

Гляциология и геокриология

Гляциология және геокриология

Glaciology and geocryology

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-4-44-56.45>

МРНТИ 37.29.35
УДК 551.324.63

М. Ш. Давлатова¹, Х. Д. Наврузшоев^{*2}, Х. Саидзода³, А. Х. Давлятова⁴

¹ PhD докторант, научный сотрудник (Государственное научное учреждение «Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана», Душанбе, Таджикистан; munzifadavlatova95@gmail.com)

^{2*} К. т. н., научный сотрудник, ведущий научный сотрудник (Институт исследований горных сообществ Университета Центральной Азии, Государственное научное учреждение «Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана», Душанбе, Таджикистан; hofiz.navruzshoev@ucentralasia.org)

³ Младший научный сотрудник (Государственное научное учреждение «Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана», Душанбе, Таджикистан; khaticha.cryos@gmail.com)

⁴ PhD докторант, научный сотрудник (Государственное научное учреждение «Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана», Душанбе, Таджикистан; cryosphereadolat@gmail.com)

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ЛЕДНИКОВ БАССЕЙНА РЕКИ ВАНЧ

Аннотация. Представлены результаты многолетнего мониторинга пульсирующих ледников Мегдор (РГО) и Хирсон (Медвежий), расположенных в Ванчском ущелье Центрального Памира, Таджикистан. Исследование охватывает период 1993–2023 гг. и базируется на интерпретации спутниковых снимков (Landsat, Sentinel). Установлено, что в 2000–2020 гг. ледник Мегдор находился в активной фазе пульсационного движения, при этом язык ледника сместился с высот 3240–3070 м до отметок 2950–2590 м. Оценка объемных изменений показала, что с момента публикации Каталога ледников СССР объем ледника Мегдор сократился на 22,6 %, а ледника Хирсон – на 17,8 %. Полученные результаты подчеркивают необходимость систематического наблюдения за пульсирующими ледниками как важными индикаторами климатических изменений в высокогорных регионах Центральной Азии.

Ключевые слова: пульсирующие ледники, объем, климат, бассейн реки Ванч, ледник Мегдор, ледник Хирсон, дистанционное зондирование.

Введение. Ледники являются источником питьевой воды для человечества и производителями электроэнергии (гидроэлектростанции), однако из-за таяния и движения языковой части ледника в низележащие районы они могут стать причиной природных катастроф, таких, как оползни или наводнения. Проблема движения языковой части ледника является одной из наиболее актуальных и малоизученных в современной науке о ледниках. Движение ледниковых языков, которое недавно считалось редким явлением, в последнее время привлекло повышенное внимание гляциологов, геофизиков, палеогеографов, геологов и специалистов в области прикладной инженерии, став причиной интенсивных дискуссий и споров.

В течение последних двух десятилетий с использованием спутниковых изображений было определено множество движущихся ледников, что создало реальную возможность для оперативного наблюдения за их эволюцией. Это крайне важно для науки о ледниках, поскольку быстрое таяние ледников часто приводит к наводнениям (GLOF).

На ледниках накапливается определенное количество снега и фирна, и если таяние снега, фирна и льда превышает осадки, то ледники начинают деградировать и исчезать. Если же осадки

на ледниках превышают количество таяния, то размер ледников увеличивается. В таком случае под воздействием силы тяжести значительное количество льда начинает двигаться вниз по склонам долины с высокой скоростью. Тогда скорость движения ледника за сутки может составлять десятки метров. Ледник, двигаясь под воздействием высоких температур, тает с большой скоростью, что приводит к наводнению в нижней части долины. Когда ледник движется в долину, он перекрывает русло реки и приводит к образованию озер, которые могут стать причиной внезапных наводнений.

В Таджикистане существует множество пульсирующих ледников – Хирсон, Дехдал (Дидал), Фортонбек, Мушкетов, Равак, Мегдор (РГО), Бобаки Пойин (Саукдара), Улугбек, Хамях (Бивачный) и другие. Движение ледников бассейна реки Ванч еще недостаточно исследовано, однако мы имеем полные данные только о движущихся ледниках Хирсон и Мегдор.

Впервые пульсирующие ледники на территории Республики Таджикистан начали изучать сотрудники Института географии Академии наук России после пульсации ледника Хирсон (1963 год) [0, 0]. После исследования пульсации ледника Хирсон в короткий срок были обнаружены пульсирующие ледники в других горных районах страны, что в 1998 году привело к необходимости составления реестра пульсирующих ледников Памира. В начале исследований известные российские ученые Л. Д. Долгушин и Г. Б. Осипова в 1971 году выявили всего 15 пульсирующих ледников в части Памирского горного массива [0, 0].

На основе анализа наблюдений можно сделать вывод, что скорость движения ледников больше зависит от их размера, толщины, количества осадков в бассейне, свойств подледникового слоя и других факторов. Таким образом, из-за изменения климата и недостаточных осадков в атмосфере в бассейне р. Ванч состояние пульсации в движущихся ледниках встречается реже.

Цикл пульсации ледников зависит не только от изменения климата, но и от расположения ледников, формы их рельефа, увеличения массы и других факторов. Некоторые ледники бассейна р. Ванч в течение длительного времени характеризуются относительной стабильностью, после чего внезапно переходят в фазу интенсивной пульсации. Для таких ледников этот процесс является типичным – после определённого периода стабильности они вступают в активную фазу движения.

Целью настоящего исследования является оценка текущего состояния и динамики подвижных ледников бассейна реки Ванч на примере ледников Мегдор и Хирсон, с акцентом на идентификацию признаков пульсационного поведения и факторов, способствующих их активации (рисунок 1).

Район исследования. Ванч является одним из высокогорных регионов, расположенным на высотах от 2500 до 6000 м над уровнем моря. В бассейне р. Ванч имеется 291 ледник разного размера, общая площадь которых составляет 353,9 км², из них 48 ледников относятся к группе пульсирующих [0]. Крупнейшие ледники этого бассейна Мегдор, Хирсон, Абдукаххор и Дасти-рост.

Все крупные ледники бассейна р. Ванч расположены в одном ряду горных хребтов, а также горных хребтов Дарвоз, Ванч и Язгулам [0]. Ледники, площадь которых превышает 10 км², встречаются в верховьях рек Ванч и Язгулам, и они составляют 50,4% площади льда в этом регионе. В оставшейся части бассейна р. Ванч и Язгулам ледники с площадью от 0,1 до 1,0 км² встречаются гораздо чаще. Следует отметить, что сокращение объема ледников значительно более заметно, чем уменьшение их площади. В некоторых ледниках наблюдается уменьшение объема на 20-30%, при этом их площадь остается неизменной [0].

Расположение ледников в основном зависит от орографии региона и направления потоков влажного воздуха. Поскольку для верховьев реки Ванч характерны абсолютно высокие горные хребты, здесь чаще встречаются сложные долинные и разветвлённые ледники. Кроме того, на распределение ледников оказывает значительное влияние перенос снега западными ветрами на восточные склоны. В результате в верховьях рек Ванч крупнейшие ледники ограничены склонами западной и восточной экспозиции. Ледники правых притоков рек Ванч и Язгулам, расположенные на южных склонах хребтов Дарваз и Ванч, ориентированы в основном в юго-восточном направлении [0].

По характеру движений и их последствиям пульсирующие ледники можно разделить на три категории (рисунок 2).

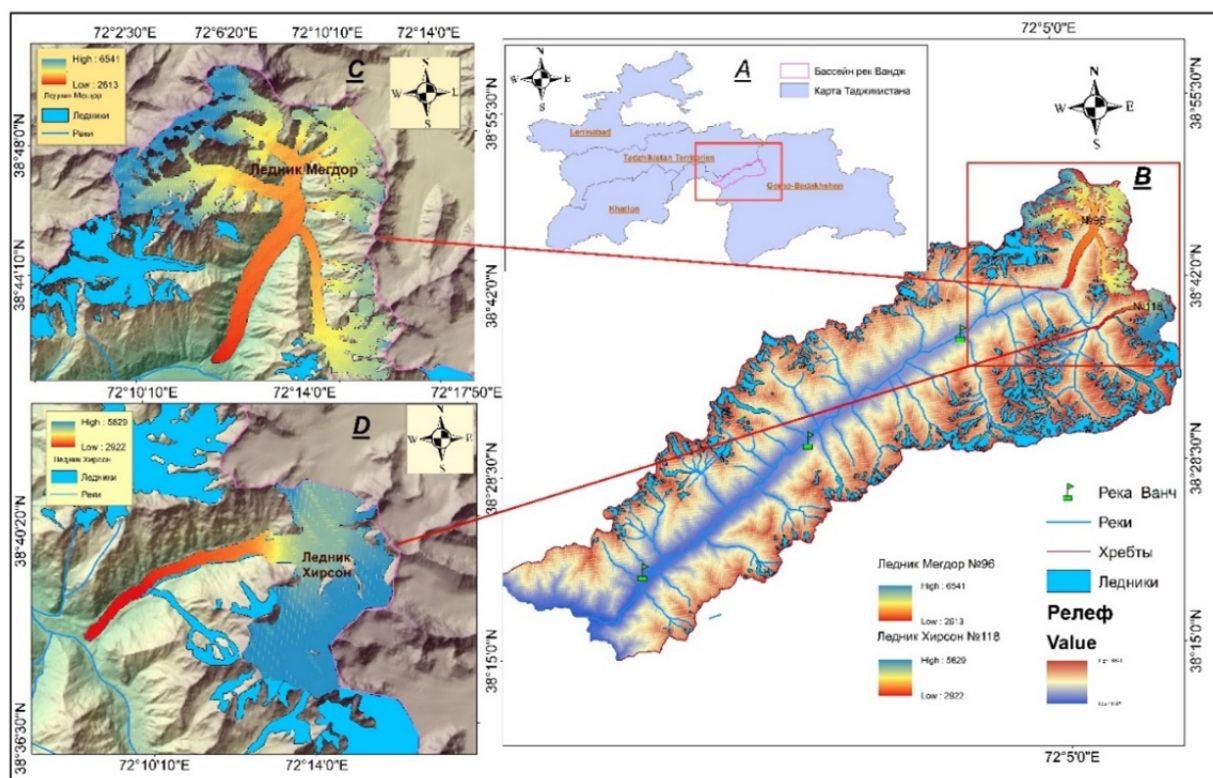


Рисунок 1 – Район исследования:

A – карта Таджикистана; B – бассейн реки Ванч; C – ледник Мегдор; D – ледник Хирсон

Figure 1 – Study area (A) Map of Tajikistan, (B) Vanj River Basin, (C) Meghdor Glacier, (D) Khirson Glacier



Рисунок 2 – Полигонная карта и категории пульсации ледников бассейна реки Ванч

Figure 2 – Polygon map and pulsation categories of glaciers in the Vanj River basin

Первая категория – классические пульсирующие ледники. Эта категория включает ледники, демонстрирующие четко выраженные циклы активности: продолжительная фаза покоя (в среднем от 10 до 60 лет) сменяется фазой активного скольжения, длящейся от нескольких месяцев до нескольких лет. В фазе пульсации скорость движения ледника может возрастать в 10–100 раз по сравнению с обычной. Такие ледники вызывают значительные геоморфологические изменения, включая деформацию морен, формирование трещин и бугров, а также могут способствовать формированию временных озёр и затоплению долин. Примерами могут служить ледники на Аляске, в Исландии и Таджикистане (например, ледник Хирсон).

Вторая категория – псевдопульсирующие ледники. К этой группе относятся ледники, у которых не наблюдается строгой цикличности, однако фиксируются периодические ускорения, часто обусловленные кратковременными гидрологическими или климатическими факторами (интенсивное таяние, изменение внутренней водной системы, высокие летние температуры и др.). Такие ускорения менее интенсивны, чем у классических пульсирующих ледников, и сопровождаются ограниченными морфологическими последствиями. Однако они могут оказывать влияние на устойчивость ледникового фронта и вызывать перераспределение массы ледника в краткосрочной перспективе.

Третья категория – катастрофически активизирующиеся ледники. Эта категория включает ледники, способные к резкой и экстремальной активизации, сопровождающейся высокоскоростным движением ледяной массы. Такие события, как правило, происходят внезапно и имеют катастрофические последствия: образование и прорыв ледниковых озёр (GLOF), ледово-обвальные потоки, разрушение моренных дамб и значительное воздействие на населённые пункты и инфраструктуру. Типичным примером является ледник Колка в Северной Осетии, чей сход в 2002 году стал одним из крупнейших ледниковых катастроф последних десятилетий.

В бассейне реки Ванч обнаружено 48 пульсирующих ледников. К первой категории относится 14,3%, ко второй – 45,8% и к третьей – 39,5% движущихся ледников. Одними из самых крупных и подвижных ледников бассейна являются ледники Мегдор и Хирсон.

Рельеф. Реки Ванч и Язгулам являются одними из крупнейших притоков правого берега реки Пяндж и расположены в западной части Памира. Эти реки протекают через длинные долины, начиная от северо-восточного экспозиционного направления и переходя в юго-западное экспозиционное направление горных хребтов Дарваз, Ванч и Язгулам. Горные цепи Дарваз служат северной границей региона, разделяя бассейны рек Ванч и Оби-Хингоб. Горные хребты Ванч разделяют бассейны р. Ванч и Язгулам, а горные хребты Язгулам ограничивают территорию и служат границей между бассейнами рек Язгулам и Бартанг.

На востоке эти горные хребты соединяются с горными хребтами Академии наук, которые ориентированы по меридиану. Вершина горных цепей Академии наук является восточной границей региона Ванч. Средняя высота этих горных цепей составляет около 5400 м, с высшей точкой – пиком ледника Гармо (6595 м) и самой низкой точкой – перевалом Кашолях (4340 м). Горный хребет Дарвоз протягивается от вершины ледника Гармо в юго-западном направлении и затем поворачивает в северо-западном направлении через долину реки Пяндж, достигая реки Оби-Хингоб. Части гор, ближайшие к горному хребту Академии наук, имеют среднюю высоту 5800 м, а другие участки этого хребта имеют среднюю высоту 4950 м, с исключением вершины Арнавад (6083 м), которая резко выделяется на фоне остальных.

Южной и юго-восточной границей региона является хребет Язгулам, который, как и хребет Ванч, имеет неоднородную высоту. На западе, около истока реки Ракзу, средняя высота этого хребта составляет 5370 м, с максимальной высотой 6132 м (пик Вудор), который находится в верховьях реки Ванч.

Река Ванч питается за счет снега и ледников. В нижнем течении основными источниками питания являются таяние ледников (41%), сезонные снега (26%) и подземные воды (33%). В верхнем течении в результате таяния ледников годовой сток воды достигает 63%, а за счет сезонных снегов – 37%. Уровень воды в нижнем течении р. Ванч постепенно повышается, начиная с середины апреля, и охватывает весь весенне-летний период. Повышение уровня воды продолжается в течение 196 дней и завершается в конце октября. Наибольший уровень воды наблюдается в июле или августе, при этом точная дата максимального подъема приходится на 24 июля. Наибольшая скорость водного стока, зафиксированная по модулю 129 л/(с·км²) (4 августа 1948 го-

да), составила 278 м³/с. В целом 86% годового стока р. Ванч приходится на этот период. Высокий модуль расхода воды в нижнем течении р. Ванч обусловлен распространением горных пород (мергели, известняки, доломиты и сланцы), которые способствуют насыщению реки подземными водами (33%) [0, 0, 0].

Верхнее течение р. Ванч впервые было изучено в 1965 году гидрологической группой гляциологической экспедиции Института географии АН СССР. Основной период и режим водного стока р. Ванч соответствуют весенне-летнему сезону, тогда как с ноября до середины апреля наблюдается крайне низкий расход воды. Вода в русле реки появляется только в конце апреля, когда начинается таяние сезонного снега в верховьях. В конце октября – начале ноября сток прекращается.

Максимальный среднесуточный расход воды (от 45,5 до 59,0 м³/с) наблюдался с 21 по 29 июля, когда среднесуточная температура воздуха в зоне абляции ледника составляла 18–20,9 °С. В 1965 году пиковый расход воды в реке Ванч был зафиксирован 27 июля и составил 85 м³/с, что соответствует максимальному модулю стока 413 л/(с·км²). В верхнем течении р. Ванч отчетливо проявляется суточная изменчивость уровня и расхода воды, особенно в период интенсивного таяния ледников. В это время суточная амплитуда колебания уровня воды достигает 20–23 см, а расход воды варьируется от 25 до 35 м³/с. В сентябре начинается постепенное снижение водного стока, который к концу октября – началу ноября полностью прекращается [0, 0, 0].

В общей сложности в долине Ванч насчитывается 81 лавиноопасный участок с площадью от 8 га до 4,5 км². В верхнем течении реки Ванч объем лавин иногда достигает 800 тыс м³. В аномально снежную зиму 1968/69 г. в долине Ванч сход лавин разрушил множество вспомогательных и жилых зданий, а также привел к человеческим жертвам [0]. Помимо этого, в различных ущельях бассейна р. Ванч часто происходят разрушительные сели. Например, в левобережных притоках р. Ванч – ущелья Рованд (в 1961 году) и Равак (в 1967 году) – произошли катастрофические селевые паводки, вызванные прорывами ледниковых озер.

Река Абдукаххор – один из крупнейших притоков р. Ванч, берет начало от ледника Абдукаххор, расположенного на склонах хребта Академия наук. Абсолютная высота истока реки составляет 3317 м над уровнем моря, ее длина – 16 км, а площадь бассейна – 329 км². Значительную часть бассейна (112,1 км²) занимают ледники и фирновые поля.

Большинство притоков р. Ванч, берущих начало от ледников Дарвазского и Ванчского хребтов, формируют мощные аллювиальные конусы при слиянии с основной рекой. Крупнейшими притоками р. Ванч являются реки Сунгат, Поймазор и Лангар. Длина р. Ванч составляет 103 км, ее падение – 1083 м, площадь бассейна – 1920 км², а средняя высота бассейна – 3780 м над уровнем моря.

Климат. На территории района Ванч действует метеорологическая станция «Хумроги», расположенная в долине реки Пяндж, рядом с р. Ванч. Станция находится на высоте 1320 м над уровнем моря, и данные с этой станции могут быть использованы для определения метеорологических характеристик региона.

Климатические условия региона определяются его высокой абсолютной высотой и влиянием свободной атмосферы [0]. Амплитуда максимальных подъёмов (до 7000 м) характерна для горных цепей Национальной академии наук Таджикистана, особенно для вершин Исмоили Сомони и ледника Гармо. Эти вершины, с их характерной высотой и глубоким рельефом, являются одними из основных центров крупных горных ледников в современный период [0]. Поскольку долина Ванча открыта для влажного воздуха, в зимний период здесь выпадает большое количество снега. В низовьях р. Ванч (на высоте 1737 м над уровнем моря) осадки составляют 238 мм, в деревне Поймазор (на высоте 2420 м) – 553 мм, а в конце ледника Мегдор (на высоте 2620 м) – 825 мм. С ноября по март около 65% годовых осадков выпадает в виде снега. В районе высот 2700–3400 м над уровнем моря, где происходит большинство лавин, снежный покров в конце зимнего сезона достигает 1,5–2,0 м [0].

Климатические особенности территории исследования. Ледники в бассейне р. Ванч не расположены в одной определённой высотной зоне (от 2600 до 6500 м), и поэтому температура воздуха и условия осадков варьируются в зависимости от высоты. На основе долгосрочных наблюдений на метеорологических станциях Федченко и Хумроги собраны обширные данные о температуре воздуха в регионе.

Весь регион Ванч характеризуется изменением температуры воздуха в зависимости от высоты ледников. Среднегодовая температура воздуха на высотах 3000-4000 м колеблется от 0 до -2°C . Наименьшие температуры наблюдаются в январе, а наибольшие – в июле. Однако в Западном Памире наибольшие температуры могут приходиться на август [0]. Средняя температура зимой опускается до -2°C , а летом повышается до $26-27^{\circ}\text{C}$.

Анализ изменений температуры воздуха и атмосферных осадков в 1997-2022 гг. За последние 26 лет наблюдается устойчивая тенденция к повышению среднегодовой температуры воздуха. Анализ данных показывает, что температурный режим претерпел значительные изменения: от минимального значения – $10,2^{\circ}\text{C}$ в 2000 году до рекордных – $14,1^{\circ}\text{C}$ в 2022 году. Линейный регрессионный анализ выявил статистически значимый тренд роста температуры со скоростью $+0,052^{\circ}\text{C}$ в год, что в совокупности за исследуемый период составило увеличение на $+1,35^{\circ}\text{C}$. Особенно заметным потепление стало после 2010 года, когда среднегодовые температуры стабильно превышали 13°C , достигая абсолютного максимума в последние два года наблюдений. При этом пятилетнее скользящее среднее наглядно демонстрирует усиление теплой тенденции, несмотря на наличие отдельных прохладных периодов, таких, как 1997-2003 годы, когда температура опускалась до минимальных значений.

Динамика атмосферных осадков за тот же период характеризуется высокой межгодовой изменчивостью при отсутствии статистически значимого тренда. Годовое количество осадков колебалось от экстремально низкого значения 85,8 мм в 2012 году до рекордных 283,9 мм в 1998 году. Примечательно, что пятилетнее скользящее среднее не выявляет устойчивой направленной динамики, но подчёркивает цикличность в изменении осадков, включая выраженный засушливый период 2012-2016 годов. Анализ экстремальных значений показывает учащение как сильно засушливых (2012, 2016, 2021 годы), так и чрезмерно влажных (1998, 2001, 2006 годы) периодов, что может свидетельствовать об увеличении климатической изменчивости (рисунок 3).

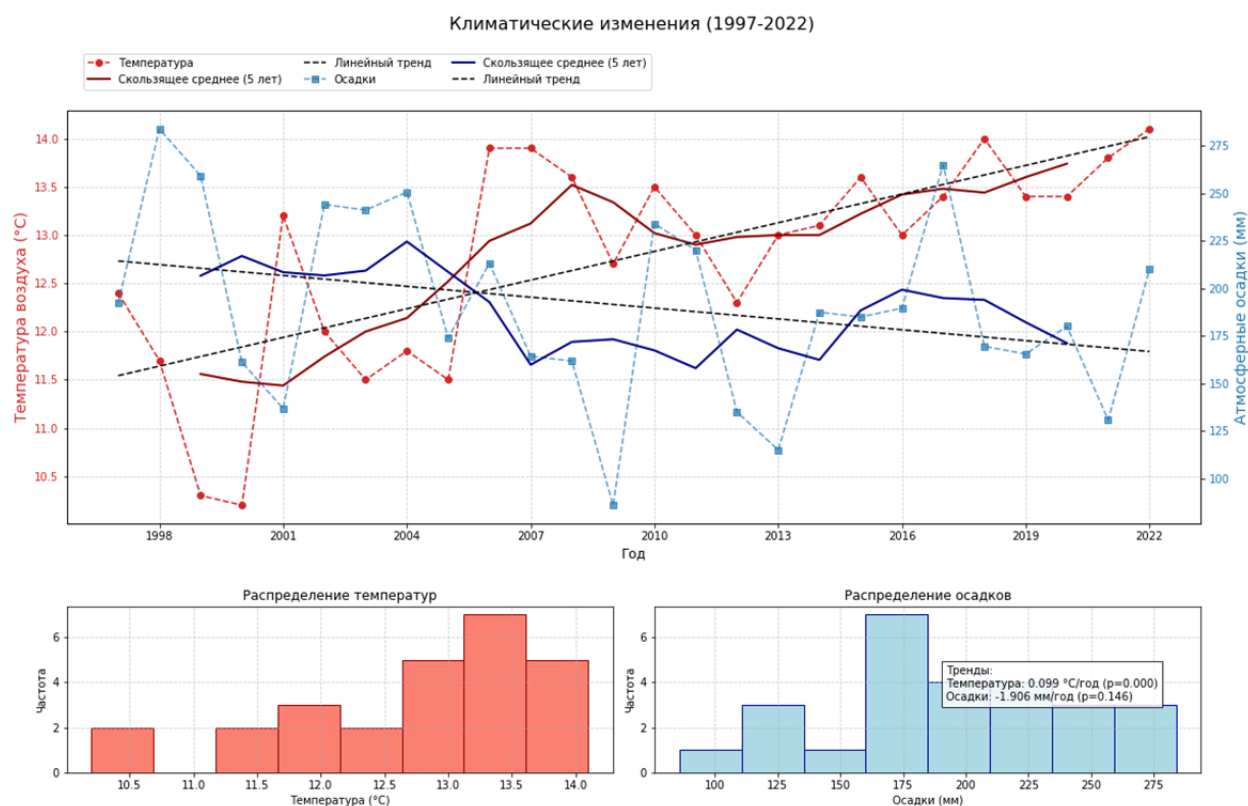


Рисунок 3 – Климатические данные со станции Хумроги за 1997–2022 гг.

Figure 3 – Climate data from Humrogi station for 1997 to 2022.

Исследование взаимосвязи между температурой воздуха и количеством осадков выявило слабую отрицательную корреляцию ($r = -0,25$), что указывает на отсутствие прямой линейной зависимости между этими параметрами. В отдельные годы наблюдались различные сочетания. Так, в 1998 году относительно низкая температура ($11,7^{\circ}\text{C}$) сопровождалась рекордными осадками (283,9 мм), тогда как в 2012 году средняя температура ($13,6^{\circ}\text{C}$) совпала с минимальным количеством осадков (85,8 мм). Особый интерес представляет 2022 год, когда максимальная температура ($14,1^{\circ}\text{C}$) сочеталась с осадками выше среднего уровня (210,0 мм). Такая неоднозначная взаимосвязь свидетельствует о сложном характере климатических процессов в регионе и необходимости учета дополнительных факторов, таких, как крупномасштабные атмосферные циркуляции и антропогенные воздействия.

Полученные результаты имеют важное значение для понимания региональных проявлений глобального изменения климата. Установленный тренд потепления согласуется с общемировыми тенденциями и может быть связан как с естественными климатическими колебаниями, так и с антропогенным влиянием. При этом отсутствие четкого тренда в количестве осадков при увеличении их межгодовой изменчивости указывает на необходимость дальнейших исследований для выявления механизмов, определяющих региональные особенности гидрологического цикла в условиях меняющегося климата.

Методы исследования. Информация о расположении морфологических типов пульсирующих ледников бассейна р. Ванч получена из Каталога ледников СССР, а новые данные собраны методом дистанционного зондирования. Механизм и характер движения языка пульсирующих ледников изучен по спутниковым снимкам Landsat 4-5TM, Landsat 7 ETM+ и Landsat 8-9 OLI, /TIRS, Landsat 1-5 MMS, которые были скачаны и использованы из архива Геологической службы СИСА в открытом доступе [0]. Перечисленные спутниковые снимки с 1993 по 2023 г. Использовались для определения времени подвижки ледников. Полученные снимки обрабатывались в программе Arcgis Map10.6, которые послужили для проведения границ ледников в периоды их пульсации, с последующим составлением карты пульсации ледников бассейна р. Ванч. С помощью онлайн платформы [0] удалось найти информацию об изменении высоты ледников, скорости их подвижки и периода пульсации с 2000 по 2019 год.

Результаты. Ледник Мегдор (РГО) находится в верховьях Ванчской долины. Начало ледник берет с пиков Гармо (6615 м) и Василия Бартольда Коммунистической Академии (6452 м) на стыке хребтов Дарвазский и Национальная академия наук Таджикистана. Первые сведения о леднике относятся к 1916 году когда конец ледника выползал в долину р. Ванч примерно на 2,5 км от его современного положения, перегораживая устьевую часть долины р. Абдукаххор [0].

Притоки ледника берут начало в обширных мульдах, расположенных на высотах 4600-5500 м. Огромная масса снега и фирна, накапливающаяся в мульдах, направляется вниз, доставляя около 50% общего объема фирна, питающего ледник. Следующим важным источником питания ледника Мегдор является его левый приток – ледник Чонфидо (Красноармейский). Учёные установили, что в 1910 г. ледник перекрыл долину река Абдукаххор и образовал водохранилище длиной более 3 км и объем от 70 млн м^3 , глубиной 45-50 м [9]. Есть признаки того, что уровень озера много раз менялся, и его прорыв должен был вызвать сильное наводнение в долине Ванч. Его прорыв стал настоящей катастрофой для населения долины. Были смыты дороги, мосты, посеы, некоторые селения и погибло много жителей и скота [9, 0]. Вследствие этого процесса конец ледника Мегдор сплошным чехлом покрыт мореной. Однако по новым наблюдениям после 1990 г. при новых движениях ледника не обнаружили новые озера в языковой часть ледника. Новое движение ледника отмечено в 2000 г. с помощью космических снимков. Пульсирующее состояние ледника непрерывно наблюдалось до 2013 года, при этом высокий уровень движения был наиболее замечен с 2002 по 2007 год. Ледник Мегдор имеет дендритный характер, и при створе этого ледника существует еще 5-6 ледников, которые, в свою очередь, также имеют свойства пульсации. Наблюдения показали, что язык ледника постоянно находится на стадии «продвижение вниз по склону» и в 2016 г. достиг самой низкой отметки (рисунок 4).

В (рисунок 4, D) онлайн платформе «Theia Cartographic Layers» удалось найти информацию об изменении высоты ледников, скорости подвижки и периода их пульсации с 2000 по 2020 г. Из за

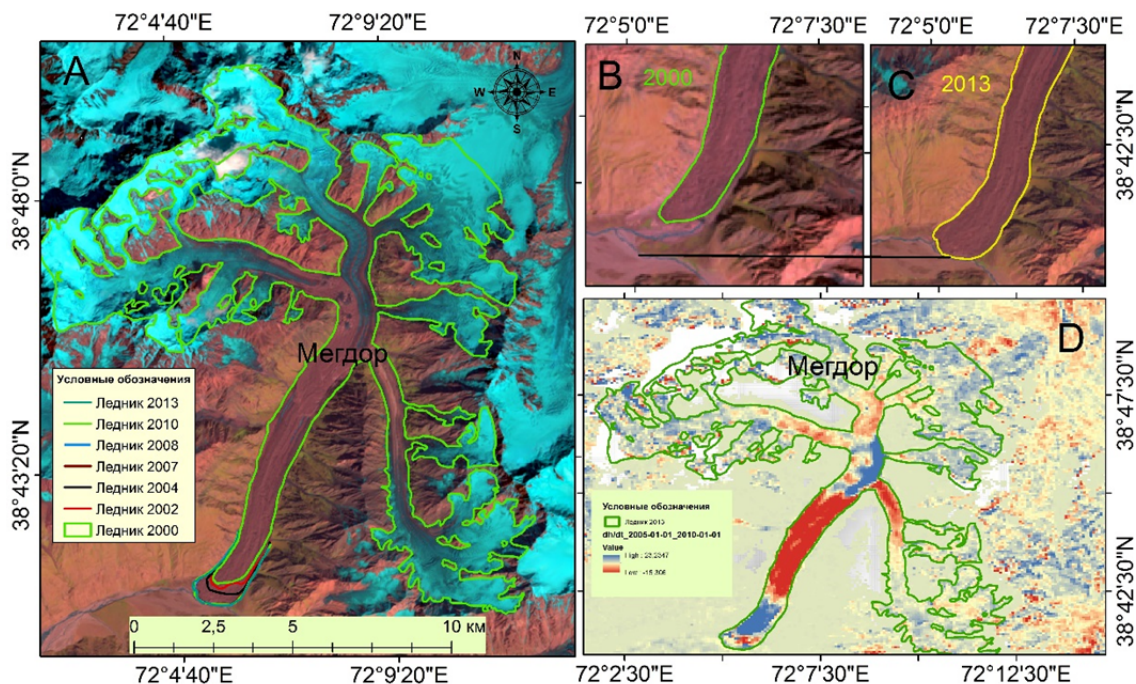


Рисунок 4 – *A* – годы движения ледника Мегдор; *B* – начало движения языка ледника в 2000 г.; *C* – окончание движения языка ледника в 2013 г.; *D* – примеры данных об изменении высоты поверхности, используемых для идентификации ледников нагонного типа. Перенос ледяной массы, связанный с нагонами ледника Мегдор в 2005–2010 гг.

Figure 4 – *A* – Years of movement of the Meghdor Glacier; *B* – Start of glacier tongue movement in 2000; *C* – End of glacier tongue movement in 2013; *D* – Examples of surface elevation change data used to identify surge-type glaciers. Ice mass transport associated with surges of the Meghdor Glacier in the period 2005–2010

пульсации ледника наибольшая толщина льда с 2005 по 2010 г. находилась на высоте от 3240 до 3070 м, однако этот результат изменился с 2011 по 2020 год, когда ледяная масса переместилась к кончику языка и наблюдалась на высотах от 2950 до 2590 м.

В периоды движения ледников и переноса больших масс льда вниз по течению масса льда в леднике не меняется, но меняется площадь его расположения. Также в периоды восстановления наблюдается значительное уменьшение ледникового языка. Язык ледника отступает с 2017 года.

На языке ледника Мегдор выявлены приязыковые озера, количество и площадь которых ежегодно меняются из-за пульсирующего состояния ледника. Озера расположены на высоте от 3000 до 2500 м на языковой части ледника. Встречаются ледниковые озера как на поверхности ледников, так и в краевых депрессиях подпруженных массой главного ледника. В результате обрушения ледниковых языков могут произойти прорывы озер, расположенных вблизи них, что приведет к катастрофическим затоплениям долин. Растущее внимание отчасти обусловлено потенциальной опасностью, которую представляют наступающие ледники.

Ледник Хирсон расположен в северо-западной части Памира на западном склоне хр. Национальная академия наук Таджикистана в верховьях р. Абдукаххор, левого притока р. Ванч. Его фирновая область площадью около 17,5 км² отделена от узкого языка (площадью 5,5 км²) крутым ледопадом (перепад высот 600 м). Общая площадь ледника – около 25 км² [0, 0, 0]. Высота ледника – от 3000 до 5500 м над уровнем моря. С 1963 по 1985 гг. на этом леднике проводились научно-исследовательские экспедиции и полевые наблюдения. В результате были выделены две фазы пульсации и две фазы восстановления. Используя космические наблюдения с 1988 по 1991 г., ученые обнаружили следующее отступление ледника в 1989 г. [0].

Пульсация ледника была замечена 22 апреля 1963 г. уже после того, как вздувшийся язык ледника перекрыл долину р. Абдукаххор. Скорость движения ледника была до 100 м/сут (в среднем около 50 м/сут). Общее продвижение ледника составило 1750 м, в это время в долине р. Абдукаххор образовалось озеро. Глубина озера достигла 80 м, а объем воды составил 14,5 млн м³ [0].

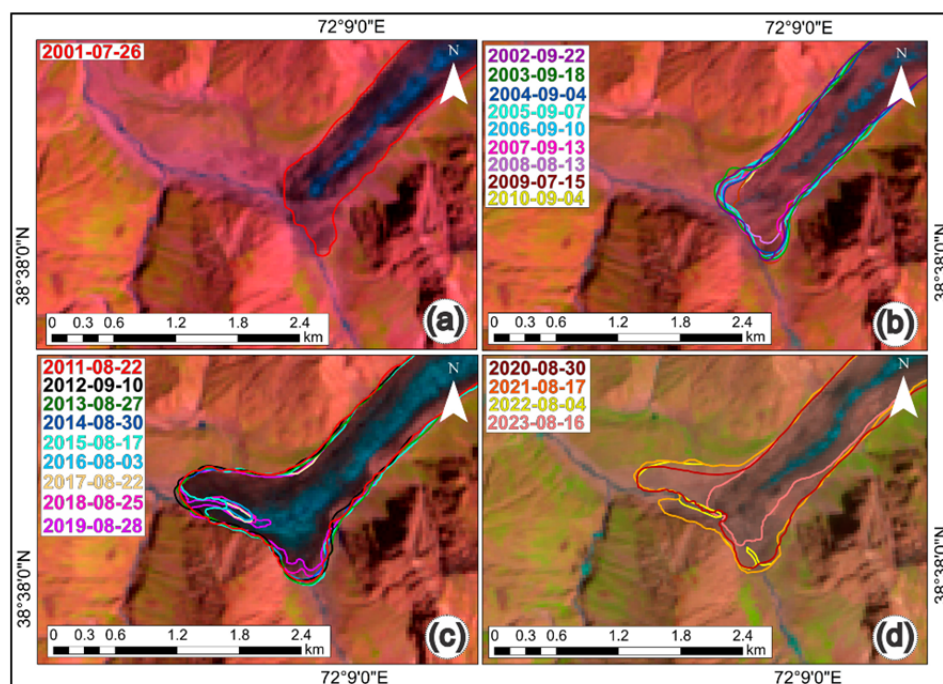


Рисунок 5 – Сравнение прогрессии и регрессии ледника Хирсон до и после с использованием данных Landsat: подрисунки представляют положение конечной части ледника в четырех интервалах: 2001 (a), 2002–2010 (b), 2011–2019 (c) и 2020–2023 (d). Линии иллюстрируют начальное положение конечной части ледника на ранних снимках и его положение на последних снимках [0]

Figure 5 – Comparison of the progression and regression of the Khirson Glacier before and after using Landsat data: The sub-drawings represent the position of the end part of the glacier in four intervals: 2001 (a), 2002-2010 (b), 2011-2019 (c) and 2020-2023 (d).

The lines illustrate the initial position of the glacier terminus in the early images and its position in the latest images [10]

Следующее движение ледника произошло 10 лет спустя, в 1973 г. Скорость движения ледника в 1973 г. была больше, чем в 1963 г. Скорость движения льда на всём протяжении зоны активизации летом 1972 г. была максимальной за всё время наблюдений (от 150–200 см/сут в средней части языка до 300 см/сут и более выше притока), а фронт активизации почти достиг концевого обрыва [0]. К этому времени тоже, как и в 1963 г., язык ледника перегородил реки Дастирост и Абдукаххор, и в долине последней образовалось озеро, максимальный объём которого составлял 16,4 млн м³. Несмотря на некоторые различия в продолжительности и масштабах, подвижки 1963 и 1973 гг. были схожи по своим внешним проявлениям и результатам.

Новое движение ледника произошло в 2000 г. На этот раз он продвинулся всего на 450–500 м, не дойдя 200–250 м до русла р. Абдукаххор. После 2002 г. ледник вступил в период восстановления. К 2010 г. площадь языка ледника сократилась до 400 м. В период новой пульсации в 2011 году ледник сместился на 1100 м. Однако, несмотря на то, что язык ледника закрыл долину реки Абдукаххор, на участке языка не было обнаружено ни одного озера. Небольшие микропульсации ледника были зафиксированы в 1976, 1978, 1981–1982 и 1986 гг. Новые микропульсации наблюдались на леднике в 2018, 2019, 2020 и 2021 гг. За пятьдесят лет ледник пять раз пульсировал. А всего есть сведения, по крайней мере, о восьми его подвижках: 1913–1915, 1937, 1951, 1963, 1973, 1989, 2001 и 2011 гг. [0, 0]. Процесс движения и восстановления ледника занимает 10–14 лет.

Обсуждение. Знание распределения толщины льда ледников мира является фундаментальной предпосылкой для ряда исследований. Прогнозы будущих изменений ледников, оценки доступных ресурсов пресной воды или оценки потенциального повышения уровня моря – все это требует точного ограничения толщины ледникового льда. Предыдущие оценки объемов глобальных ледников в основном основывались на масштабных соотношениях между площадью и объемом ледника, и только одно исследование предоставляет глобальную информацию о распределении толщины льда отдельных ледников [0, 0].

Используя архивные данные, программу Консенсусной оценки распределения толщины льда всех ледников на Земле профессора Даниэля Фаринотти из Цюрихского университета в Швейцарии, можно определить максимальную толщину ледников. Эти исследования сосредоточены на эволюции ледников и их влиянии на водные ресурсы и включают оценку толщины ледникового льда на основе характеристик поверхности, долгосрочного моделирования балансов массы ледников, оценку доли стока с ледниковых водосборов, а также последствия для управления водными ресурсами в высокогорных условиях.

Для определения объема ледников необходимы точные данные об общей площади, максимальной и средней толщине ледников. Максимальную толщину ледников можно загрузить с помощью данные из архива [0, 0], а данные можно обработать в GIS-программах.

Для расчёта максимальной и средней толщины ледников Мегдор и Хирсон были использованы данные из архива [17].

В результате исследований установлено, что общая площадь ледниковой системы Мегдор (ледники № 96, 97, 98, 99, 108, 109, 111) в 2019 году составила 81,6 км², максимальная толщина – 399,3 м, средняя толщина – 91,02 м. На основании общей площади и средней толщины ледника Мегдор его общий объем определен в 7,427 км³ (рисунок 6).

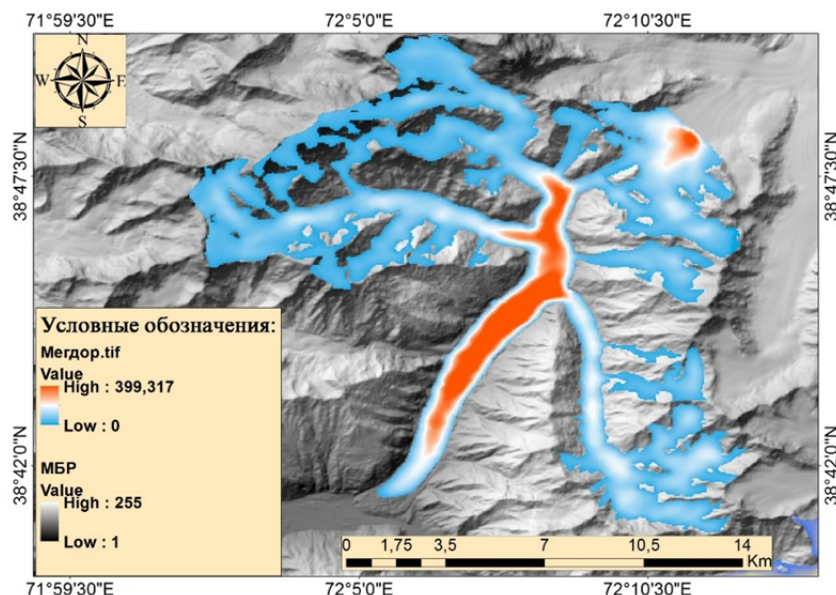


Рисунок 6 – Максимальная толщина ледника Мегдор
(Использованы цифровая модель рельефа
и программа консенсусной оценки распределения толщины льда всех ледников на Земле)

Figure 6 – Maximum thickness of Meghdor Glacier.
(Using the Digital Elevation Model
and the Consensus Estimation Programme of the ice thickness distribution of all glaciers on Earth)

В результате исследований установлено, что общая площадь ледника Хирсон в 2019 году составила 23,4 км², максимальная толщина – 406 м, средняя толщина – 106,7 м. На основании общей площади и средней толщины ледника Медвежий его общий объем определен в 2,495 км³.

Объем ледниковой системы Мегдор (ледники № 96, 97, 98, 99, 108, 109, 111) по каталогу ледников СССР (1978 г) составляет 9,57 км³, по полученным исследованиям – 7,43 км³, разница – 2,14 км³. Исследования показывают, что с момента публикации каталога ледников СССР по 2019 год ледник потерял 22,6% своего объема.

Объем ледника Хирсон (рисунок 7) по каталогу ледников СССР составляет 3,036 км³, по полученным исследованиям – 2,495 км³, разница – 0,541 км³. Исследования показывают, что с момента публикации каталога ледников СССР (1978) по 2019 год ледник потерял 17,8 % своего объема (см. таблицу).

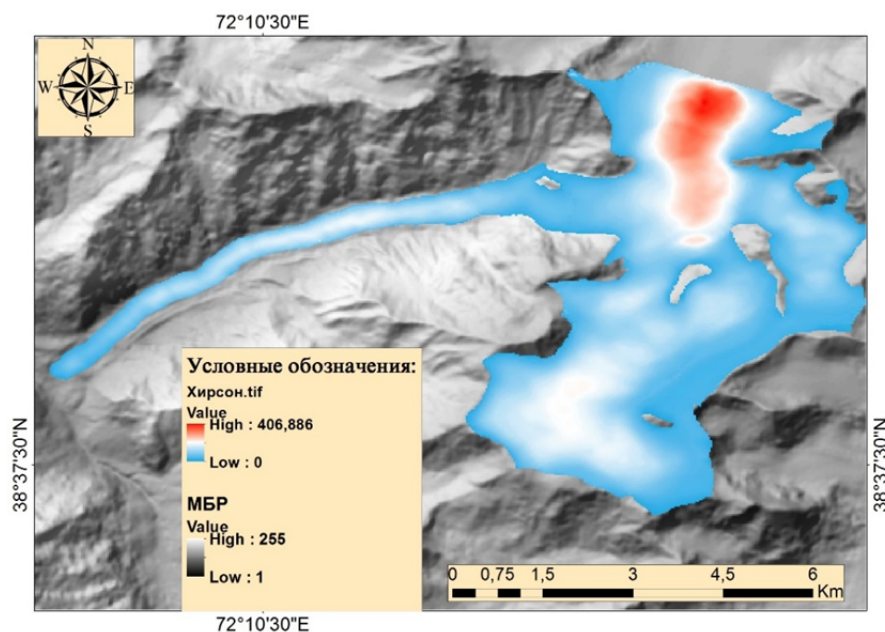


Рисунок 7 – Максимальная толщина ледника Хирсон (определена путем использования цифровой модели рельефа и программы консенсусной оценки распределения толщины льда всех ледников на Земле)

Figure 7 – Maximum thickness of Khirson Glacier (Using the Digital Elevation Model and the Consensus Estimation Programme of the ice thickness distribution of all glaciers on Earth)

Деградация объема ледников Мегдор и Хирсон
Degradation of the volume of the Megdor and Hirson glaciers

Ледник	Общая площадь ледников, км ²		Общий объем ледников, км ³		Уменьшение объема ледников	
	Каталог ледников СССР	2019	Каталог ледников СССР	2019	км ³	%
Мегдор	84,8	81,6	9,6	7,427	-2,173	-22,6
Хирсон	23,3	23,4	3,036	2,495	-0,541	-17,8

Заклучение.

1. В период нашего исследования последнее движение ледника Мегдор началось в 2000 году и продолжалось до 2013 года. При этом высокий уровень движения был наиболее заметен с 2002 по 2007 год. Ледник Мегдор имеет дендритный характер и при его створе существует еще 5-6 ледников, которые, в свою очередь, также имеют свойства пульсации. Наблюдения показали, что язык ледника постоянно находится на стадии «продвижение вниз по склону» и в 2016 г. достиг самой низкой отметки.

2. На языке ледника Мегдор выявлены приязыковые озера, количество и площадь которых ежегодно меняются из-за пульсирующего состояния ледника. Озера расположены на высоте от 3000 до 2500 м на языковой части ледника. Встречаются ледниковые озера как на поверхности ледников, так и в краевых депрессиях, подпруженных массой главного ледника.

3. Небольшие микропульсации ледника были зафиксированы в 1976, 1978, 1981–1982 и 1986 гг. Новые микропульсации наблюдались на леднике в 2018, 2019, 2020 и 2021 гг. За пятьдесят лет ледник пять раз пульсировал. А всего есть сведения, по крайней мере, о восьми его подвижках: 1913–1915, 1937, 1951, 1963, 1973, 1989, 2001 и 2011 гг. Процесс движения и восстановления ледника занимает 10–14 лет.

4. Результаты исследований показали, что в период с 1978 по 2019 г. ледник Мегдор потерял 22,6% своего объема, а ледник Хирсон – 17,8%.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аббороров Ҳ. Пиряхҳои Тоҷикистон. – Душанбе «Дониш», 2017. – 147 с.
- [2] Казанский А. Б. Результаты обследования области питания ледника Медвежьего // Геофизический бюллетень. – 1965. – № 15. – С. 52-60.
- [3] Иқтибосҳо. Суханронии Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон дар мулоқоти якуми Панели сатҳи баланд оид ба масъалаҳои об ва иқлим дар сӯғайи видеоконференсия. – Душанбе, 2022. – С. 13-14.
- [4] Кеммерих А. О. Гидрография Памира и Памиро-Алая: (Водные ресурсы). – М.: Мысль, 1978. – 120 с.
- [5] Шульц В. Л. – Реки Средней Азии. – Ленинград, 1965. – 691 с.
- [6] Каюмов А. К. Первая комплексная Международная научная экспедиция по изучению состояния ледников и экологической ситуации в верховьях рек Вахш и Пяндж. Часть 1. Ледники и гидрология. – Душанбе, 2013. – 154 с.
- [7] Долгушин Л. Д., Осипова Г. Б. Природа Мира. Ледники. – Москва, 1989. – 477 с.
- [8] Каталог ледников СССР. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Бассейн р. Аму-Дарья. Часть 11. Бассейн р. Ванча. – Ленинград, 1978. – 84 с.
- [9] Долгушин Л. Д., Осипова Г. Б. Пульсирующие ледники. – Л.: Гидрометеиздат, 1982.
- [10] Murodkhudzha M., Lanhai Li., Mustafu S., Mingyang Lv., Amirkhamza M., Aminjon Gulakhmadov, Kabutov Kh., Yubao Q. A comprehensive examination of the Medvezhiy glacier's surges in west Pamir (1968-2023) // Remote Sens (16): 1730.
- [11] Осипова Г. Б. И др. Каталог пульсирующих ледников Памира // Материалы гляциологических исследований. – 1998. – № 85. – С. 3-136.
- [12] Саидзода Х. Омӯзиши пиряхҳои набзони хавзаи дарёҳои Қирғизоб ва Гармо бо усули зондиронӣ фосилавии // Маҷаллаи илмӣ «Захираҳои об, энергетика ва экология»-и Институты масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон. – 2024. – № 4. – С. 53.
- [13] Osipova G. B. Fifty years of studying the Medvezhiy Glacier (West Pamirs) by the Institute of Geography, RAS // Ice and Snow. – 2015. – Vol. 55, No. 1. – P. 129-140.
- [14] Dolgoushin, D. Glacier surges and the problem of their forecasting. – IAHS Publ. – 1975. – Vol. 104. – P. 292-304.
- [15] Тукеев О. В. Селевые явления Памира: катастрофы, закономерности, прогноз. – 2002.
- [16] Daniel Farinotti, Matthias Huss, Johannes J. Fürst, Johannes Landmann, Horst Machguth, Fabien Maussion, Ankur Pandit. A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth // Nat. Geosci. 12, 168-173 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>
- [17] Gabbi J. et al. Ice volume distribution and implications on runoff projections in a glacierized catchment // Hydrology and Earth System Sciences. – 2012. – Vol. 16, No 12. – P. 4543-4556.
- [18] Электронный источник. <https://vaw.ethz.ch/en/people/person-detail.MTA0Mzg2.TGlzdC8xOTYxLDE1MTczNjI1ODA=.html> (дата обращения 12.04.2025) 12:25
- [19] Давлатова М. Ш. Ҳолати пиряхҳои хавзаи дарёи Ванч дар шароити тағйирёбии иқлим. Рисолаи магистри. – Душанбе, 2024. – 58 с.
- [20] Геологическая Служба СИСА в открытом доступе <https://earthexplorer.usgs.gov>.
- [21] Theia Cartographic Layers. <http://maps.theia-land.fr/theia-cartographic-layers.html>

REFERENCES

- [1] Abrorov H. Piryakhhoi Tojikiston. Dushanbe. Donish, 2017. 147 p.
- [2] Kazansky A. B. Results of a survey of the feeding area of the Medvezhiy glacier // Geophysical Bulletin. 1965. No. 15. P. 52-60.
- [3] Quotes. "Speech by the President of the Republic of Tajikistan at the first meeting of the High-level Panel on Water and Climate Issues in the framework of a videoconference." Dushanbe, 2022. P. 13-14.
- [4] Kemmerich A. O. Hydrography of the Pamir and Pamir-Alai: (Water Resources). Moscow: Mysl, 1978. 120 p.
- [5] Shults V. L. Rivers of Central Asia. Leningrad, 1965. 691 p.
- [6] Kayumov A. K. The First Integrated International Scientific Expedition to Study the State of Glaciers and the Ecological Situation in the Upper Reaches of the Vakhsh and Pyandzh Rivers. Part 1. Glaciers and Hydrology. Dushanbe, 2013. 154 p.
- [7] Dolgushin L. D., Osipova G. B. Nature of the World. Glaciers. Moscow, 1989. 477 p.
- [8] Catalogue of Glaciers of the USSR. Vol. 14. Central Asia. Part 3. Amu Darya River Basin. Part 11. Vancha River Basin. Leningrad, 1978. 84 p.
- [9] Dolgushin L. D., Osipova G. B. Surging glaciers. L.: Gidrometeoizdat, 1982.
- [10] Murodkhudzha M., Lanhai Li., Mustafu S., Mingyang Lv., Amirkhamza M., Aminjon Gulakhmadov, Kabutov Kh., Yubao Q. A comprehensive examination of the Medvezhiy glacier's surges in west Pamir (1968-2023) // Remote Sens (16): 1730.
- [11] Osipova G.B. e.a. Catalogue of surging glaciers of the Pamirs // Materials of glaciological research. 1998. No. 85. P. 3-136.
- [12] H. Saizoda. In this case, they are not only formed, but also formed in the form of embryos and processes that can form embryos, but also form embryos that can form embryos and processes // Scientific Journal "Water Resources, Energy and Ecology" of the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan. 2024. No. 4. P. 53.
- [13] Osipova G. B. Fifty years of studying the Medvezhiy Glacier (West Pamirs) by the Institute of Geography, RAS // Ice and Snow. 2015. Vol. 55, No. 1. P. 129-140.
- [14] Dolgoushin, D. Glacier surges and the problem of their forecasting. – IAHS Publ. 1975. Vol. 104. P. 292-304.
- [15] Tukeev O. V. Mudflow phenomena in the Pamirs: catastrophes, patterns, forecast. – 2002.
- [16] Daniel Farinotti, Matthias Huss, Johannes J. Fürst, Johannes Landmann, Horst Machguth, Fabien Maussion, Ankur Pandit. A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth // Nat. Geosci. 12, 168-173 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>

- [17] Gabbi J. et al. Ice volume distribution and implications on runoff projections in a glacierized catchment // Hydrology and Earth System Sciences. 2012. Vol. 16. No. 12. P. 4543–4556.
- [18] Electronic source. <https://vaw.ethz.ch/en/people/person-detail.MTA0Mzg2.TGldC8xOTYxLDE1MTczNjI1ODA=.html> access date 04/12/2025 12:25
- [19] Davlatova M. S. The state of glaciers in the Wanch River basin under climate change. Master's thesis. Dushanbe, 2024. P. 58.
- [20] Geological Survey SISA in the public domain <https://earthexplorer.usgs.gov>.
- [21] Theia Cartographic Layers. <http://maps.theia-land.fr/theia-cartographic-layers.html>

М. Ш. Давлатова¹, Х. Д. Наврузшоев^{*2}, Х. Саидзода³, А. Х. Давлятова⁴

¹ PhD докторант, ғылыми қызметкер (Тәжікстан Ұлттық ғылым академиясының «Мұздықтарды зерттеу орталығы» мемлекеттік ғылыми мекемесі, Душанбе, Тәжікстан; munzifadavlatova95@gmail.com)

^{2*} Техника ғылымдарының кандидаты, ғылыми қызметкер, жетекші ғылыми қызметкер (Орталық Азия Университетінің Таулы қауымдастықтарды зерттеу институты, Тәжікстан Ұлттық ғылым академиясының «Мұздықтарды зерттеу орталығы» мемлекеттік ғылыми мекемесі, Душанбе, Тәжікстан; hofiz.navruzshoev@ucentralasia.org)

³ Кіші ғылыми қызметкер (Тәжікстан Ұлттық ғылым академиясының «Мұздықтарды зерттеу орталығы» мемлекеттік ғылыми мекемесі, Душанбе, Тәжікстан; khaticha.cryos@gmail.com)

⁴ PhD докторант, ғылыми қызметкер (Тәжікстан Ұлттық ғылым академиясының «Мұздықтарды зерттеу орталығы» мемлекеттік ғылыми мекемесі, Душанбе, Тәжікстан; cryosphereadolat@gmail.com)

ВАНЧ ӨЗЕНІ АЛАБЫНДАҒЫ ПУЛЬСАЦИЯЛЫҚ МҰЗДЫҚТАРДЫ ҚАШЫҚТЫҚТАН МОНИТОРИНГТЕУ

Аннотация. Мақалада Тәжікстанның Орталық Памиріндегі Ванч шатқалында орналасқан Мегдор (РГО) және Хирсон (Медвежий) пульсациялық мұздықтарының көпжылдық мониторинг нәтижелері келтірілген. Зерттеу 1993–2023 жылдар аралығын қамтиды және Landsat пен Sentinel спутниктік суреттерін интерпретациялауға негізделген. Анықталғандай, 2000–2020 жылдары Мегдор мұздығы пульсациялық қозғалыстың белсенді фазасында болды, осы кезеңде мұздық тілі 3240–3070 м биіктіктен 2950–2590 м белгілеріне дейін жылжыған. Көлемдік өзгерістерді бағалау нәтижесінде КСРО Мұздықтар Кatalогы жарияланған кезден бері Мегдор мұздығының көлемі 22,6 %-ға, ал Хирсон мұздығының көлемі 17,8 %-ға қысқарғаны анықталды. Алынған нәтижелер Орталық Азияның таулы аймақтарындағы климаттық өзгерістердің маңызды индикаторлары ретінде пульсациялық мұздықтарды жүйелі түрде бақылаудың қажеттілігін көрсетеді.

Түйін сөздер: мұздық пульсациясы, көлем, климат, Ванч өзені алабы, Мегдор, Хирсон, қашықтықтан зондау.

M. Sh. Davlatova¹, H. D. Navruzshoev^{*2}, Kh. Saidzoda³, A. Kh. Davlyatova⁴

¹ PhD student, Research Associate (State Scientific Institution “Glacier Research Center of the National Academy of Sciences of Tajikistan”, Dushanbe, Tajikistan; munzifadavlatova95@gmail.com)

^{2*} Candidate in Technical Sciences, Research Associate, Senior Research Associate (Mountain Societies Research Institute, University of Central Asia, State Scientific Institution “Glacier Research Center of the National Academy of Sciences of Tajikistan”, Dushanbe, Tajikistan; hofiz.navruzshoev@ucentralasia.org)

³ Junior Research Associate (State Scientific Institution “Glacier Research Center of the National Academy of Sciences of Tajikistan”, Dushanbe, Tajikistan; khaticha.cryos@gmail.com)

⁴ PhD student, Research Associate (State Scientific Institution “Glacier Research Center of the National Academy of Sciences of Tajikistan”, Dushanbe, Tajikistan; cryosphereadolat@gmail.com)

REMOTE MONITORING OF SURGING GLACIERS IN THE VANJ RIVER BASIN

Abstract. This article presents the results of long-term monitoring of the surging glaciers Megdor (RGO) and Khirson (Medvezhiy), located in the Vanj Valley of the Central Pamirs, Tajikistan. The study covers the period from 1993 to 2023 and is based on the interpretation of satellite imagery (Landsat, Sentinel). It was established that during 2000–2020, the Megdor Glacier was in an active surge phase, with its tongue advancing from elevations of 3240–3070 m down to 2950–2590 m. Volume change assessment showed that since the publication of the USSR Glacier Catalogue, the volume of the Megdor Glacier has decreased by 22.6%, while the Khirson Glacier has shrunk by 17.8%. The findings highlight the necessity of systematic monitoring of surging glaciers as critical indicators of climate change in the high-mountain regions of Central Asia.

Keywords: glacier surge, volume, climate, Vanj River Basin, Megdor, Khirson, remote sensing.