes occupy a small percentage of the total area – about 2% for the whole period, with a minimum of 0.7% in 2016 and a maximum of 2.2% in 2020. However, there are significant changes in the dynamics of the lakes, with the amplitude of area doubling from 0.15 km² to 0.3 km² over the period 2016–2021, with an increase in the absolute seasonal maximum value by 0.2 km². The regime also changes rapidly over the six years, from normal with an area peak only in late May in 2016–2018 to more chaotic regime with several peaks, usually two, in May and July, in 2019–2021. An important role in the analysis is played by two largest lakes on Fedchenko Glacier – moraine-dammed lake at the highest altitude range (3300–3600 m a.s.l.) and proglacial lake at the lowest altitude range (2900–3100 m a.s.l.) – which mainly have opposite dynamics comparing to small supraglacial

lakes. They are continuously filling up until the end of ablation season, but the result shows that their relative area growth is less than growth of new smaller lakes over a period of six years. The rapid area growth and more chaotic dynamics of supraglacial lakes can indicate specific influence of climate changes on glaciers.

Keywords: glacial lakes, automatic interpretation, Fedchenko Glacier, Pamir Mountains

REFERENCES

- The Muksu River basin (A – Fedchenko glacier system). Catalog of glaciers of the USSR. 1968, 14 (3): 8A. Hydrometeorological Publishing House. [In Russian].
- ALOS DSM: Global 30m v3.2. Retrieved from: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JAXA_ALOS_AW3D30_V3_2 Last access: March 30, 2024
- Bazilova V., Käb A. Mapping Area Changes of Glacial Lakes Using Stacks of Optical Satellite Images. Remote Sensing, 2022, 14 (23): 5973.
- Benn D., Bolch T., Hands K., Gulley J., Luckman A., Nicholson L., Quincey D., Thompson S., Toumi R., Wiseman S. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards. Earth–Science Reviews. 2012, 114 (1–2): 156–174.
- Cook S.J., Quincey D. Estimating the volume of Alpine glacial lakes. Earth Surface Dynamics Discussions. 2015, 3: 559–575.
- Harmonized Sentinel-2 MSI. Retrieved from: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_HARMONIZED Last access: May 20, 2024.
- Lambrecht A., Mayer C., Aizen V., Floricioiu D., Surazakov A. The evolution of Fedchenko glacier in the Pamir, Tajikistan, during the past eight decades. Journ. of Glaciology. 2014, 60 (220): 233–244.
- Lambrecht A., Mayer C., Wendt A., Floricioiu D., Völksen C. Elevation change of Fedchenko Glacier, Pamir Mountains, from GNSS field measurements and TanDEM-X elevation models, with a focus on the upper glacier. Journ. of Glaciology. 2018, 64 (246): 637–648.
- Lützw N., Veh G., Korup O. A global database of historic glacier lake outburst floods. Earth Syst. Sci. Data. 2023, 15 (7): 2983–3000.
- Melling L., Leeson A., McMillan M., Maddalena J., Bowling J., Glen E., Sandberg Sørensen L., Winstrup M., Lørup Arildsen R. Evaluation of satellite methods for estimating supraglacial lake depth in southwest Greenland. The Cryosphere. 2024, 18 (2): 543–558. <https://doi.org/10.5194/tc-18-543-2024>
- Paul F., Bolch T., Briggs K., Käb A., McMillan M., McNabb R., Nagler T., Nuth C., Rastner P., Strozzi T., Wuite J. Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers_cci project. Remote Sensing of Environment. 2017, 203: 256–275. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.038>
- RGI 7.0 Consortium. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines, Version 7.0. Boulder, Colorado, USA: NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2023.
- Smith C.S.R. Observing the Seasonal Evolution of Supraglacial Ponds in High Mountain Asia: A Supervised Classification Approach. Apollo – University of Cambridge Repository. 2022: 1–132. <https://doi.org/10.17863/CAM.89716>
- Stokes C.R., Popovnin V., Aleynikov A., Gurney S.D., Shahgedanova M. Recent glacier retreat in the Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-/proglacial lake development. Annals of Glaciology. 2007, 46: 195–203. <https://doi.org/10.3189/172756407782871468>
- USGS Landsat 8 Collection 2. Retrieved from: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_TOA Last access: May 20, 2024.
- Veettil B.K., Kamp U. Glacial Lakes in the Andes under a Changing Climate: A Review. Journ. of Earth Science. 2021. V. 32. P. 1575–1593.
- Wendleder A., Schmitt A., Erbertseder T., D'Angelo P., Mayer C., Braun Matthias H. Seasonal Evolution of Supraglacial Lakes on Baltoro Glacier from 2016 to 2020. Frontiers in Earth Science. 2021, 9: 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.725394>
- Zeller L., McGrath D., McCoy S.W., Jacquet J. Seasonal to decadal dynamics of supraglacial lakes on debris-covered glaciers in the Khumbu Region, Nepal. EGUsphere. 2023: 1–27. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1684>