



Мустафо Сафаров,
Али Фазылов,
Шичанг Канг,
Маджид Гулаёзов,
Цзюньли Ли,
Назриало Шерализода,
Хофиз Наврузшоев



ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

(Ледники и ледниковые озера Таджикистана)

GLACIOLOGICAL RISKS

(Glaciers and glacial lakes of Tajikistan)



ПОСВЯЩАЕТСЯ
Международному десятилетию действий
«Вода для устойчивого развития, 2018–2028»
2025 году – Международному году защиты ледников

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ
НАУК ТАДЖИКИСТАНА**

**КИТАЙСКАЯ АКАДЕМИЯ
НАУК**



Мустафо Сафаров, Али Фазылов, Шичанг Канг,
Маджид Гулаёзов, Цзюньли Ли,
Назриало Шерализода, Хофиз Наврузшоев

ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

(ледники и ледниковые озера Таджикистана)

Душанбе – 2026

УДК 551.324 (575.3)
ББК 26.222.8 (2 тадж)
Г-52

**Рекомендовано к изданию решением Издательского совета
Национальной академии наук Таджикистана
от 17 февраля 2026 г., № 07**

Сафаров М.С., Фазылов А.Р., Канг Ш., Гулаёзов М.Ш., Ли Ц., Шерализода Н., Наврузшоев Х.Д.: **Гляциологические риски (Ледники и ледниковые озера Таджикистана)** - Душанбе: «Садои Калб», 2026. – 147 с.

Рецензенты:

Саидов М.С. – доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры математики и естественных наук филиала Московского государственного университета (МГУ) имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе

Мухаббатов Х.М. – доктор географических наук, профессор, профессор кафедры методики преподавания географии и туризма географического факультета Таджикского государственного педагогического университета имени Садриддина Айни

В монографии представлены результаты мониторинга и исследований современного состояния ледников и ледниковых озер в Таджикистане, а также связанные с ними опасности, реализованные с использованием спутниковых и полевых данных высокого разрешения, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (далее БПЛА).

Разработаны и предложены: методы мониторинга ледников, ледниковых озер и связанных с ними геодинамических опасностей в горных и труднодоступных районах Таджикистана; рекомендации по применению дистанционных методов зондирования, включая использование БПЛА для высокоточного картографирования и изучения опасных гидрологических процессов, в том числе ледникового происхождения.

Монография рекомендуется специалистам Комитета по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороне при Правительстве РТ, Комитета по охране окружающей среды при Правительстве РТ, Министерства энергетики и водных ресурсов РТ, Агентства мелиорации и ирригации при Правительстве РТ, а также в качестве учебного пособия при чтении лекций и на практических занятиях для студентов соответствующих специальностей ВУЗов (Таджикский Национальный Университет, Таджикский Технический Университет имени М. Осими, гидромелиоративный факультет Таджикского аграрного Университета имени Ш. Шотемура и др.) и при подготовке и переподготовке специалистов, работающих в организациях, связанных с деятельностью по исследованиям водных ресурсов и в области управления рисками стихийных бедствий.

ISBN 978-99985-63-41-4

© Сафаров и др. 2026

DEDICATED TO
International Decade for Action
«Water for Sustainable Development, 2018–2028»
2025 – International Year of Glacier Protection

**NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF TAJIKISTAN**

**CHINESE ACADEMY OF
SCIENCES**



Mustafo Safarov, Ali Fazylov, Shichang Kang,
Majid Gulayozov, Junli Li,
Nazrialo Sheralizoda, Hofiz Navruzshoev

GLACIOLOGICAL RISKS

(Glaciers and glacial lakes of Tajikistan)

Dushanbe – 2026

UDC 551.324 (575.3)
BBK 26.222.8 (2 тадж)
G-52

**Recommended for publication by the decision of the Publishing Council of the
National Academy of Sciences of Tajikistan
dated February 17, 2026, No. 07**

Safarov M.S., Fazylov A.R., Kang Sh., Gulayozov M.Sh., Li J., Sheralizoda N., Navruzshoev H.D.: **Glaciological risks (Glaciers and glacial lakes of Tajikistan)** – Dushanbe: “Sadoi Kalb”, 2026. – 147 p.

Reviewers:

Saidov M.S. – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mathematics and Natural Sciences, Lomonosov Moscow State University (MSU) Branch in Dushanbe

Muhabbatov Kh.M. – Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor of the Department of Methods of Teaching Geography and Tourism, Faculty of Geography of the Tajik State Pedagogical University named after Sadridin Aini.

The monograph presents the results of long-term monitoring and research on the current state of glaciers and glacial lakes in Tajikistan, as well as associated hazards, based on high-resolution satellite and field-based data, including data collected using unmanned aerial vehicles (UAVs).

The study develops and proposes methodological approaches for monitoring glaciers, glacial lakes, and related geodynamic hazards in mountainous, hard-to-access regions of Tajikistan. It also provides recommendations for applying remote sensing techniques, including the use of UAVs for high-precision mapping and for investigating hazardous hydrological processes, particularly those of glacial origin.

The monograph is intended for specialists at the Committee for Emergency Situations and Civil Defence under the Government of the Republic of Tajikistan, the Committee for Environmental Protection under the Government of the Republic of Tajikistan, the Ministry of Energy and Water Resources of the Republic of Tajikistan, and the Agency for Land Reclamation and Irrigation under the Government of the Republic of Tajikistan. The monograph can also serve as a teaching resource for lectures and practical courses for students in relevant disciplines at higher education institutions, including Tajik National University, Tajik Technical University named after M. Osimi, and the Faculty of Hydromelioration of the Tajik Agrarian University named after Shirinsho Shotemur. It can also support the training and professional development of specialists working in water resource research and disaster risk management.

ISBN 978-99985-63-41-4

© Safarov et al. 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	9
Глава 1. ЛЕДНИКИ ТАДЖИКИСТАНА	13
1.1. Современное состояние оледенения в Таджикистане.....	13
1.2. Основные факторы, влияющие на дегляциацию ледников.....	17
1.3. Пульсирующие ледники и скрытые угрозы: динамика и риски.....	26
Глава 2. ЛЕДНИКОВЫЕ ОЗЕРА ТАДЖИКИСТАНА.....	37
2.1. Формирование ледниковых озер	37
2.2. Эволюция ледниковых озер в условиях изменения климата.....	40
2.3. Ледниковые озера - источники природных рисков.....	45
Глава 3. МОНИТОРИНГ ЛЕДНИКОВ И ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР – УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ.....	51
3.1. Исследование состояния ледников и ледниковых озер. Управление рисками, с использованием наборов данных высокого разрешения.....	51
3.1.1. Использование космического мониторинга ледников и ледниковых озер	51
3.1.2. Мониторинг с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Аэрофотосъемки.....	53
3.2. Исследования и мониторинг изменений потенциально опасных ледников. Пульсирующие ледники. Природные риски.....	59
3.2.1. Изменения в потенциально опасных ледниках Таджикистана и гляциологические риски.....	59
3.2.1.1. Поведение ледников - индикатор воздействия изменения климата и топографии.....	73
3.2.1.2. Динамика озер потенциально опасных ледников Таджикистана.....	89
3.2.1.3. Мониторинг изменения высоты и поверхностных скоростей течения ледников.....	96
Глава 4. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ, СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКОВ И ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР.....	102

4.1.	Последствия прорывов озер, пульсации ледников и ка- менно-ледяных лавин.....	102
4.2.	Социально-экономические последствия: анализ ущерба от природных катастроф.....	112
Глава 5.	РЕКОМЕНДАЦИИ МОНИТОРИНГА ЛЕДНИ- КОВ, ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР И УПРАВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫМИ РИСКАМИ, СВЯЗАННЫЕ С НИМИ.....	115
5.1.	Рекомендации по управлению опасными природными явлениями, связанные с динамикой ледников и лед- никовых озер. Превентивные меры снижения риска возникновения стихийных бедствий.....	115
5.2.	Перспективные направления исследования в области динамики ледников и ледниковых озер.....	120
5.3.	Научно-технические основы актуальности применения технологий и технических средств ДЗЗ в области мони- торинга ледников и ледниковых озер.....	121
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	122
	ЛИТЕРАТУРА.....	125

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная монография мотивирована резолюцией Организации Объединенных Наций (14.12.2022 года), постановившей объявить **«2025 год – Международным годом защиты ледников»**, инициированной Республикой Таджикистан и подчёркивающей важность ледников в гидрологическом цикле и их влияние на водные ресурсы, экосистемы и благосостояние людей.

В монографии представлены результаты исследований ледников и ледниковых озёр, а также связанных с ними опасностей в горных районах Таджикистана. На основе интеграции технологий БПЛА и спутниковых снимков, осуществлено комплексное и детальное изучение современного состояния ледников и ледниковых озёр и связанных с ними опасностей. Реализация подробных исследований, имеющих решающее значение для точного картирования ледников и их ледниковых озёр, в частности анализа небольших водоемов, таких как надледниковые пруды, и оценки ущерба, осуществлена на основе аэрофотоснимков, полученных с помощью БПЛА. Синтез полученных данных позволил улучшить научное понимание сложных взаимосвязей между изменением ледников, развитием озёр и возникновением опасностей.

Авторы выражают искреннюю благодарность руководству Национальной академии наук Таджикистана (НАНТ), а также руководству и сотрудникам Научно-исследовательского центра экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ, Государственного научного учреждения «Центр изучения ледников НАНТ», других научно-исследовательских учреждений при НАНТ, Комитета по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороне при Правительстве Республики Таджикистан, Северо-западного института экологии и ресурсов Китайской академии наук (КАН), Синьцзянского института экологии и географии КАН.

Авторы признательны всем тем, кто оказал помощь и всестороннюю поддержку в реализации целей и задач исследования, результаты которого легли в основу данной монографии.

FOREWORD

This monograph is motivated by the United Nations Resolution (14.12.2022), which declared **2025 the International Year of Glacier Protection**, an initiative proposed by the Republic of Tajikistan and emphasizing the importance of glaciers in the hydrological cycle and their impact on water resources, ecosystems and human well-being.

The monograph presents the results of research on glaciers, glacial lakes, and related hazards in the mountainous areas of Tajikistan. Using UAV technology and satellite imagery, a comprehensive, detailed study of the current state of glaciers and glacial lakes, and related hazards, has been conducted. Detailed studies, crucial for accurate mapping of glaciers and their associated glacial lakes, particularly the analysis of small water bodies such as supraglacial ponds and damage assessment, were carried out using UAV-derived aerial imagery. The synthesis of these data has improved the scientific understanding of the complex relationships among glacier change, lake development, and hazards.

The authors express their sincere gratitude to the management of the National Academy of Sciences of Tajikistan (NAST), as well as to the management and staff of the Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe), the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of NAST, the State Scientific Institution ‘Center for Research of Glaciers of the NAST’, other research institutions under NAST, the Committee on Emergency Situations and Civil Defence under the Government of the Republic of Tajikistan, the Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS) and Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS.

The authors are grateful to all those who provided assistance and comprehensive support in achieving the research objectives, the results of which formed the basis of this monograph.

ВВЕДЕНИЕ

14 декабря 2022 года, на 77-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН представители 153 государств-членов единогласно приняли резолюцию под названием «**2025 год – Международный год защиты ледников**», представленную Таджикистаном. В этой резолюции подчеркивается важнейшая роль ледников как неотъемлемых компонентов гидрологического цикла и отмечаются серьезные последствия их ускоренного таяния для климата, окружающей среды, здоровья человека и устойчивого развития. Данная инициатива находится в тесном соответствии с целями Международного десятилетия действий «Вода для устойчивого развития, 2018–2028 годы», в рамках которого акцентируется критическая роль водных ресурсов и необходимость их устойчивого управления на глобальном уровне. Последствия глобального потепления привели к значительному сокращению криосферы, снижению стабильности в высокогорных регионах, изменению сроков и количества стока воды, что отрицательно сказывается на местном сельскохозяйственном производстве, увеличивает дефицит воды и способствует повышению уровня моря. На основании принятой резолюции, предложения получили поддержку государств-членов ООН, в том числе: объявление 21 марта Международным днем защиты ледников; объявление 2025 года Международным годом защиты ледников; создание международного целевого фонда в рамках ООН для содействия защите ледников; и проведение Международной конференции по защите ледников в Душанбе в 2025 году (Dushanbe Water Process, 2022).

Воздействие изменения климата на высокогорные экосистемы становится все более ощутимым, в частности для ледников и ледниковых озер в Таджикистане. Несмотря на реализуемые исследования изменения ледников и ледниковых озер в Высокогорной Азии (High Mountain Asia, НМА), в Таджикистане - регионе, включающем горные системы Памира и Памиро-Алая, востребованы более детальные и комплексные исследования динамики ледников и связанных с ними изменений ледниковых озер.

Ограниченная доступность и логистические проблемы, связанные с проведением полевых работ в отдаленных труднодоступных горных регионах, представляют собой существенную преграду реализации всего комплекса исследований, в том числе затрудняют сбор данных на месте, необходимых для проверки наблюдений дистанционного зондирования и понимания сложных гляциогидрологических процессов. Доступные спутниковые данные (снимки Landsat и Sentinel 2), часто ограничены более грубым пространственным разрешением, что делает их менее эффективными для определения границ небольших водных объектов и проведения детальных исследований ледников, озер и оценки ущерба ниже по течению.

Следует отметить недостаточность региональных исследований по изучению взаимодействия изменений ледников, эволюции ледниковых озёр и связанных с ними геоугроз. В настоящее время исследования в данной области осуществлены по отдельным аспектам ледниковых систем (потеря массы или образование озёр и т.д.), не объединяя их в единую взаимосвязанную систему, что затрудняет понимание влияния изменения ледников на ледниковые озёра и, как следствие, приводит к возникновению гляциологических рисков и опасностей (прорывы ледниковых озёр и вторичные события (гляциосели, грязекаменные сели), ведущие к катастрофическим разрушениям и создающие значительные социально-экономические угрозы для экосистем в низовьях.

В последние годы технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) стремительно развиваются, включая активное внедрение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в процесс научных исследований. Аэрофотоснимки, полученные с помощью БПЛА, обладают высокой точностью и детальностью, что делает их особенно ценными для комплексного изучения ледниковых систем. При этом достигается не только точное картирование ледников и осуществление анализа состояния малых водоемов (надледниковые пруды), но также обеспечивается более достоверная оценка масштабов изменений и потенциального ущерба. Следует отметить, что применение БПЛА предоставляет принципиально новые возможности, дополняя при этом традиционные методы, за счет получения данных высокого разрешения, способствующих более глубокому пониманию динамики ледниковых процессов и их взаимодействия с водными объектами, имеющими существенное значение для исследований в области климатологии, гидрологии и гляциологии.

Настоящая монография посвящена комплексному исследованию ледников, ледниковых озёр и связанных с ними природных опасностей в условиях изменяющегося климата. Особое внимание уделено применению современных методов дистанционного зондирования Земли, включая спутниковый мониторинг и использование беспилотных летательных аппаратов, для оценки изменений ледниковых систем и связанных с ними рисков. Проанализирована эффективность различных типов ДЗЗ и их интеграция для получения высокоточных данных о состоянии ледников, формировании и эволюции ледниковых озёр, а также потенциальных угроз, связанных с их прорывами. Исследованием охвачены труднодоступные горные регионы Таджикистана, характеризующиеся ускоренным таянием ледников, ведущим к значительным изменениям гидрологического режима и усилению рисков для населения и инфраструктуры. Использование полученных результатов будет способствовать углублению научного понимания ледниковых процессов и разработке мер по снижению природных рисков в горных районах.

INTRODUCTION

On 14 December 2022, at the 77th session of the UN General Assembly, representatives of 153 Member States unanimously adopted a resolution entitled ‘2025 – International Year of Glacier Protection’, submitted by Tajikistan. The resolution emphasizes the crucial role of glaciers in the hydrological cycle and notes the serious consequences of their accelerated melting for climate, the environment, human health, and sustainable development. This initiative is closely aligned with the objectives of the International Decade for Action “Water for Sustainable Development, 2018–2028”, which highlights the critical importance of water resources and their sustainable management at the global scale. The effects of global warming have led to a significant reduction in the cryosphere, decreased stability in high mountain regions, changes in the timing and quantity of water runoff, thereby adversely affecting local agricultural production, increasing water scarcity, and contributing to sea-level rise. The resolution also includes several proposals supported by UN Member States, including: declaring 21 March as International Glacier Protection Day; declaring 2025 as the International Year of Glacier Protection; establishing an international trust fund within the UN to promote glacier protection; and holding an International Conference on Glacier Protection in Dushanbe in 2025 (Dushanbe Water Process, 2022).

The impacts of climate change on high mountain ecosystems are becoming increasingly pronounced, including in Tajikistan, where glaciers and glacial lakes are undergoing significant changes. Despite the growing number of studies on glacier and glacial lake changes in High Mountain Asia (HMA), significant gaps remain in understanding glacier dynamics and associated glacial lake changes in Tajikistan, which includes the Pamir and Pamir-Alai mountain systems. These research gaps limit the understanding of current trends and associated risks, emphasizing the need for more detailed and integrated investigations.

Limited accessibility and logistical challenges associated with fieldwork in remote, inaccessible mountain regions pose a significant barrier to comprehensive investigations, particularly hindering the collection of in situ data needed to validate remote sensing observations and understand complex glacio-hydrological processes. Available satellite data (Landsat and Sentinel-2) are often limited by their coarser spatial resolution, making them less effective for delineating small water bodies, conducting detailed studies of glaciers and lakes, and assessing downstream impacts.

There is a notable lack of regional studies on the interactions among glacier change, glacial lake evolution, and the accompanying geohazards. Existing studies primarily address separate aspects of glacier systems (mass loss, lake formation, etc.) without integrating these phenomena into a unified analytical framework. This fragmented approach limits the ability to assess the im-

pact of glacier change on glacial lakes and, consequently, the emergence of risks and hazards (glacial lake outbursts and secondary events such as mud-flows) that can lead to catastrophic impacts, creating significant socio-economic threats to downstream ecosystems.

In recent years, Earth observation and remote sensing technologies have advanced rapidly, including the active use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in scientific research. Aerial images obtained by UAVs are highly accurate and detailed, making them particularly valuable for comprehensive studies of glacial systems. These data enable precise mapping of glaciers and detailed analysis of small water bodies (supraglacial ponds), as well as more reliable assessments of the magnitude of changes and potential impacts. The use of UAVs provides fundamentally new opportunities, complementing traditional methods by providing high-resolution data that contribute to a better understanding of the dynamics of glacial processes and their interaction with water bodies, which is critical for research in climatology, hydrology, and glaciology.

This monograph presents a comprehensive study of glaciers, glacial lakes, and related natural hazards in a changing climate. Special attention is given to the application of modern remote sensing methods, including satellite monitoring and unmanned aerial vehicles, to assess changes in glacial systems and associated risks. The effectiveness of different types of remote sensing and their integration to obtain high-precision data on glacier conditions, the formation and evolution of glacial lakes, and potential threats associated with their outbursts is analyzed. The study covers inaccessible mountainous regions of Tajikistan, where accelerated glacier melting leads to significant changes in the hydrological regime and increased risks for the population and infrastructure. The results contribute to improving scientific understanding of glacial processes and to the development of measures to mitigate natural risks in mountainous areas.

Глава 1. ЛЕДНИКИ ТАДЖИКИСТАНА

1.1. Современное состояние оледенения в Таджикистане

Таджикистан, расположенный в Центральной Азии, является высокогорной страной с преобладанием сложного горного рельефа, около 93% территории которой представляет собой горные районы с высотами от 300 м в предгорьях до 7495 м на вершине пика Исмоила Сомони (Куге и др., 2013). Благодаря этому географическому разнообразию, ледники играют важнейшую роль в формировании гидрологических процессов и экосистем региона.

Климат Таджикистана в целом относится к континентальному типу, однако из-за выраженной вертикальной расчленённости рельефа и сложной орографической структуры, климатические особенности значительно усложняются. В целом среднегодовое количество атмосферных осадков в Таджикистане варьирует в широком диапазоне, отражая как влияние абсолютной высоты, так и экспозицию склонов. Минимальные значения (<100 мм в год) зафиксированы на Восточном Памире, что объясняется его расположением в условиях высокогорной внутриконтинентальной котловины с преобладанием аридного климата (Хакимов и др., 2006; Курбоншо и др., 2014; Одинаев, 2023). В то же время в южной части страны, в долине реки Вахш, среднегодовое количество осадков составляет 500–600 мм, а на южных склонах Гиссарского хребта достигает максимальных значений - более 2000 мм в год.

Температурный режим также подвержен значительным колебаниям в зависимости от высоты над уровнем моря и географического положения. В зимний период в низменных районах на юге страны, например, в районе Шаартуза, возможны аномально высокие температуры до +22 °С. В противоположность этому, в высокогорных районах Памира, в частности в окрестностях озера Булункуль, зарегистрированы экстремально низкие температуры до –63 °С, что является одним из минимальных значений, наблюдаемых на территории Таджикистана (Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН, 2022).

Основные горные системы региона включают Памир, Памиро-Алай и частично Тянь-Шань, с уникальными природными условиями, способствующими развитию значительного оледенения. В частности, Памир отличается сложной орографией, экстремальными высотами и выраженной климатической неоднородностью (Мирзохонова, 2021). Именно эти факторы обуславливают наличие мощного и разнообразного по типам оледенения, где высокогорные массивы - хребты Академии наук, Дарвазский, Ванджский, Рушанский, Язгулемский, Петер 1 и др., служат центрами аккумуляции снежно-ледовых масс. Наиболее мощное оледенение наблюдается в пределах Западного Памира, где высоты часто превышают 5000–

6000 м, а климат характеризуется обильными осадками и пониженными среднегодовыми температурами (Забиоров, 1955).

Общая площадь ледников Таджикистана составляет примерно 6% территории страны (рисунок 1.1), что делает их ключевым элементом в поддержании водного баланса Центральной Азии (Мусоев и Хакимов, 2005; Рахимов, 2008; Рахимов, 2021). Ледники служат одним из основных источников пресной воды для бассейна Амударьи и вносят значительный вклад в питание Аральского моря, и представляют собой стратегический водный резервуар, влияющий на гидрологический цикл, ирригацию и устойчивость экосистем (Groll и др., 2015; Umuhoza и др., 2021).

Памир представляет собой одну из наиболее обширных и высокогорных территорий Таджикистана и оказывает существенное влияние на климатические и социально-экономические процессы в засушливых равнинных и предгорных районах Центральной Азии. Ключевой особенностью данной горной системы является её барьерная функция по отношению к влажным воздушным массам, что обуславливает увеличение орографических осадков на склонах.

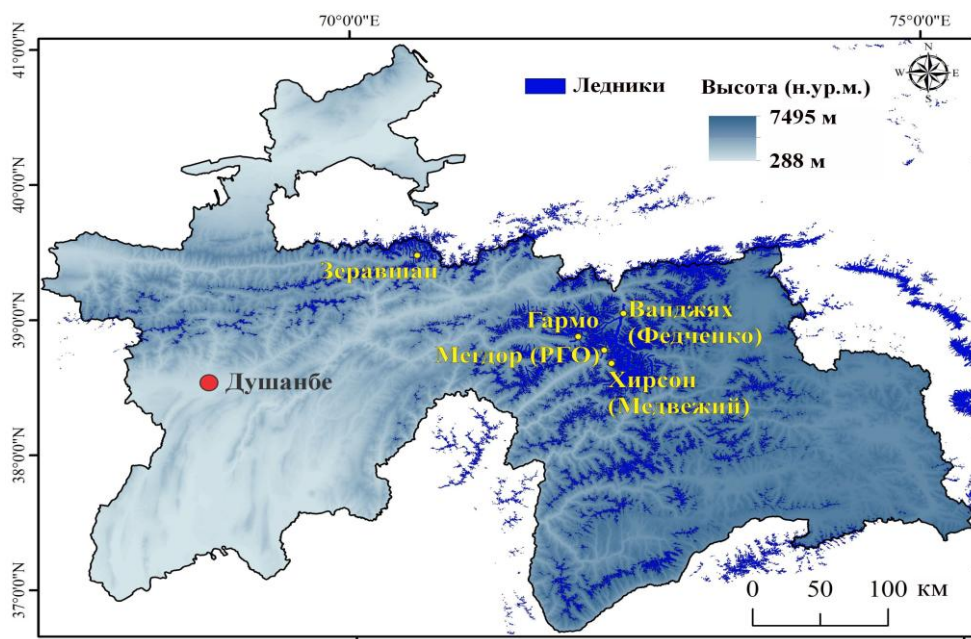


Рисунок 1.1 – Расположение наиболее крупных и известных ледников Таджикистана

Следует отметить, что климатическое и орографическое разнообразие Памира, а также его ландшафт, переходящий от полупустынных равнин к резко очерченным горным хребтам, существенно влияют на гидрологические условия региона. Наличие вечной мерзлоты в высоко-

горных районах и сложная геологическая структура, характеризующаяся различным составом горных пород, также способствуют гидрологической изменчивости.

Наиболее значительное современное оледенение наблюдается в горах Памира, где ледниковый покров охватывает примерно 7900 км². Здесь расположены самые крупные ледники страны: 16 из них превышают 15 км в длину, а 7 ледников имеют протяженность более 20 км, что подчёркивает ключевую роль данного региона в формировании и поддержании водных ресурсов. Среди них выделяется ледник Ванджях (Федченко) - крупнейший долинный ледник мира, за пределами полярных широт, достигающий длины около 77 км, с площадью 824,1 км² и толщиной льда около 1000 м (Каталог ледников СССР, 1980; Ледники Таджикистана, 2003; Котляков и др., 2012; Рахимов, 2021). Ледник питается за счёт снежных масс, поступающих с массива Национальной академии наук Таджикистана и прилегающих хребтов, и имеет сложную разветвлённую структуру, включающую более 100 притоков. Основными источниками питания ледника являются снеговые и ледовые массы, формирующиеся в результате накопления твёрдых осадков и играющие важную роль в формировании ледяной массы и водного баланса региона. К крупным ледникам Таджикистана также относятся ледники Грумм-Гражимайло, Зеравшан, Гармо, Мегдор (от таджикского Мегдор, ранее известный как ледник Русского географического общества), Ракзоу, Тахмураси Шимоли и др. с индивидуальными морфологическими особенностями и участвующие в питании крупнейших водных артерий страны.

На территории Таджикистана представлены практически все основные морфологические типы ледников (Таблица 1).

Таблица 1. Наиболее крупные ледники Таджикистана

Ледник	Бассейн реки	Примерная площадь, км ²
Ванджях (Федченко) с притоками	Мугоб	824,1
Грумм-Гражимайло	Танымась	142,8
Зеравшан	Зеравшан	126,8
Гармо	Обихингоу	114,6
Октябрьский	Каракул	88,2
Мегдор (РГО - Русского Географического Общества)	Ванч	82,2
Ракзоу	Язгулем	47,8
Тахмураси Шимоли	Тахмурас	55,0
Бобаки Пойин (Большой Саукдара)	Сардобруд (Сауксай)	53,0

Мирсаид Миршакар (Витковского)	Мугоб	50,2
Сургун	Мугоб	48,8
Национальной академии наук Таджикистана (Академии Наук)	Мугоб	48,1
Кандил Джураев (Наливкина)	Мугоб	45,2
Дорлозури Шимоли	Баляндкиик	45,1
Фортамбек	Баляндкиик	36,4
Хамях (Бивачный)	Баляндкиик	37,1
Москвина	Баляндкиик	35,5
Язгулемдара	Бартанг	33,8
Мазардара	Язгулем	25,7
Бабргузари Шимоли (Северный Зулумарт)	Сардобруд	29,1
Ориён (Косиненко)	Сельдара	27,4
Дарвоз	Обимазар	26,85
Абдукаххор	Ванджоб	26,0
Хирсон (Медвежий)	Ванджоб	25,3

Долинные ледники - вытянутые образования, формирующиеся в крупных горных долинах.

Каровые и висячие ледники расположены в цирках, на крутых склонах. Особенно распространены в Восточном Памире и Памиро-Алае.

Комплексные ледники - объединяют несколько морфологических форм.

Платообразные ледники - характерны для плоских участков на высотах более 5000 м.

Форма, направление и динамика ледников зависят от экспозиции склонов, микроклиматических условий и структуры рельефа. Морфологическое разнообразие делает ледники Таджикистана важным объектом сравнительных гляциологических исследований.

Ледниковый сток играет важную роль в поддержании сельскохозяйственного производства, особенно в районах с засушливым климатом. Водные ресурсы, формируемые в горах Таджикистана, обеспечивают около 60% стока всех рек Центральной Азии, подчеркивая исключительную важность этого региона как водного донора. К крупным рекам Таджикистана, питающимся в основном за счет таяния снега и ледников относятся: Вахш, Бартанг, Гунт, Обихингоу, Шахдара, Ванч, Язгулем, Зеравшан и другие, начинающие свой путь высоко в горах, из зон ежегодного скапливания снега и ледников. Наибольший сток воды приходится на летние месяцы - июль и август, когда таяние ледников и снега достигает пика.

Главные притоки Амударьи, реки Вахш и Пяндж, имеют ледниково-снеговое питание, с максимальным стоком воды в летний период, связанное с таянием снежных и ледниковых масс на высокогорном Памире (Базаров и

др., 2019; Муминов, 2020). В частности, река Вахш является одним из ключевых источников водных ресурсов для Амударьи. Благодаря своим гидрологическим характеристикам, р. Вахш выступает в качестве стратегической основы для развития гидроэнергетического сектора и сельского хозяйства, оказывая существенное влияние на региональную экономику.

Вахшский каскад гидроэлектростанций (ГЭС) - Нурекская ГЭС (3000 МВт), Байпазинская ГЭС (600 МВт), Сангтудинская ГЭС-1 (670 МВт), Сангтудинская ГЭС-2 (220 МВт) и Рогунская ГЭС мощностью 3600 МВт, крупнейшая по мощности из строящихся, является крупнейшим комплексом ГЭС в стране (около 90% электроэнергии Таджикистана вырабатывается ГЭС) на реке Вахш (Asian Development Bank, 2021; Sharipov и др., 2022; Gafforzoda и др., 2023).

Таким образом, ледники Таджикистана являются не только уникальным природным наследием, но и ключевым природным фактором в экономике и экологии региона. Учет состояния ледников позволяет обеспечить развитие горного сельского хозяйства; энергетическую и водную безопасность, не только Таджикистана, но и всей Центральной Азии.

1.2. Основные факторы, влияющие на дегляциацию ледников

Ледники Таджикистана - это важнейший аккумулятор пресной воды в Центральной Азии. Их устойчивость, протяжённость и объём определяют сезонный и межгодовой водный режим крупных рек региона, включая Вахш, Пяндж, Зеравшан и другие. Однако в последние десятилетия наблюдается устойчивая и ускоряющаяся тенденция деградации ледников, выражающаяся в сокращении их площади, объёма и длины (Орловский и др., 2019). Этот процесс обусловлен целым комплексом факторов, среди которых основную роль играют климатические изменения, антропогенное воздействие и локальные геоморфологические условия. Понимание причин, определяющих дегляциацию, имеет ключевое значение не только для прогноза будущего состояния ледниковых систем, но и для разработки адаптационных стратегий в условиях нарастающих климатических угроз.

Климатические условия Таджикистана имеют сложное влияние на ледниковую систему. Высокогорный рельеф способствует значительной вариабельности температур и осадков, формируя уникальный микроклимат для ледников (Nowak и др., 2020).

Повышение температуры воздуха. Повышение температуры воздуха является основным и наиболее очевидным фактором, способствующим таянию ледников. По данным многолетних метеорологических наблюдений и спутниковых измерений, в регионе Памира с конца

XX века наблюдается устойчивый рост среднегодовой температуры воздуха. В последние десятилетия глобальное потепление оказывает заметное воздействие на ледники региона. Наблюдается стабильное повышение среднегодовых температур, сопровождающееся изменениями в количестве и характере осадков (Lioubimtseva и др., 2009; Nie и др., 2021; Ullmann и др., 2022). Модели изменения климата показывают, что в Центральной Азии, включая Таджикистан, температура воздуха значительно увеличилась за последние несколько десятилетий, что ведет к ускоренному таянию ледников, наблюдаемому не только в Таджикистане, но и в других горных регионах мира, таких как Гималаи, Альпы, Анды и другие. Ускорение процессов таяния ледников, значительно влияет на сезонность водного стока, увеличивая риски наводнений в весенне-летний период и дефицита воды в засушливые месяцы (Дюргеров, 1984; Safarov и др., 2024a).

Исследования показывают, что среднегодовые температуры в регионе значительно повысились с конца XX века. Например, ледник Федченко потерял 6% своей площади и 50 метров толщины за последние 50 лет (Metrak и др., 2015; Zhang и др., 2014).

Согласно Четвертому национальному сообщению Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата в период с 1940 по 2020 гг. на территории Таджикистана наблюдалась устойчивая тенденция к повышению среднегодовой температуры воздуха, составляющая в среднем 0,1–0,2 °C за каждое десятилетие. Особенно заметно возросло количество дней с экстремально высокими температурами, достигающими 40 °C и выше. В горных регионах темпы потепления были более выраженными: температура увеличивалась на 0,3–0,5 °C, а в альпийской зоне - на 0,2–0,4 °C, что превышает климатическую норму примерно на 0,2 °C.

Анализ сезонных изменений также указывает на значительные положительные отклонения температурных показателей от многолетних средних значений. В зимние месяцы температура в ряде регионов была выше нормы на 0,1–1,1 °C, а весной - на 0,1–1,3 °C. Осенью во всех горных зонах фиксировалось превышение климатической нормы на 0,6–1,1 °C. Долгосрочные климатические наблюдения за 1940–2020 гг. свидетельствуют о росте температуры на всех высотных поясах: от низкогорно-долинных районов (до 1000 м н.у.м.), через среднегорья (1000–2500 м), до высокогорий (свыше 2500 м н.у.м.). При этом интенсивность потепления варьирует в зависимости от конкретных географических и климатических условий. На равнинных участках страны среднегодовая температура увеличивалась на 0,1–0,2 °C за десятилетие, при этом в отдельных случаях фиксировалось максимальное повышение до 0,5–0,8 °C. Отклонения средней годовой температуры

воздуха от климатической нормы, подтверждают наличие устойчивого тренда на потепление и сохраняющуюся температурную нестабильность в различных частях республики (рисунок 1.2) (Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан, 2022).

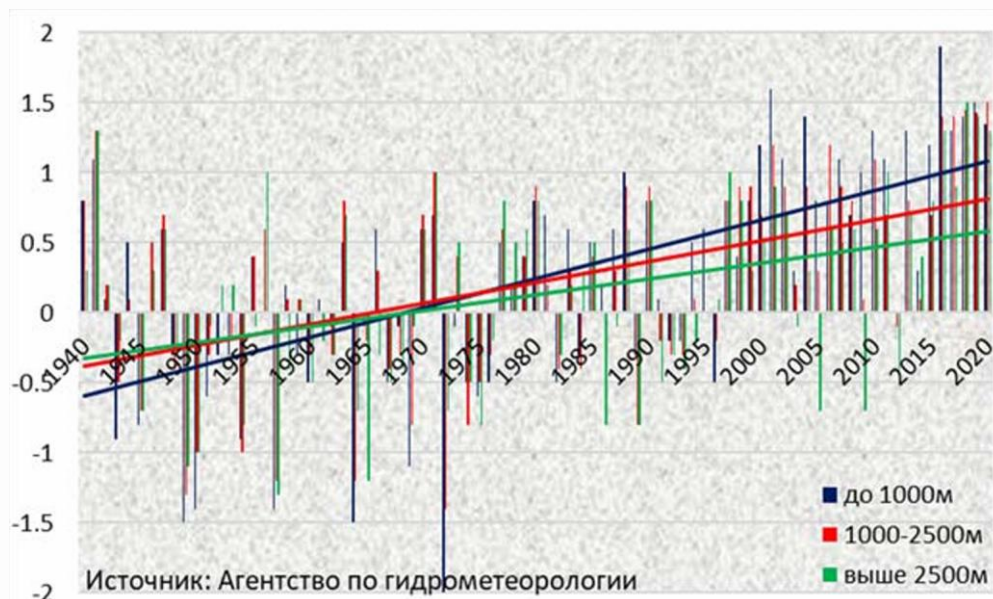
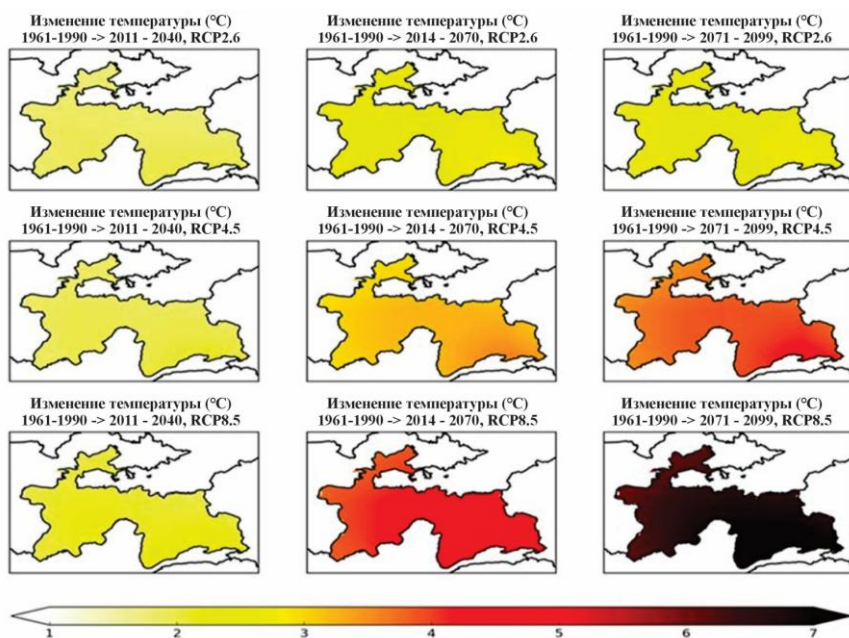


Рисунок 1.2 – Динамика отклонений среднегодовой температуры воздуха от климатической нормы (1940–2020 гг.) (Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан, 2022)

Усреднённые мульти-модельные прогнозы изменений климатических условий в Республике Таджикистан в различных временных интервалах и по ряду сценариев глобального выброса CO₂ показывают рост температуры воздуха к 2050 году, что в комплексе с уменьшением снежного покрова и ранним его таянием может способствовать формированию продолжительных засух (рисунок 1.3). Ожидаемое потепление будет способствовать дальнейшему сокращению площадей оледенения. По оценкам, ледниковые зоны Таджикистана могут уменьшиться на 15–20% по сравнению с текущим уровнем. При сохранении существующих темпов дегляциации большинство малых ледников страны могут полностью исчезнуть в течение 30–40 лет (**Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан, 2022**). Такое сокращение ледников оказывает прямое воздействие на водные ресурсы стратегически важных бассейнов рек Пянджа, Вахша и Зеравшана.



Источник: Национальная стратегия адаптации к изменению климата РТ на период до 2030 года.

Рисунок 1.3 – Наблюдаемая динамика среднегодовой температуры воздуха за 1961–1990 гг. и прогнозируемые изменения за 2011–2100 гг.

В настоящее время в ряде рек Памира наблюдается рост речного стока, однако, согласно прогнозам, эта тенденция не сохранится к середине XXI века. При отсутствии эффективных мер адаптации ожидается повышение среднегодовой температуры в бассейне реки Пяндж на 1,4–3,0 °С, сопровождаемое сокращением ледникового объема на 50–70%. В бассейне реки Вахш сценарии климатического моделирования указывают на увеличение температуры с текущих 3,3 °С до 6,9 °С к концу столетия. Сток в этом бассейне, по ряду сценариев, может увеличиться в среднесрочной перспективе (до середины века) на 5–10%, однако некоторые модели также предполагают возможное снижение поверхностного стока на 10–20%, особенно при продолжительном росте температуры и испарения (Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан).

Изменения режима осадков. Климатические изменения затрагивают не только температурные параметры, но и режим атмосферных осадков (рисунки 1.4 - 1.5).

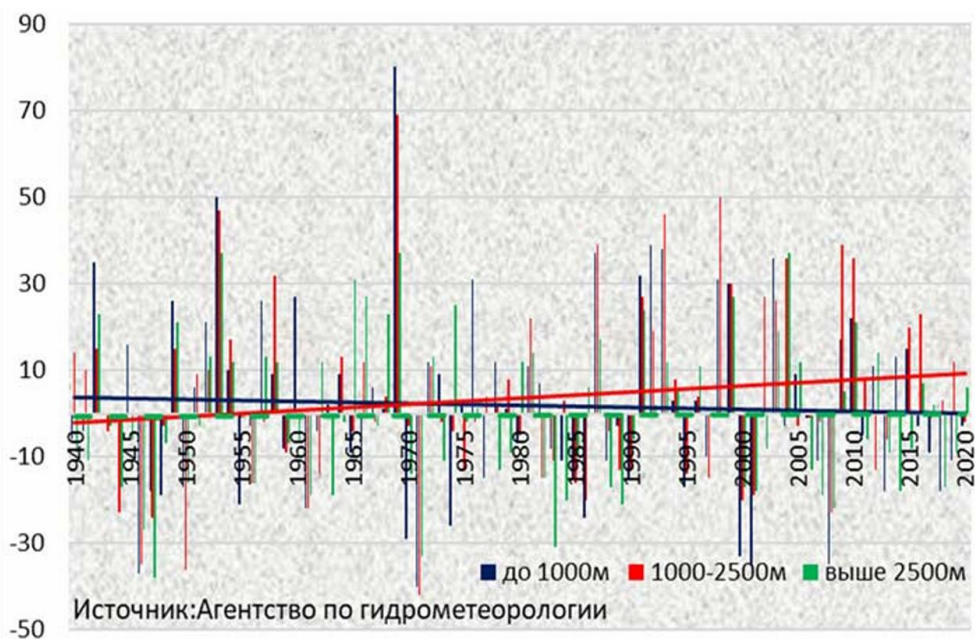


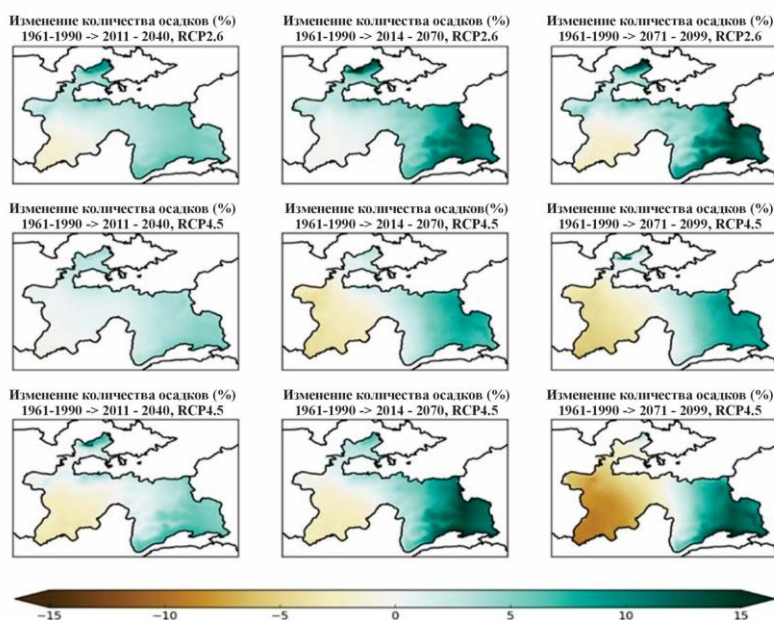
Рисунок 1.4 – Пространственное распределение отклонений годовой суммы осадков от климатической нормы, % (Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан, 2022)

Модели регионального климата, а также анализ данных с метеостанций показывают, что количество осадков в высокогорьях Таджикистана имеет тенденцию к перераспределению по сезонам. Осадков стало выпадать больше, однако значительная их часть выпадает в виде дождя, а не снега, что снижает поступление твёрдых осадков в снежную зону питания ледников. При этом общее количество осадков может оставаться на прежнем уровне, но изменяется их характер - от устойчивых снежных зим к более переменчивым и дождливым. В то же время некоторые ранее выполненные исследования также показывают, что в высокогорных районах часто фиксируются значительные осадки, в то время как в соседних низменных территориях наблюдается хроническая нехватка воды, что создает серьезные проблемы для водоснабжения населения и сельского хозяйства.

Изменения в режиме осадков, включая сдвиг границ снегов, также повышают вероятность наводнений. Ледниковые озера, образующиеся вследствие таяния, создают риск прорывов и затоплений низменных районов, что представляет угрозу для местных сообществ и экосистем (Бхамбри и др., 2020). Климатические колебания, такие как изменение осадков и увеличение частоты экстремальных погодных явлений, оказывают значительное влияние на динамику ледников. Увеличение интенсивности и частоты экстремальных метеорологических событий, может как ускорить таяние ледников, так и повысить их устойчивость (Сафаров и Каюмов, 2013; Сафаров и Фазылов, 2023).

Годовой режим выпадения осадков на территории Республики Таджикистан отличается значительной пространственной неоднородностью. Для большей части равнинных и предгорных районов, а также западных областей страны, характерно сезонное распределение осадков с выраженным минимумом в летние месяцы. Основной максимум приходится на март-апрель в долинах и предгорьях, тогда как в высокогорных районах пик осадков наблюдается в апреле-мае. Зона сухого климата охватывает долинные районы юго-западной и северной части Таджикистана, а также высокогорные области Восточного Памира, где среднегодовое количество осадков составляет от 75 до 300 мм. В то же время на южных наветренных склонах Гиссарского хребта, под воздействием орографических факторов, формируются участки влажного климата, где суммарное годовое количество осадков превышает 1200 мм. Остальная часть страны характеризуется недостаточным увлажнением и относится к зоне полуаридного климата (Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан, 2022).

Анализ климатических моделей указывает на ряд значительных трансформаций осадочного режима в стране к середине и концу XXI века (рисунок 1.5). В частности, согласно прогнозам, к 2050 году среднегодовое количество атмосферных осадков в целом может снизиться на 5%, с перераспределением их по сезонам: уменьшение ожидается в зимний и весенний периоды (на 2% и 5% соответственно), а увеличение - в летние и осенние месяцы (на 1% и 4%).



Источник: Национальная стратегия адаптации к изменению климата РТ на период до 2030 года.

Рисунок 1.5 – Отклонения годового количества осадков от нормы за 1961–1990 гг. в сравнении с прогнозами на 2011–2100 гг.

Таким образом, климатические изменения, в особенности, касающиеся температурного режима, осадков и таяния ледников, затрагивают критически важные сектора - водное хозяйство, сельское и горное земледелие, энергетическую безопасность и устойчивость горных экосистем и требуют оперативного внедрения адаптационных стратегий и координации политики в области управления водными ресурсами как на национальном, так и на трансграничном уровнях.

Высотная зональность и орографические особенности. Географическое положение Таджикистана обуславливает его ярко выраженную высотную зональность. Подъём из долинных участков (1000–1500 м) к высокогорным плато (более 4000 м) сопровождается резкими изменениями в температуре, увлажнённости и солнечном излучении. Современные границы питания большинства ледников из-за глобального потепления постепенно смещаются вверх, что приводит к сокращению зон аккумуляции. Ледники, расположенные на высотах ниже 4500 м, особенно подвержены деградации, поскольку даже при незначительном повышении температуры они переходят в зону чистой абляции. Это особенно актуально для каровых и висячих ледников, занимающих обычно депрессии на склонах горных хребтов и отдельные участки слабо дифференцированных склонов, теряющих массу значительно быстрее, чем долинные ледники с массивными питательными бассейнами.

Экспозиция склонов играет ключевую роль в термическом режиме ледников. Ледники, обращённые на юг и юго-запад, получают значительно больше солнечной радиации, что ускоряет их таяние. Тогда как, северные склоны и затенённые цирки характеризуются более стабильным снежно-ледовым режимом. Следует отметить, что альbedo - отражающая способность поверхности - оказывает прямое влияние на скорость таяния. Загрязнение снегового покрова пылью, сажой, микропластиком или чёрным углеродом приводит к снижению альbedo, повышению температуры поверхности и интенсификации абляционных процессов.

Антропогенные факторы. Растущая плотность населения, расширение сельскохозяйственных угодий и строительство инфраструктуры - это факторы, оказывающие воздействие на микроклимат региона. Аграрные практики, рост населённых пунктов и изменения в использовании земель могут оказывать значительное воздействие на микроклимат и состояние ледников. Например, изменение растительности и наращивание инфраструктуры снижают альbedo поверхности, что способствует дополнительному нагреву и ускоренному таянию ледников.

Человеческая деятельность связана с выбросами загрязняющих веществ, в том числе мелкодисперсных аэрозолей и чёрного углерода (black carbon), образующегося при сжигании органического топлива и отходов.

Эти частицы оседают на поверхности ледников, снижая альбедо и увеличивая абсорбцию солнечного излучения. Увеличенные концентрации чёрного углерода на поверхности ледников Памира являются критичными для энергетического баланса ледяного покрова.

Роль гидрологических процессов. Гидрологический режим ледников - один из ключевых факторов, определяющих их устойчивость и скорость деградации. Повышение температуры воздуха ведёт к увеличению объёмов талой воды, как на поверхности, так и внутри ледника. Образующиеся проталины и трещины формируют каналы, по которым вода поступает в нижележащие горизонты ледника, формируя внутриледниковые потоки. Эти процессы существенно ускоряют деструкцию ледяного массива, особенно в летний период. Сезонные потоки талой воды, протекающие по дну ледника, способствуют его подтаиванию снизу, ослабляя структуру и вызывая ускорение движения ледника. В результате может наблюдаться временное усиление скорости движения ледника, что, в свою очередь, связано с нестабильностью морен и возможностью формирования озёр.

По мере таяния и отступления языка ледника, часто образуются замкнутые депрессии, заполняемые талой водой. Особенно распространены моренно-подпрудные озера, образующиеся в результате накопления моренного материала на краю или вблизи ледника и в надледниковых озерах или прудах. Так, например, исторические данные, в том числе результаты Второго Международного полярного года (II МПГ) (начало - 1 августа, продолжительность 13 месяцев) и Таджикско-Памирской экспедиции 1932-1933 гг., первой экспедиции на ледники Таджикистана за годы независимости в 2005-2006 гг. а также данные дистанционных наблюдений позволяют однозначно утверждать деградацию ледника Ванджях (рисунок 1.6).

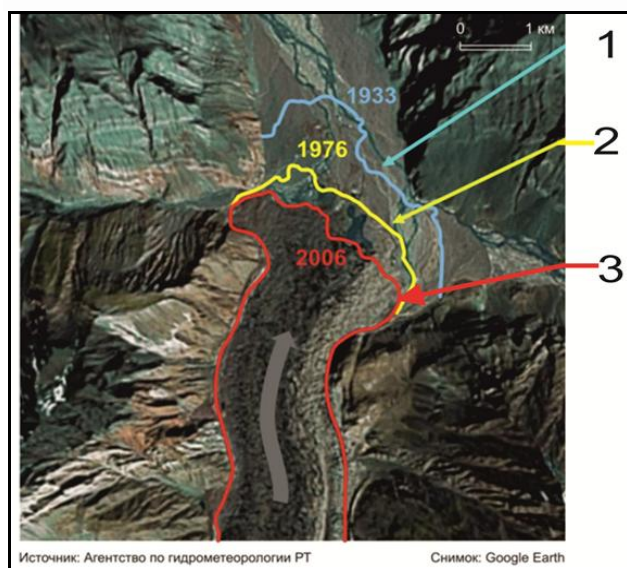


Рисунок 1.6 – Отступление языка ледника Ванджях. (Кобулиев, 2017)

1 - второй Международный полярный год и Таджикско-Памирская экспедиция 1932-1933 гг., 2 - регулярные наблюдения за ледником Гидрометслужбой, 3 - первая экспедиция на ледники Таджикистана за годы независимости в 2005-2006 гг.

Источник: Агентство по гидрометеорологии РТ

Снимок: Google Earth

Кроме того, данные спутниковых снимков Landsat 5-9 и Sentinel 2 2010-2024 гг. позволяют утверждать, что ледник Ванджях демонстрирует значительное отступление (рисунок 1.7 и 1.8). За исследуемый период была зафиксирована значительная потеря площади языковой части ледника, что привело к увеличению объема озер. Подобные изменения могут оказывать значительное влияние на гидрологический баланс региона.

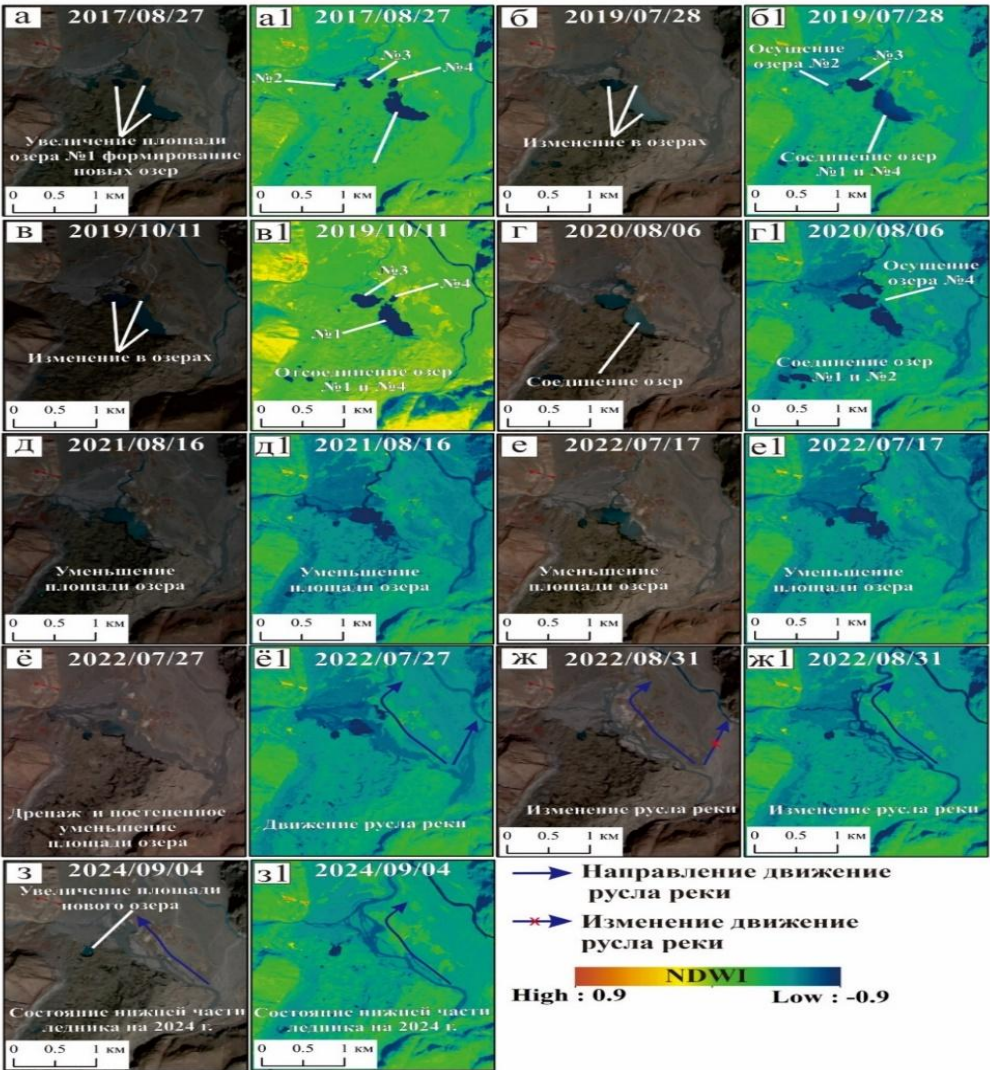


Рисунок 1.8 – Эволюция ледниковых озер с 2017 по 2024 в языковой части ледника Ванджях

Изменение моренного материала, нарастание объёма и гидродинамическое давление увеличивают вероятность катастрофических наводнений, способных вызвать разрушение инфраструктуры, гибель людей и

значительный экономический ущерб. Дополнительными вызовами, связанными с деградацией ледников, являются усиление процессов эрозии и увеличение частоты селей и оползней. Уменьшение ледникового покрова снижает естественную стабильность склонов, что увеличивает вероятность катастрофических геоморфологических процессов, особенно в районах с высокой тектонической активностью. Таким образом, динамика ледников Таджикистана представляет собой сложный и многогранный процесс, требующий всестороннего исследования.

Дегляциация ледников Таджикистана обусловлена комплексом факторов - климатических, геоморфологических, антропогенных и гидрологических. Влияние глобального потепления является определяющим, однако локальные условия (высота, экспозиция, загрязнение) значительно модулируют масштаб и скорость процессов. Последствия деградации ледников касаются как природной, так и социальной среды, поэтому мониторинг и изучение этих процессов являются приоритетной задачей для устойчивого развития региона.

1.3. Пульсирующие ледники и скрытые угрозы: динамика и риски

Пульсирующие ледники представляют собой уникальное природное явление, отличающееся чередующимися фазами замедленного движения и резкого ускорения ледникового потока. Эти циклические подвижки сопровождаются существенными изменениями морфологии ледника, перераспределением масс льда и образованием временных озёр и природных рисков, включая прорывы ледниковых озёр, что делает их важным объектом для гляциологических, геоэкологических, гидрологических исследований и привлекает внимание ученых, экологов и инженеров во всем мире. Явление пульсации особенно характерно для горных районов с активной тектоникой, значительными сезонными колебаниями температуры и интенсивным снегонакоплением, таких как Памир и Памиро-Алай.

Пульсирующие ледники (англ. "surging glaciers") отличаются от обычных ледников периодическими, но относительно кратковременными фазами аномально высокой скорости движения, во время которых их языки могут продвигаться на сотни метров или даже километры за считанные месяцы. В такие периоды фронт ледника быстро наступает, формируя крупные морены, создавая ледниковые запруды и изменяя русла рек. Эти фазы сменяются длительными стадиями стагнации и замедленного движения, продолжающимися десятилетиями.

Подобные циклы могут повторяться с различной периодичностью в зависимости от внутренних условий ледника и внешних факторов.

Физико-механическая природа пульсаций обусловлена сложными процессами внутри ледникового тела. Ключевыми механизмами, вызывающими пульсации, являются накопление массы в верхней части ледника (зоне аккумуляции), повышение гидравлического давления под ледником вследствие таяния подледникового льда, потеря сцепления между ледником и подстилающей породой, субледниковая водная смазка, способствующее резкому снижению трения, тектонические разломы и геотермальные процессы.

Таким образом, современные теории объясняют пульсации ледников следующими механизмами:

Гидрологический: накопление подледной воды снижает трение между основанием и ложем, вызывая лавинообразное ускорение;

Термомеханический: переход ледника в теплый режим с температурой у основания около 0°C способствует пластичности льда и ускорению потока;

Деформационно-механический: накопление напряжений в теле ледника с их последующим резким разрядом;

Геоморфологический: влияние уклона ложа, подледного рельефа и морфологии долины;

Тектонический: активные разломы могут провоцировать нестабильность в основании ледника.

Ещё в XIX веке были задокументированы подвижки ледников в Альпах, Исландии и на Аляске. Однако систематическое изучение данного феномена началось лишь в середине XX века, когда ученые осознали, что подвижки ледников - это не случайные однократные события, а следствие сложных внутренних процессов в ледниковых системах (Долгушин, 1968; Осипова, 1998).

В Таджикистане наибольшее количество пульсирующих ледников зафиксировано в пределах Западного Памира, демонстрировавших признаки пульсационной активности (рисунок 1.9).

Наиболее известные из них ледники Хирсон (Медвежий), Мегдор (РГО), Дехдал (Дидаль), Хамях, Фортамбек, Саид Нафиси (Баральмос), и др. Ярким примером стал ледник Хирсон в Таджикистане, пульсация которого в 1963 году - вызвала наводнения и привела к разрушению электростанции и поселка геологов, расположенных в непосредственной близости в бассейне реки Ванджоб. В результате подпруживания долины реки Абдукаххор образовалось озеро, прорыв которого вызвал значительные разрушения в долине реки Ванджоб (Осипова, 2015; Каюмов, 2013). Эти события не только привлекли внимание ученых и специалистов к проблеме динамики ледников, но и стали важным стимулом для начала систематических гляциологических исследований в регионе.

В последующие десятилетия были развернуты широкомасштабные гляциологические исследования, направленные на мониторинг нестабильных ледников, анализ факторов, способствующих их подвижкам, и разработку мер по снижению ледниковых рисков. В исследование ледников, в частности пульсирующих, ценный вклад внесли В.М.Котляков, Г.Б. Осипова, Л.Д. Долгушин, Л.В. Десинов, К.П. Рототаев, Д.Г. Цветков, А.С. Щетинников, М.С. Рудак, А.С. Щетинникова, В. Г. Коновалов, А. Каюмов, Ф.Х. Каримов, Н.Р. Ишук, Х.Д., Наврузшоев, М.Х. Муродов, М.С. Сафаров, Ф.К. Восидов, М.Н. Гуломов и другие ученые и специалисты. Их работы, позволили систематизировать наблюдения, разработать классификации пульсирующих ледников и предложить объяснения механизмов пульсаций.

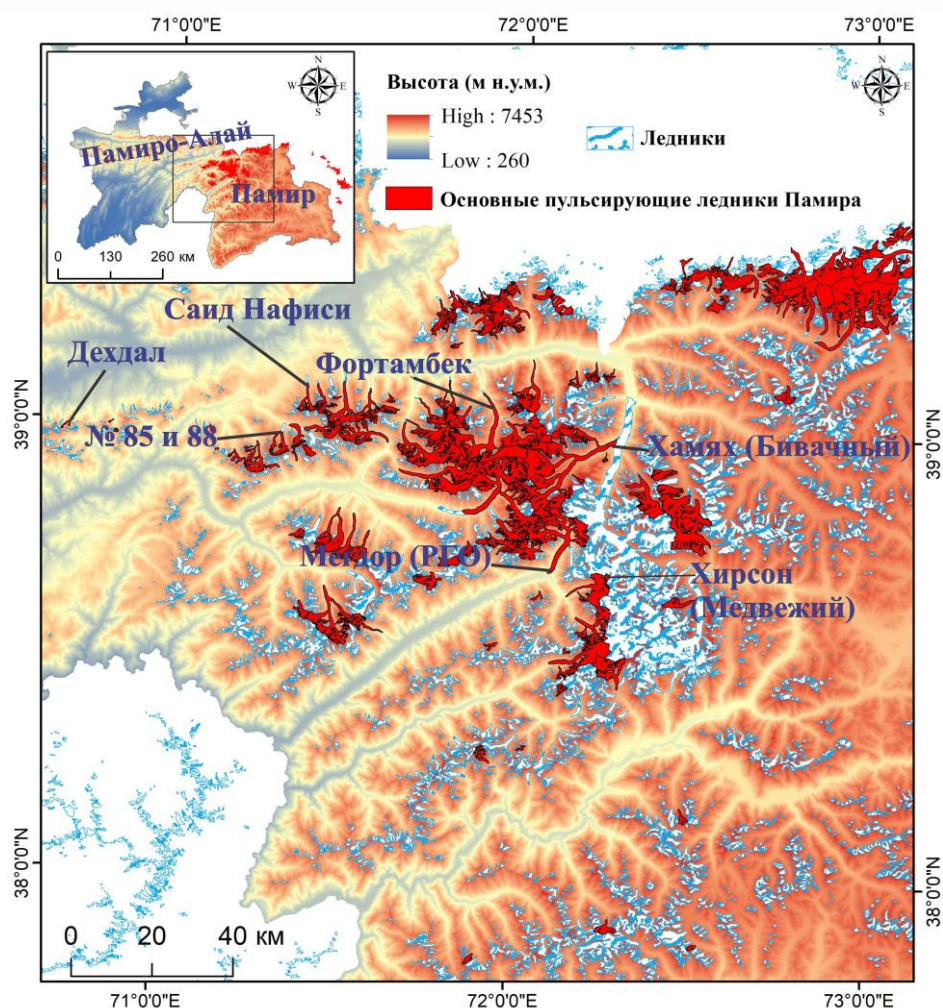


Рисунок 1.9 – Карта расположения активных и известных пульсирующих ледников Таджикистана

Особый вклад в исследование ледников Центральной Азии внёс академик Владимир Михайлович Котляков, основатель советской школы гляциологии и один из ведущих мировых экспертов по гляциодинамике. Его фундаментальные работы по типологии ледников, термодинамике и географии оледенения создали прочную теоретическую основу, позволившую по-новому осмыслить нестабильные формы поведения ледников, включая пульсации. В своих исследованиях он подчёркивал важность комплексного подхода, объединяющего климатические, геоморфологические и гидрологические аспекты. Под его руководством были проведены многолетние экспедиционные исследования в Тянь-Шане, на Памире и в других горных регионах, позволившие систематизировать знания о подвижности ледников и условиях их нестабильности.

Продолжая и развивая эти идеи, Галина Борисовна Осипова инициировала создание «Каталога пульсирующих ледников Памира», опубликованного в 1998 году в соавторстве с Д.Г. Цветковым, А.С. Щетинниковым и М.С. Рудаком. Каталог стал важным этапом в систематизации знаний о нестабильной динамике ледников и в нём обобщены данные о пульсирующих ледниках Памира. Для каждого ледника в каталоге представлены сведения о морфометрии, характере и периодичности пульсаций, хронологии наблюдаемых событий и степени достоверности классификации.

В последние десятилетия методы дистанционного зондирования (Landsat, ASTER, Sentinel-2), в сочетании с историческими материалами, позволили уточнить темпы и масштаб пульсаций, выявить ранее неизвестные случаи, а также проследить ретроспективную динамику ледников за период более 50 лет. Исследования, проведённые в начале XXI века при участии международных команд, способствовали уточнению данных о скорости и амплитуде пульсаций, а также о потенциальной связи данных процессов с изменениями климатических условий, подповерхностным дренажем и геологической структурой ложа ледников. Кроме того, современные исследования используют данные дистанционного зондирования и спутниковой интерферометрии для мониторинга изменений пульсирующих ледников и динамики связанных с ними водных объектов. В особенности аэрофотосъёмка и спутниковый мониторинг фиксируют значительные изменения морфологии ледников, образование новых моренных валов, перемещение языка и рост озер в периоды пульсаций.

В таблице 1 представлены наиболее известные пульсирующие ледники Таджикистана и их подвижки, а также связанные источники на таджикском и русском языках.

Таблица 1 - Наиболее известные пульсирующие ледники Таджикистана и их подвижки

Название	Долгота и широта	Бассейн реки	Зафиксированные подвижки	Источники
Хирсон (Медвежий)	38.6399°-72.1457°	Ванджоб	1916, 1951, 1963, 1989, 2001 и между 2000-2011 гг.	Забиров, 1955; Бадд и др., 1977; Войтковский, 1974; Долгушин и др., 1964; Казанский, 1964; Долгушин и Осипова. 1972; Долгушин и др., 1974; Соколов и Янбулат, 1974; Садыков, 1973 Долгушин и Осипова, 1978; Цветков и др., 1981; Осипова, 1982; Осипова и др., 1990; Осипова и др., 1998; Махмадалиев и Яблоков, 2005 Хромова и др., 2018 Осипова и др., 2015; Котляков и др., 2018; Harrison и др., 2015; Коновалов и Рудаков, 2015; Goerlich и др., 2020 Гуломов и Гайратов, 2020; Каюмов и Муродов, 2022; Сафаров и др., 2024; Каримов, 2024; Murodov и др., 2024.
Хамях	38.9519° 72.1874°	Мугоб	1958, между 1972 - 1973 гг. и 1976 - 1978 гг	Осипова и др., 1998; Коновалов и Рудаков, 2015.
Система ледников № 85 и 88	38.9910° 71.3237°	Хингов	1975–1978 гг. 1990–1992 гг. 2013–2017 гг.	Десинов, 1984; Осипова и др., 1998; Десинов, 2021; Десинов, 2024.

Мегдор (РГО)	38.6941° 72.0974°	Ванджоб	1960-1970-е годы с после- дующими продвижени- ями и колеба- ниями в его конечном по- ложении, наблюдавши- мися, по крайней мере, до марта 2008 года	Забилов, 1950; Забилов, 1952; Осипова и др., 1998; Котляков и др., 2003; Махмадалиев и Ябло- ков, 2005; Котляков и др., 2008; Коновалов и Рудаков, 2015; Goerlich и др., 2020; Восидов и др., 2021; Сафаров и др., 2024.
Дехдал (Дидалъ)	38.9962° 70.7287°	Сурхоб	1897, 1929 (1939) и 1974 гг.	Липский, 1902; Рототаев, 1974; Суслов, 1974; Усков, 1979; Осипова и др., 1998; Махмадалиев и Ябло- ков, 2005; Каюмов, 2021; Каюмов и Сафаров, 2022; Десинов и др., 2024.
Фортамбек	39.0013° 71.9209°	Мугоб	1983 - 1984 гг.	Осипова и др., 1998; Махмадалиев и Ябло- ков, 2005.
Система ледников Гандо	38.8973° 71.7430°	Хингов	1931, между 1990- 1991 2018-2020	Осипова и др., 1998; Котляков и др., 2021.
Саид Нафи- си	39.0925° 71.3883°	Сурхоб и Хингов	между 1972 - 1990	Осипова и др., 1998; Каюмов, 2022; Каюмов, 2023.
Ледники бассейна реки Шурак	38.9946° 70.8424°	Сурхоб		Десинов, 2021; Зарипов и др., 2020.

Многие пульсирующие ледники демонстрируют цикличность во временных интервалах между фазами ускорения. Цикличность пульсаций может варьироваться от ледника к леднику. У некоторых объектов на Памире наблюдаются относительно регулярные циклы, тогда как у других активность проявляется спорадически, что может быть связано с локальными геологическими условиями и водным режимом. Детальное изуче-

ние пульсирующих ледников в Памире позволяет выявить важные тенденции и исторические данные об их активности.

Следует отметить, что у ледника Хирсон (рисунок 1.10 - 1.15) наблюдаются пульсации с периодичностью 10-25 лет. Такие циклы могут быть обусловлены не только внутренними механизмами, но и климатическими флуктуациями. Колебания температуры воздуха, годовые суммарные осадки и фазовые переходы воды в теле ледника играют критическую роль в подготовке условий к следующей фазе ускорения.



Рисунок 1.10 –Ледник Хирсон (Медвежий) и озеро в долине Абдукагор при максимальном наполнении в 1963 году. Фото К. П. Рототаева (Осипова, 2015)

Более ранние исследования предоставляют информацию о подвижках нескольких ледников в регионе Памира, включая ледника Хирсон, с 1916 года, с заметными продвижениями в 1951, 1963 и последующих годах (Забилов и др., 1955; Осипова и др., 1998; Осипова, 2015; Goerlich и др., 2020) (рисунок 1.10). Ледниковые подвижки в 1963 и 1973 годах привели к образованию прорыва озер с катастрофическими последствиями ниже по течению. Кроме того, подвижки в 1989, 2001 и 2011 годах были меньшими по величине (Котляков и др., 2012; Осипова, 2015; Kotlyakov и др., 2018; Хромова и др., 2018).

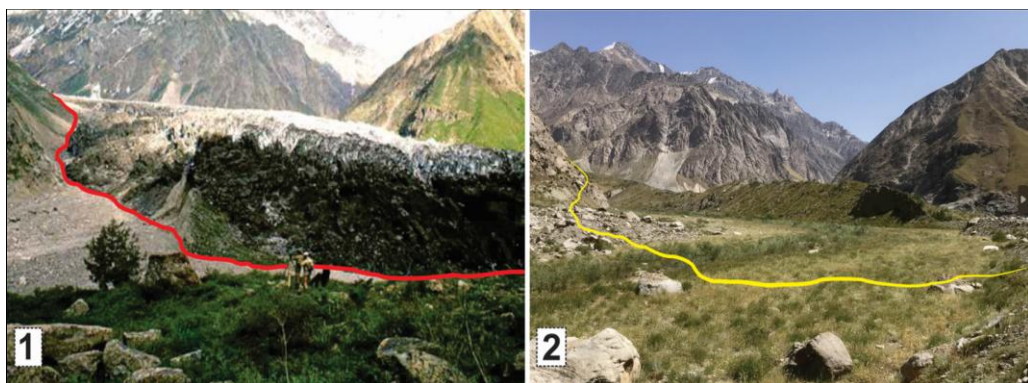


Рисунок 1.11 – Временные изменения положения ледника Хирсон (Медвежий): (1) июнь 1973 г. (Осипова, 2015), и (2) август 2023 г. (Murodov и др., 2024). Красная линия показывает положение конечной точки ледника в 1973 году, а желтая - в 2023 году, очерчивая степень отступления ледника за этот период и иллюстрируя значительные изменения положения за последние пять десятилетий.

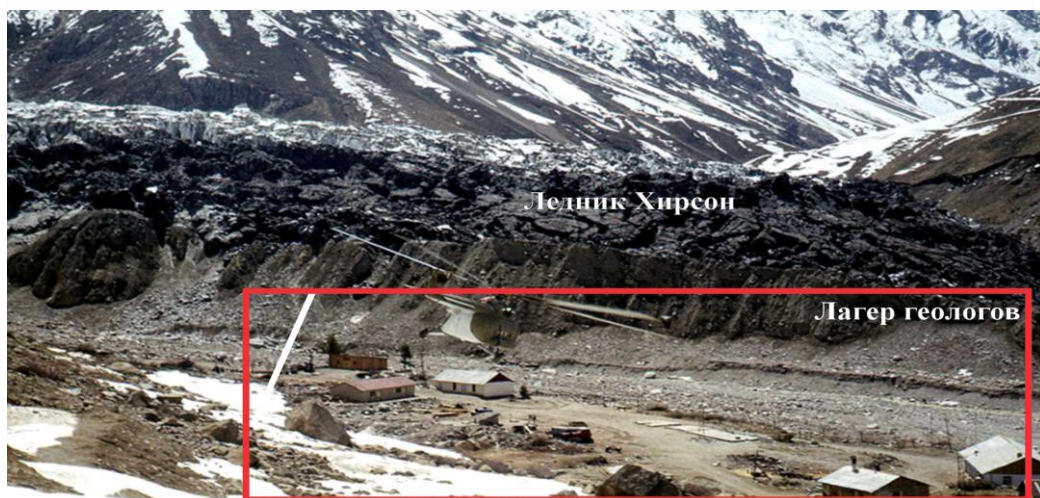


Рисунок 1.12 – Язык ледника Хирсон (Медвежий) сразу после выброса в июне 1973 года. Фотография Г. Осиповой (Truffer и др., 2021)

Аналогично, на леднике Мегдор зафиксированы следы значительного движения, задокументированное Котляковым и др. (2008) и Осиповой и др. (1998). В 1960-1970-х годах наблюдались внутренние движения его компонентов, начавшиеся в нижней терминальной части, с постепенным снижением скорости продвижения в конце (Осипова и др., 1998). В середине 20-го века ледник отступил на 2,6 км, оставив в нижней части покрытую обломками конечную морену. Реактивация пульсации ледника была замечена в 1965 году, с последующими продвижениями и колебаниями в его конечной точке, наблюдавшимися, по крайней мере до марта 2008 года, с заметными собы-

тиями, такими как каменная лавина в 2001-2002 годах, повлиявшими на его баланс массы и изменения потока (Осипова и др., 2015; Котляков и др., 2008; Harrison и др., 2015).



Рисунок 1.13 – Язык ледника Хирсон (Медвежий) в августе 2023 года. Фотография М.Сафарова



Рисунок 1.14 – Аэрофотоснимок ледника Хирсон (Медвежий). Август 2023 Фото Сафарова М.С.

В целом, оба ледника имеют историю пульсаций с заметными продвижениями и колебаниями на протяжении многих лет. Пульсирующее поведение привело к образованию ледяных плотин, прорыв озер, изменению ледника и сдвигам конечной точки, что в совокупности усиливает опасности

ниже по течению, поэтому в итоге важно рассмотреть возможность интенсивного исследования.

Несмотря на свою значимость, пульсирующие ледники Таджикистана, а также связанные с ними озера, в последние десятилетия оставались недостаточно изученными. Этот пробел в знаниях вызывает серьезные опасения, связанные с тем, что они подвергаются значительным трансформациям в условиях изменения климата. Глубокое понимание динамики пульсирующих ледников и связанных с ними водоемов востребованы для разработки эффективных стратегий управления и минимизации рисков, связанных с потенциальными катастрофическими последствиями. Таким образом, изучение пульсирующих ледников Таджикистана, особенно Памира, имеет ключевое значение для оценки климатических трендов и управления природными рисками.

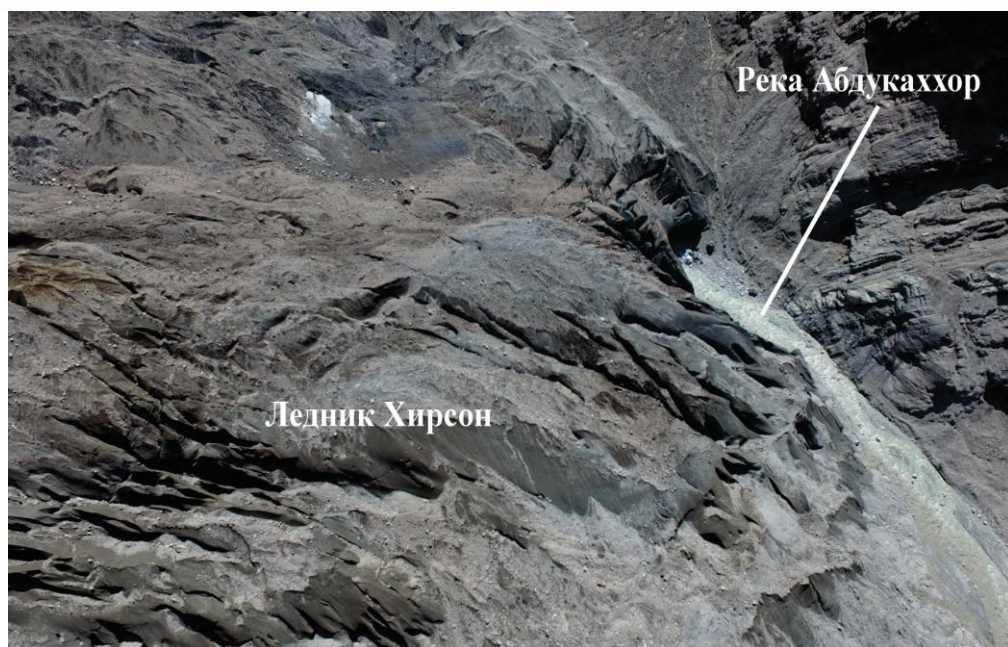


Рисунок 1.15 – Языковая часть ледника Хирсон (Медвежий) и река Абдукаххор. Август 2023. Фото Сафарова М.С.

Выявление закономерностей цикличности, картографирование активных ледников и внедрение систем раннего предупреждения должно стать приоритетом в рамках государственной стратегии по адаптации к климатическим изменениям. Международное сотрудничество, развитие специализированных лабораторий и включение пульсирующих ледников в национальную программу мониторинга горных экосистем позволит повысить устойчивость к климатическим вызовам региона.

Таким образом, пульсирующие ледники Таджикистана играют ключевую роль в динамике ледникового покрова и могут представлять серьезные угрозы экосистемам, угрожая экологической стабильности и безопасности местного населения. Несмотря на высокую опасность, пульсирующие ледники остаются недостаточно изученными. Основные риски связаны с образованием ледниково-подпрудных озер, возможными прорывами этих озер, лавиноопасными процессами, нарушением водоснабжения, изменением ландшафтной устойчивости долинных территорий и др. Более детальная информация о характеристиках пульсирующих ледников приведена в главе 3.

Глава 2. ЛЕДНИКОВЫЕ ОЗЕРА ТАДЖИКИСТАНА

2.1. Формирование ледниковых озер

Формирование ледниковых озер представляет собой одно из ключевых геоморфологических процессов в горных регионах, находящихся под воздействием продолжающейся дегляциации. В условиях изменения климата и сокращения ледникового покрова наблюдается активизация процессов генерации различных по морфологии и генезису ледниковых водоемов. Ледниковые озера, возникающие как результат взаимодействия климатических, геологических, гидрологических и гляциологических факторов, в последние десятилетия стали доминирующим элементом высокогорной гидросети, особенно в зонах с интенсивным таянием ледников.

В свете вышеизложенного, актуальность исследования механизмов формирования ледниковых озер, их типов, условий залегания и контролирующих факторов, особенно в горных регионах Таджикистана (Памир, Памиро-Алай), представляющие собой уникальную территорию по плотности и разнообразию форм ледниковых озер не вызывает сомнений.

Основным триггером образования водоемов ледникового происхождения является устойчивый рост среднегодовой температуры воздуха, особенно в летний период, приводящий к интенсификации абляционных процессов. Массовое таяние ледников сопровождается образованием значительных объемов талой воды, которая, при наличии соответствующих геоморфологических условий, аккумулируется в понижениях рельефа, создавая условия для формирования озер различного генезиса.

Ледниковые озера могут формироваться как на поверхности ледника (надледниковые озера или пруды), так и в прилегающих к нему ложбинах, цирках, трогах, моренных котловинах и в других формах рельефа, возникающих в результате гляциоденудационных и гляциоаккумулятивных процессов. По своей морфогенетической классификации ледниковые озера выделены в следующие типы: моренные, обвальные, ледниковые (внутриледниковые, надледниковые, субледниковые), скальные, каровые и смешанные, имеющие свою пространственную структуру и особенности формирования, связанные с различиями в геоморфологическом строении, типе ледника, характере преграды и гидрологическом режиме конкретного региона.

Процессы формирования ледниковых озер наиболее ярко выражены в высокогорьях Таджикистана, особенно на территории Памира, что связано с орографическими особенностями региона, где интенсивное выветривание, высокая степень расчлененности рельефа, а также высокая амплитуда колебаний температур способствуют быстрому разрушению ледниковых систем. Наблюдаемое в настоящее время увеличение количества леднико-

вых озёр представляет собой одно из ключевых проявлений ускоренной деградации горных ледников, что сопровождается возрастанием частоты и масштабов гляциально-обусловленных чрезвычайных ситуаций.

Установлено, что в результате повышения температуры в последние десятилетия ледниковые озера стали не только многочисленными, но и крупнее по размеру, что создает возможность для их переполнения и потенциального прорыва (Zhang и др., 2016; Сафаров и Фазылов, 2022). Кроме того, важную роль играют геологические факторы - наличие водоупорных и водопроницаемых пород, склонность склонов к обвальным процессам, тектоническая активность и сейсмичность региона, оказывающие дополнительное влияние на образование озерных котловин и плотин.

Одним из типов ледниковых озер являются моренные озера, формирующиеся в результате аккумуляции талой воды за фронтальными или боковыми моренами отступающих ледников. Природные моренные плотины, состоящие из неконсолидированных рыхлых обломочных отложений, часто имеют низкую фильтрационную способность и обладают ограниченной устойчивостью, которые являются наиболее распространёнными и одновременно самыми уязвимыми по отношению к разрушению. На Памире подобные озера встречаются в узких троговых долинах, окружённых крутыми склонами и расположенных ниже современной границы оледенения.

К другим типам озер, численность и площадь которых в настоящее время также демонстрируют тенденцию к росту, относятся надледниковые озера, образующиеся на поверхности активно деградирующих ледников, особенно в условиях развития зольных морен, когда талыми водами вымываются карманы на ледниковой поверхности, обнажая лед и способствуя развитию термокарстовых углублений (рисунок 2.1). Они, как правило, являются временными и их стабильность зависит от морфологии ледникового ложа, темпов абляции и погодных условий. Надледниковые пруды и водоемы играют роль в перераспределении тепловых потоков и локальном ускорении деградации ледника.

Внутриледниковые и субледниковые озера формируются в глубинных зонах ледников, в основном за счет накопления талой воды в трещинах или кавернах ледяной массы. Эти водоемы практически недоступны для прямого наблюдения и изучаются с использованием геофизических методов (например, радарного зондирования). Их формирование требует особых условий, в том числе наличие локальных впадин в ложе ледника и замкнутой системы дренажа. В случае дестабилизации внутриледникового водоема возможен его быстрый выход на поверхность, что также представляет потенциальную угрозу.



**Рисунок 2.1 – Аэрофотоснимок озера ледника Саид Нафиси.
Фото М.С. Сафарова**

Скальные и каровые озера формируются в результате таяния ледников, ранее заполнявших каровые депрессии или троговые долины. Они, как правило, ограничены более устойчивыми преградами и имеют продолжительное существование. В условиях Памира каровые озера встречаются в районах, ранее подверженных значительному оледенению, и нередко сохраняются десятилетиями после исчезновения ледника.

Особую группу составляют обвальные озера или озеро, запруженное льдом, формирующиеся вследствие образования плотины из обломочного материала в результате обвалов, подвижки ледников, оползней или камнепадов, перекрывающих русло водотока или ледниковую долину. Эти образования особенно характерны для районов с активной тектоникой и крутыми склонами. На Памире подобные озера нередко образуются в результате перекрытия речных долин, в том числе в районах, где ледниковая эрозия ослабила структурную устойчивость склонов.

Следует также выделить смешанные типы ледниковых озер, характерные сочетанием нескольких механизмов формирования. Например, обвальный материал оседающий на фронтальную морену, образуя дополнительную преграду, приводит к формированию сложной моренно-обвальной плотины.

Одним из важных аспектов является временная динамика формирования ледниковых озер. Установлено, что отдельные озера формируются в течение одного сезона таяния, другие в результате длительного отступления ледника на протяжении нескольких лет или десятилетий. Существенным

фактором, при этом, выступает интенсивность абляции, зависящая в свою очередь, от параметров радиационного баланса, альбедо поверхности, экспозиции склонов и снежного покрова. В этом контексте важны не только температурные характеристики, но и распределение и форма осадков, в том числе частота и интенсивность ливневых дождей, количество твердых осадков и длительность снежного покрова.

Региональные различия в условиях формирования ледниковых озер в Таджикистане определяются не только климатом и морфологией, но также орографией, экспозицией склонов и микроклиматическими факторами. К примеру, ледники северной экспозиции, как правило, обладают более устойчивыми ледяными телами, в то время как ледники южных и юго-западных склонов подвергаются более интенсивному солнечному облучению и быстрее теряют массу. Это напрямую отражается на характере и частоте образования озер.

Таким образом, процесс формирования ледниковых озер является результатом комплексного взаимодействия множества природных факторов, в том числе деградации ледников, термального режима, геоморфологии, геологии, климата и сейсмичности и является одним из наиболее заметных и ощутимых последствий изменения климата. При этом, изменения, происходящие в этом процессе, напрямую влияют на стабильность ледяных полей и создают новые риски, которые необходимо учитывать при планировании мероприятий по управлению водными ресурсами и адаптации к климатическим изменениям. Глубокое понимание этих процессов необходимо для прогнозирования динамики ледниково-озёрных систем, разработки эффективных мер мониторинга и управления водными ресурсами в условиях усиливающихся климатических изменений. Особое внимание должно быть уделено развитию картографических, геофизических и гляциологических методов для изучения ледниковых озер, особенно в зонах их активного формирования, таких как Памирский регион Таджикистана.

2.2. Эволюция ледниковых озер в условиях изменения климата

Эволюция ледниковых озер является одним из ключевых индикаторов климатических изменений в высокогорных регионах мира. В условиях глобального потепления, усилившегося со второй половины XX века, деградация ледников и сопровождающие её трансформации в гидрологической системе горных экосистем привели к активному формированию, расширению и слиянию ледниковых озер. В частности, этот процесс ярко проявляется в горных районах Центральной Азии, включая Памир в пределах Таджикистана, где наблюдаются как количественные, так и морфологические изменения ледниковых озер, обусловленные сложными взаимодействиями между атмосферными условиями, гляциологическими процессами и геоморфологическими особенностями рельефа.

В последние десятилетия спутниковые и аэрофотосъёмки, данные беспилотных летательных аппаратов, а также наземные полевые наблюдения предоставили новые возможности для анализа долгосрочной динамики ледниковых озёр. В частности, в Таджикистане и других странах Центральной Азии зафиксированы устойчивые тенденции увеличения общей площади ледниковых озёр, особенно в районах с интенсивно тающими ледниками. Согласно Khromova и др., (2006) и последующих исследований (Harrison и др., 2018; Safarov и др., 2024), на протяжении последних десятилетий количество и площадь ледниковых озёр в Памирском регионе выросли более чем в два раза и сосредоточены в интервалах высот от 3200 до 5000 м. над уровнем моря, где происходит активная деградация ледников и формируются соответствующие аккумулятивные формы рельефа, способные аккумулировать талую воду.

Только на территории бассейна реки Гунт по оценкам Наврузшоева и др. за 2022 года идентифицированы и каталогизированы 378 горных озёр (Наврузшоев и др., 2023), большинство из которых являются надледниковыми и приледниковыми, представляя собой опасные гидрологические явления, в низовьях рек.

Одним из ключевых факторов, определяющих эволюцию ледниковых озёр, является темп и характер деградации ледников. В условиях повышения температуры воздуха, особенно в летний период, наблюдается ускоренное таяние ледниковых языков, в том числе и их отрыв от фронтальных морен, что способствует образованию новых ледниковых озёр и расширению существующих. Уменьшение толщины и площади ледников ведёт к оголению ложа, заполненного моренными отложениями, ледовыми массами и фрагментами скальных пород, в результате чего формируются благоприятные условия для аккумуляции воды в виде моренных, каровых и надледниковых озёр. При этом морены и ледяные плотины, в зависимости от своей морфологии, пористости и внутренней структуры, оказывают разное влияние на стабильность водоёмов, что в свою очередь влияет на скорость их расширения и устойчивость.

Климатические изменения воздействуют также на режим осадков, частоту и интенсивность экстремальных погодных явлений, таких как сильные ливни, раннее таяние снега и дождь на снег в зимне-весенний период, увеличивающие приток воды в озера, особенно в весенне-летний сезон, в период максимальной аккумуляции талых вод. Изменение гидрологического режима, в том числе перераспределение влагозапасов между сезонами, может способствовать как краткосрочному, так и долгосрочному увеличению объёма ледниковых озёр. Наличие вечной мерзлоты и её деградация в высокогорных условиях также оказывает влияние на процессы фильтрации и дренажа, нарушая естественные пути оттока и способствуя накоплению воды в понижениях рельефа.

Многочисленные примеры из Памира свидетельствуют о различных сценариях эволюции ледниковых озёр. В одних случаях озера увеличи-

ваются в размерах линейно, повторяя очертания ложа отступившего ледника. В других случаях происходят скачкообразные изменения, связанные с частичным разрушением моренных плотин, обвалами, лавинами или слиянием нескольких озер в одно. Особенно интересен процесс трансформации надледниковых водоёмов в прогляциальные озера по мере деградации ледникового тела, когда талые воды скапливаются на поверхности или вблизи фронта ледника, а затем в результате отступления льда концентрируются в ранее покрытых ледником участках.

Изменения ледниковых озер затрагивают не только их размеры, но и форму, глубину, конфигурацию берегов и характер дна. С течением времени такие озера могут углубляться за счёт термокарстовых процессов и подмывания подводных склонов, а также расширяться вследствие таяния льда, ранее удерживаемого в плотине. В ряде случаев наблюдаются процессы частичной или полной миграции озёр в соседние ложбины при разрушении перемычек между ними. Эти морфологические трансформации сопровождаются существенными изменениями водного баланса, в том числе динамикой поступления, аккумуляции и отвода воды.

Кроме того, современные исследования всё чаще отмечают взаимосвязь между эволюцией ледниковых озёр и тектонической активностью региона. Памир как зона активного горообразования характеризуется высокой сейсмичностью, что может провоцировать обвалы, оползни и лавины вблизи ледниковых озёр, способствуя как расширению их площади, так и образованию новых водоёмов. Сейсмические события, включая землетрясения средней и высокой интенсивности, могут изменять структуру моренных и ледяных плотин, нарушать естественные дренажные пути и ускорять процессы трансформации озёрных систем.

Использование дистанционного зондирования и геоинформационных систем (ГИС) в том числе применение БПЛА открыло новые перспективы для комплексной оценки эволюции ледниковых озёр и позволяет выделить зоны потенциального формирования озер и отслеживать их динамику во времени. Использование мультиспектральной спутниковой информации (например, Landsat, Sentinel и другие) позволяет точно классифицировать типы водоемов, определять их пространственное распространение, площадь зеркала воды и морфологические параметры, а также позволяет установить устойчивые тренды увеличения озёрных площадей в течение последних десятилетий. Эти изменения имеют высокую пространственную неоднородность, зависящую от экспозиции склонов, наличия ледников, характера морен и других геоморфологических параметров.

На основании анализа многолетних данных установлено, что за последние десятилетия на территории Таджикистана, особенно на Памире произошло значительное увеличение количества и площади ледниковых озер, подтвержденные наземными наблюдениями и спутниковым мониторингом. Наиболее интенсивный рост наблюдается в районах с высокой

плотностью деградирующих ледников и слабоконсолидированных моренных образований.

Углублённое изучение темпов изменений и их пространственной структуры позволяет выявлять зоны наиболее активной трансформации, которые можно считать потенциально опасными с точки зрения формирования новых озёр и угроз их неустойчивости. Особенно востребованными, являются наблюдения за надледниковыми и внутриледниковыми водоёмами, которые быстро реагируют на температурные аномалии и могут сливаться в крупные аккумулятивные системы (рисунок 2.1 - 2.3), трансформация которых напрямую связана с изменением альбедо ледников, а также с процессами деградации многолетнего льда и формированием термокарстовых депрессий.

Эволюция ледниковых озёр оказывает значительное влияние на окружающую природную среду и водно-экологические системы региона. Увеличение объёма и площади водоёмов ведёт к изменению локального и регионального водного баланса, влияет на речной сток, биологическое разнообразие и структуру водных экосистем. Появление новых водоёмов вблизи ледников способствует изменению миграционных путей водных и околоводных организмов, формированию новых микроклиматических условий, а также созданию новых ландшафтно-гидрологических связей. Это особенно актуально в Памире, где экосистемы отличаются высокой чувствительностью к колебаниям температуры и влажности.



Рисунок 2.2 – Аэрофотоснимок надледниковых озера и пруды на на поверхности ледника Мегдор (РГО). Фото Сафарова М.С.

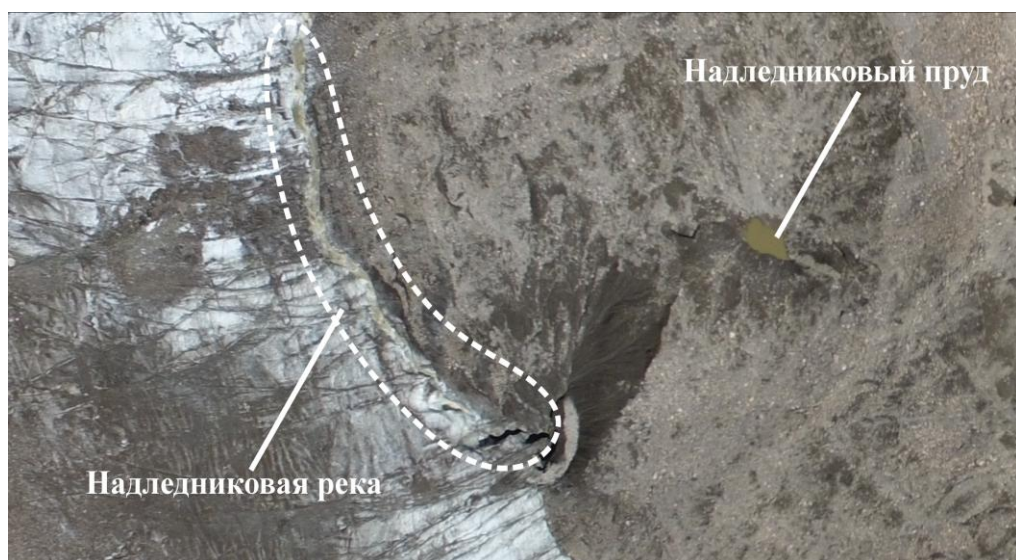


Рисунок 2.3 – Аэрофотоснимок надледниковых рек и прудов на поверхности ледника Хирсон. Фото Сафарова М.С.

Эволюционные процессы в ледниковых озерах оказывают значительное влияние также на сектора экономики региона. В условиях засушливого климата Таджикистана ледниковые воды играют важнейшую роль в обеспечении водными ресурсами сельского хозяйства, гидроэнергетики и водоснабжения. Изменения в структуре озёрного водоносного комплекса могут приводить к нестабильности речного стока, особенно в критические периоды вегетационного сезона. Снижение притока воды в реки из-за исчезновения или деградации ледников, или ледниковых озёр может угрожать устойчивому развитию горных и предгорных территорий. Кроме того, резкий сброс или осушение ледникового озера влечет за собой более высокую вероятность прорывов озер и наводнений, известных как прорыв ледникового озера или GLOF (Glacier Lake Outburst Floods) (Zhang и др., 2018; Harrison и др., 2018) которые могут иметь катастрофические последствия для населения и экосистем (Borah и др., 2022; Mergili и др., 2011a).

Таким образом, эволюция ледниковых озёр в условиях изменения климата представляет собой сложный, многокомпонентный и пространственно неоднородный процесс, зависящий от множества факторов - климатических, гляциологических, геологических и антропогенных. Учитывая важность этих процессов для природной и социальной среды Таджикистана, необходимы дальнейшие комплексные исследования, направленные на детальное понимание эволюционных механизмов в условиях климатической нестабильности.

2.3. Ледниковые озера - источники природных рисков

Ледниковые озера, формирующиеся в результате деградации ледников, представляют собой значительным источником потенциальных природных угроз в горных регионах, особенно в условиях изменения климата. Нестабильность их природы и динамическое развитие обуславливают высокую вероятность внезапных разрушений природных или частично искусственных преград, способствуют возникновению катастрофических паводков и как следствие образованию наводнений, вызванные именно прорывами ледниковых озер. Подобные явления сопровождаются высвобождением огромных объемов воды, зачастую с разрушительной силой, затопливанием долин рек, уничтожающие инфраструктуру, сельскохозяйственные земли и наносящие ущерб населенным пунктам иногда сопровождающиеся, к сожалению, человеческими жертвами.

Природа преград, удерживающих воду в ледниковых озерах, играет ключевую роль в определении их устойчивости. Моренные плотины, например, отличаются низкой фильтрационной способностью, слабой устойчивостью к внутреннему размыву и высокой восприимчивостью к сейсмическим воздействиям. Часто они не имеют плотного ядра, подвержены термокарстовым процессам и подмыву, особенно при наличии подтока из надледниковых озер или тающего льда. Ледяные и ледово-моренные преграды подвержены таянию и разрушению при резких температурных колебаниях, что также увеличивает риск прорывов. (Richardson и Reynolds, 2000; Mergili и др., 2011b).

Прорыв ледникового озера - явление, как правило, инициируется следующими триггерами:

- интенсивное таяние ледников в условиях высоких летних температур;
- интенсивные и продолжительные осадки, способствующие подъему уровня воды в озерах;
- землетрясения, способные привести к разрушению плотины или вызвать обвалы в чашу озера;
- ледопады, лавины или камнепады, провоцирующие внезапный приток воды или волну, нарушающую целостность преграды

Кроме того, изменение гидродинамики вследствие нестабильного водоотвода может вызывать разрушение пойменной инфраструктуры и транспортных магистралей. Также возрастает вероятность взаимодействия с техногенными объектами, включая плотины, дороги и линии электропередач.

В Памиро-Алайской горной системе, включая такие участки, как бассейны рек Сурхоб, Гунт, Бартанг и Ванджоб, наблюдается не только рост числа озер, но и увеличение их площади, что усиливает потенциальную опасность (Khromova и др., 2006; Наврузшоев и Фазылов, 2021; Murodov и др., 2024; Safarov и др., 2024a; Safarov и др., 2024b). Наиболее

критичными считаются надледниковые озера, формирующиеся на поверхности отступающих ледников. Их нестабильное положение и высокие скорости сдвига льда способствуют образованию разломов и каналов, по которым вода может неожиданно прорваться вниз по склону.

Ниже приведены примеры катастрофических гляциальных селей в Таджикистане, включая прорывы озёр и отколы ледников (рисунки 2.4 - 2.6):

- **16 июля 2015 года** в селе Барсем (Горно-Бадахшанская автономная область) образовался мощный селевой поток, вызванный прорывом ледникового озера, расположенного на высоте около 4250 м. По оценкам специалистов, объём селевого потока составил приблизительно 4,2 млн м³. Поток уничтожил значительную часть инфраструктуры села, сместил русло реки Гунт и привёл к формированию подпрудного озера Барсемкуль длиной 2,4 км и глубиной 13-15 м. Непосредственно под селевым конусом осталось 11 хозяйств. Образовавшимся озером были затоплены около 70 хозяйств, более 2 км автодороги, соединяющей Таджикистан с Китаем и Киргизией, 5 мостов (из них 3 автомобильных и 2 пешеходных), медицинский пункт, школа, торговые точки, сады и плодородные земли, десятки километров воросительных сетей. Также была разрушена основная высоковольтная линия подачи электроэнергии от ГЭС Памир-1.



Рисунок 2.4 – Последствие ледниковых опасных явлений в Таджикистане (Фото с интернет ресурсов)

- **28 августа 2016 года** в селе Себистон (Таджикабадский район) произошёл откол части ледника, превратившийся в массивный оползень, который перекрыл русло реки Шурак и привёл к разрушению домов, мостов и инженерных коммуникаций в населённых пунктах Фатхобод и Капали. Жертв среди населения зафиксировано не было, однако ущерб инфраструктуре был значительным.

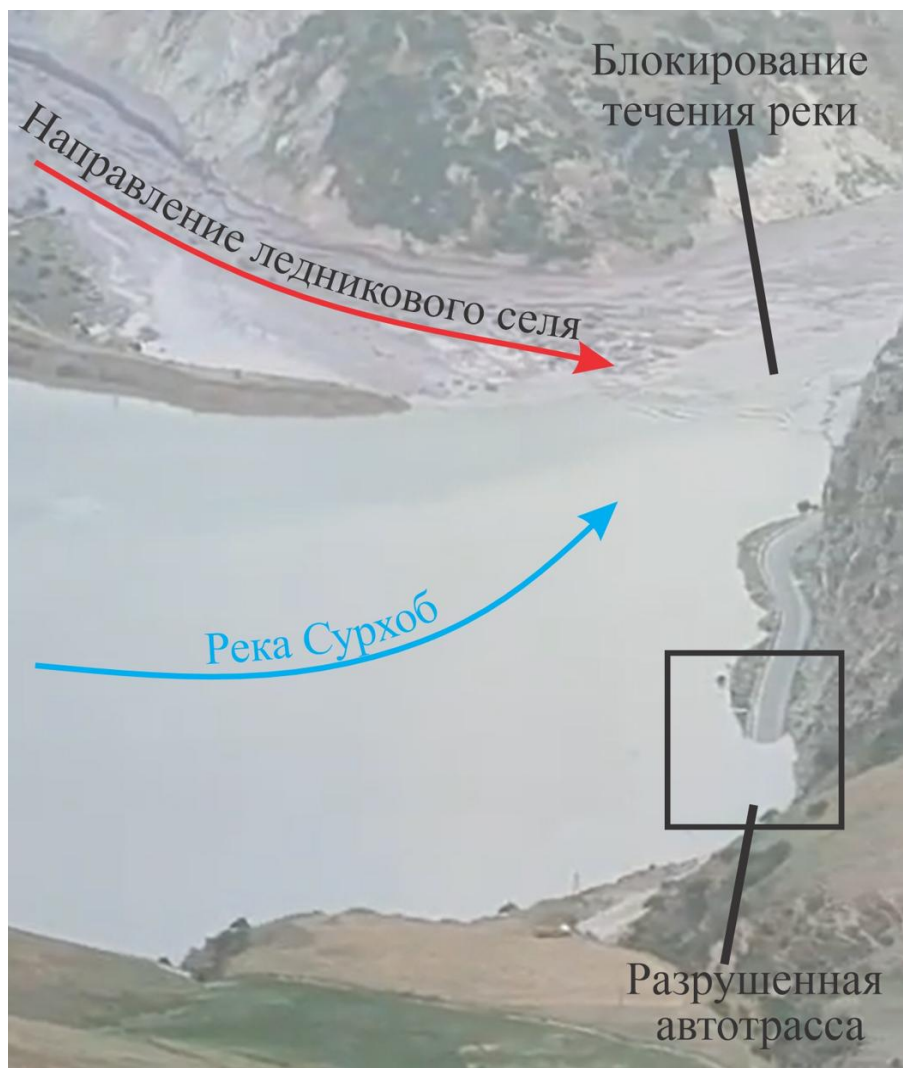


Рисунок 2.5 – Частичное закрытие и подъем уровня реки Сурхоб после очередного прорыва озер на участке Арчакала. (Фото с интернет ресурсов)

- **Июнь 2023 года** в Рошткалинском районе (Горно-Бадахшанская автономная область) зафиксированы разрушительные паводки, вызван-

ные резким повышением температуры воздуха, что привело к ускоренному таянию горных ледников и снежников, а также к резкому подъему уровня воды в реке Шахдара. В результате возникшей чрезвычайной ситуации были повреждены жилые дома, мосты, участки дорог, а также сельскохозяйственные угодья, в долине.

- **Июль 2023 года** в районе ледника Саид Нафиси, расположенного на северном склоне хребта Петра I, произошел гляциальный селевой поток, спровоцированный активным таянием ледника и формированием временных ледниковых озёр. Сели нанесли ущерб транспортной инфраструктуре, в частности, разрушили участки автодороги Душанбе - Лахш и вызвали смещение русла реки Сурхоб. Следует отметить, что в этом районе в предыдущие годы (2020–2022) также наблюдалась высокая частота подобных явлений. Зафиксированы как минимум пять эпизодов гляциальных селей: 12 июня 2020 года, 11 августа 2020 года, 28 июля 2021 года, 9 сентября 2021 года и 25 июля 2022 года.

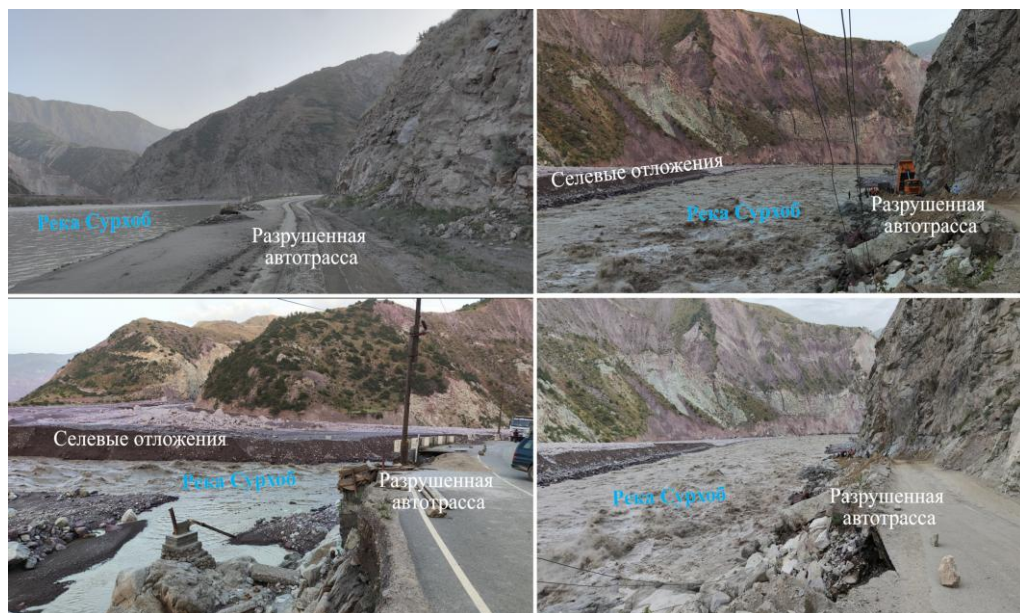


Рисунок 2.6 – Повреждённая автодорога после очередного прорыва озера ледника Саид Нафиси. Фото Сафарова М.С.

Наряду с физическими угрозами, ледниковые озера представляют собой социально-экономический риск. Большинство высокогорных районов Таджикистана зависят от сезонных водных ресурсов для нужд орошения, питьевого водоснабжения и выработки электроэнергии. Нарушение стабильности водообеспечения в результате разрушения ледниковых озёр может отрицательно сказаться на системе жизнеобеспечения населения. Особенно уязвимыми к таким измене-

ниям являются малонаселённые сельские общины, не обладающие достаточной инфраструктурой для адаптации к экстремальным природным явлениям (Li и др., 2019; Vorah и др., 2022).

Также необходимо отметить риски, связанные с долгосрочной трансформацией гидрологического режима. С уменьшением объемов льда и переходом водоснабжения в сезонный режим возрастает угроза дефицита воды в летний период, когда потребность наиболее высока. Образование большого количества нестабильных озер также усложняет прогнозирование водного баланса, затрудняя планирование в сельском хозяйстве и энергетике.

С учётом нарастающей частоты экстремальных климатических явлений, усиления сейсмической активности и интенсивного таяния ледников, задача мониторинга ледниковых озер становится первоочередной.

В связи с вышеизложенным необходимо:

- наладить постоянный мониторинг и практиковать регулярное дистанционное зондирование ледниковых озёр с использованием спутниковых данных (Landsat, Sentinel и др.);
- систематически осуществлять полевые гидрологические и геоморфологические исследования;
- разработать и реализовать интегрированные системы раннего оповещения о прорывах (например, с использованием дронов, автоматических датчиков уровня воды и температурных логгеров);
- осуществить геоинформационное картографирование всех потенциально опасных ледниковых озер с приоритизацией объектов по уровню угрозы.
- необходимо провести идентификацию и каталогизацию всех озёр Таджикистана с последующей классификацией по степени потенциальной опасности, а также разработкой паспортов для всех опасных озёр

В современных условиях налаживание сотрудничества между государственными учреждениями, научным сообществом, международными организациями и местными сообществами, является значимым фактором решения задач по минимизации рисков стихийных бедствий связанных с ледниковыми озерами.

Повышение информированности населения о природных рисках, обучение действиям в чрезвычайных ситуациях и вовлечение местных жителей в процессы мониторинга могут существенно повысить адаптивный потенциал регионов.

Таким образом, ледниковые озера в Таджикистане - это не только элементы быстро изменяющегося горного ландшафта, но также и сложные природные объекты, обладающие высоким потенциалом опасности, требующие углубленного научно-практического внимания.

Учитывая динамику изменений в ледниках и ледниковых озерах в контексте изменения климата, настоятельно необходимо разработать системы мониторинга и управления как для уменьшения рисков и их последствий, так и для обеспечения устойчивого развития регионов, расположенных вблизи ледниковых озер. Их детальное изучение, постоянное наблюдение и интеграция в стратегии адаптации к изменению климата и управления рисками являются необходимыми условиями минимизации ущерба и обеспечения устойчивого развития горных территорий.

Глава 3. МОНИТОРИНГ ЛЕДНИКОВ И ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР - УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ

Изменение климата, сказывающееся в глобальном повышении температуры воздуха, становится одной из основных причин ускоренного таяния ледников и снежных полей по всему миру. Особенно эта проблема актуальна для горных стран, в том числе и для Таджикистана, где ледники не только являются важным источником пресной воды, но и играют ключевую роль в устойчивости экосистем и экономики региона. Следовательно, внедрение системного мониторинга состояния ледников и ледниковых озер, позволяют реализовать оперативную оценку текущих изменений климата, с разработкой мер минимизации и предупреждения возможных катастрофических последствий гляциологических рисков (прорыв озер, сели, наводнения).

3.1. Исследование состояния ледников и ледниковых озер. Управление рисками, с использованием наборов данных высокого разрешения

3.1.1. Использование космического мониторинга ледников и ледниковых озер

Современные технологии предоставляют уникальные возможности для изучения ледников и ледниковых озер. Спутниковые данные, такие как Landsat 2-9, Sentinel 2A предоставляют изображения с хорошим пространственным и временным разрешением, что позволяет детально отслеживать изменения на поверхности Земли (Хабаров и др., 2019; Сафаров, 2020;). Данные, собранные в видимой, ближней и коротковолновой инфракрасной областях спектра, способствуют глубокому анализу динамики ледников и ледниковых озер (Воробьева, 2012; Шовенгердт, 2013; Roy и др., 2014; Safarov 2024a). Это важно для понимания не только темпов их таяния, но и общего состояния водных ресурсов в регионе.

Спутниковые данные Sentinel-2 с пространственным разрешением до 10 м позволили нам детально изучить динамику ледниковых озёр, определить критически важные для оценки рисков селевых потоков и наводнений критерии, а также оценить состояние берегов рек. Кроме того, была выявлена взаимосвязь между ледниковыми отводами и изменениями состояния ледниковых водоёмов.

В рамках реализованных исследований, с целью тщательной оценки изменений параметров ледников и их водоемов, использованы данные спутников Landsat, включая данные со сканеров Enhanced Thematic Mapper (TM), Thematic Mapper Plus (ETM+) и Operational Land Imager (OLI). Одним из

ключевых методов, подтвердивших свою эффективность в четком определении границ водных объектов, включая ледниковые озера, стало использование нормализованного разностного водного индекса (NDWI).

В процессе исследований активно использовались также данные цифровых моделей рельефа (Digital Elevation Model, DEM) от ALOS PALSAR, полученные из архива Alaska Satellite Facility, сыгравшие решающую роль в создании более точных карт уклона и экспозиции ледников, что дополнительно обогатило наше понимание их динамики. На основе результатов предыдущих исследований, установлено, что полученные данные позволяют с высокой точностью моделировать характеристики ледников и их взаимодействие с окружающей средой (Jiang и др., 2012; Yan и др., 2013). Для визуализации изменений ледников и их водоемов в различных временных интервалах был применен анимационный подход в ArcMap, позволяющий не только установить изменения, но и сделать процесс анализа более интуитивно понятным для пользователей.

Одним из факторов, способствующих улучшению качества анализа, стала высокая точность и детальность получаемых изображений, включая работы по маскировке облаков, рекомендованные Banerjee и др. (2024a), обеспечивающие надежность данных для дальнейшего изучения изменений, касающихся не только ледников, но также экологической политики в целом.

Для анализа границ водных объектов нами использованы методы нормализованного разностного водного индекса, что позволило не только увидеть четкие границы ледниковых озер, но также учитывать их меняющиеся размеры под воздействием климатических условий (Gautam и др., 2015). Важно отметить, что спутниковые технологии, хотя и мощные, иногда имеют ограничения, особенно касающиеся малых водоемов, что стало причиной использования данных, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Этот метод позволяет получить высококачественные карты малых водоемов, как, например, надледниковые (супрагляциальные) водоёмы формирующиеся на поверхности ледников (Xu и др., 2022; Bisset и др., 2023) и является подтверждением важности комплексного подхода к мониторингу ледниковых систем.

Использование различных технологий и их синергия создают прочную основу для точного анализа состояния ледников и ледниковых озер, что, в свою очередь, способствует разработке эффективных стратегий управления водными ресурсами и снижению риска природных катастроф в будущем. Так как ледники оказывают влияние на местные сообщества, экосистемы и экономические системы, то мониторинг ледников должен включать в себя не только наблюдение за физическими характеристиками, но и всесторонний анализ социальных и экономических аспектов, связанных с изменениями криосферы. Таким образом, реализованное исследование представляет собой не только научный вклад, но также является потенциально значимым вкладом в достижение целей устойчивого развития.

3.1.2. Мониторинг с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Аэрофотосъемки.

Для проведения комплексных исследований динамики ледников и ледниковых озер, а также зон, подверженных потенциальным воздействиям селепроявлений, нами использованы беспилотные летательные аппараты (БПЛА) - квадрокоптер DJI Phantom 4 и фиксированный крыло QC-2 Micro БПЛА (Таблицы 3.1 и 3.2).

Квадрокоптер обладает высокой маневренностью и возможностью съемки на низких высотах, позволяющий осуществлять детальные аэрофотосъемки разрушений в зонах отложений грязевых потоков. Следует также отметить, что фиксированное крыло Micro UAV QC-2, с размахом 1,8 м и длиной 1,1 м, обеспечивает продолжительность полета более 1 часа, что позволяет охватывать значительные площади (от 10 до 50 км², в зависимости от высоты полета) (Safarov and Fazylov 2020).

Для аэрофотосъемки использовалась камера Sony RX1R II, настроенная на фокусное расстояние 35.00 мм, выдержку 1/1250 и автоматические настройки ISO, обеспечивающая высокое качество получаемых изображений, позволяющие эффективно фиксировать изменения в ландшафте даже в условиях сложной освещенности. Квадрокоптер DJI Phantom 4 благодаря своей способности выполнять высокотоную съемку на малых высотах, представляет собой эффективный инструмент для детального картографирования и анализа локальных изменений в криосферных и геоморфологических условиях (Hamdi и др., 2019).

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики БПЛА QC-2 Micro

БПЛА QC-2 Micro UAV 	Основные технические характеристики	
	Длина	1.1 м
	Ширина	1,8 м
	Макс. Загрузка	0,5 кг
	Взлётный вес	3,5 кг
	Крейсерская скорость	60 км/ч
	Макс. высота н.у.м.	5000 м
	Длительность полёта	около 1 час

Таблица 3.2 – Основные технические характеристики квадрокоптера DJI Phantom 4

Рисунок 	Основные технические характеристики	
	Макс скорость	20 м/сек.
	Масса	1380 г
	Макс. высота н.у.м.	6000 м
	Длительность полёта	28 минут (прибл.)

Фиксированные БПЛА, такие как Micro UAV QC-2, позволяют проводить исследования по большим площадям, покрывающие расстояния более 15 км, минимизирующие риски, связанные с полетами в сложных условиях. Данные, полученные с помощью БПЛА, активно использовались для геопрос- пространственного анализа и картирования ледников, позволяя лучше понять их изменения в ходе исследования. Именно такой комплексный подход стал важным инструментом для разработки низкозатратных методов картографирования и мониторинга опасных районов Таджикистана (рисунок 3.1).

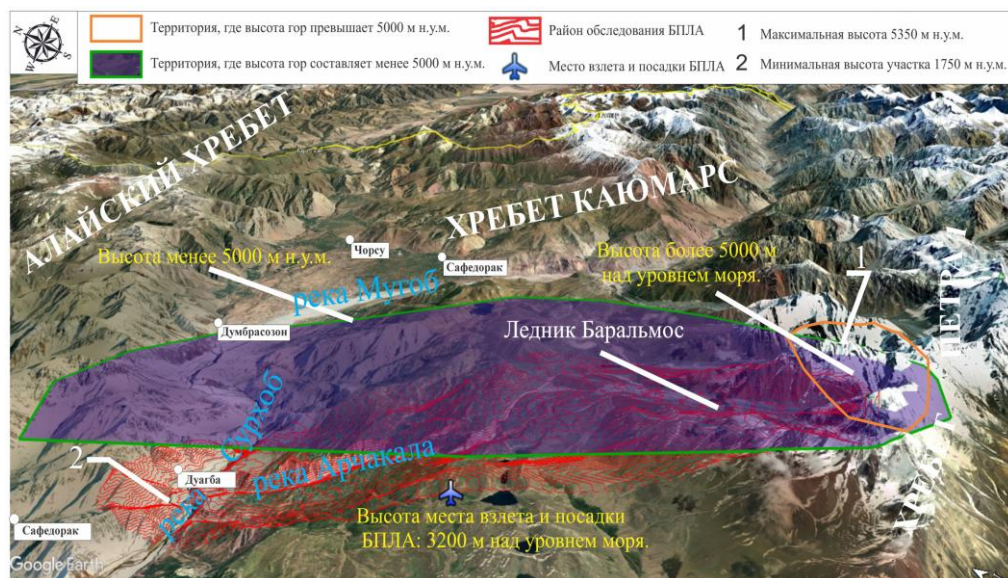


Рисунок 3.1 - Организация аэрофотосъёмки с использованием БПЛА Micro UAV QC-2 на территории бассейна реки Арчакапа, впадающей в реку Сурхоб и питаемой ледником Саид Нафиси (Баральмос).
(Фоновое изображение: © Google Earth)

Для захвата высококачественных изображений исследуемых ледников использовались две различные платформы БПЛА, продемонстрировавшие свою эффективность и безопасность в условиях высокогорья и горных районов Таджикистана (Сафаров и др., 2024). Полеты проводились как в ручном, так и в автоматическом режимах, используя программное обеспечение APM Mission Planner для QC-2 и DJI GO4/Drone Deploy для DJI Phantom 4.

Аэрофотоснимки получены с помощью открытого программного обеспечения (Ryan и др., 2015) по заранее заданным маршрутам с наклоном 80% по продольной оси и 65% по поперечно выполненным в виде сетки (рисунок 3.2). Обязательным условием, при планировании съёмки являлось соблюдение оптимального поперечного и продольного перекрытия, а также высоты полёта с учётом рельефа местности.

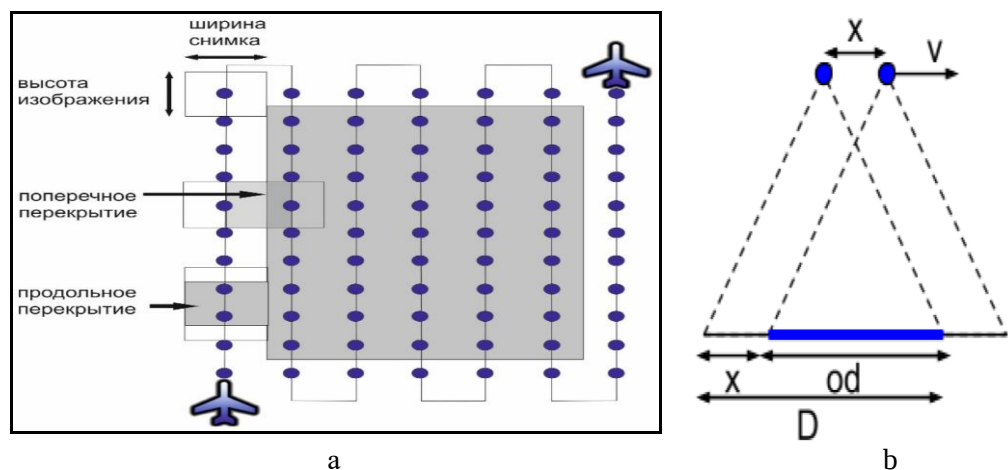


Рисунок 3.2 – Схема проведения аэрофотосъёмки с БПЛА

Скорость съёмки изображения для достижения заданного фронтального перекрытия зависит от скорости БПЛА / самолёта, GSD (Ground Sampling Distance - Наземный образец расстояния) и пиксельного разрешения камеры (Pix4D, 2021):

$$od = \text{перекрытие} * D \quad (3.1)$$

$$x = D - od \quad (3.2)$$

$$t = x / v \quad (3.3)$$

где: D - расстояние, охватывающее территорию одним изображением в направлении полёта [м]; перекрытие - процент желаемого фронтального перекрытия между двумя изображениями; od - перекрытие двух изображений

жений в направлении полёта [м]; x - расстояние между двумя положениями камеры в направлении полёта [м]; v - скорость полёта [м/с]; t - время, прошедшее между двумя изображениями (скорость изображения) [с];

GSD - расстояние выборочного контроля земли, т.е. расстояние между центрами двух последовательных пикселей на земле, влияющий на точность и качество конечных результатов, а также на детали, которые видны в окончательной ортомозаике.

При полете БПЛА, его камера была ориентирована шириной сенсора (длинный размер) перпендикулярно направлению полёта.

$$D = Dh = (imH * GSD) / 100 \quad (3.4)$$

где:

Dh - расстояние, пройденное на земле одним изображением по высоте (высота следа) [м]; imH - высота изображения [пиксель]; GSD - желаемый GSD [см / пиксель].

Для обеспечения высококачественных и четко интерпретируемых пространственно-временных изображений, оптимальное время для съемки было выбрано в середине дня, когда тени минимальны. Полученные изображения затем обрабатывались, путем создания ортомозаики и цифровых моделей рельефа (DEMs) (Immerzeel и др., 2014). Для обработки данных, полученных с фиксированного крыла QC-2, нами в начале выполнялась сортировка и организация данных в MS Excel. В тоже время, для DJI Phantom 4 эти данные были уже интегрированы в полученные изображения. Геотегированные изображения подвергались дальнейшей обработке с использованием программного обеспечения Pix4Dmapper, что позволяло создать единую комбинированную картину с привязкой к координатам (рисунок 3.3).

Для повышения точности конечных продуктов были использованы строгие методы постобработки, в том числе добавление ручных контрольных точек (MTP) в Pix4Dmapper, что позволило минимизировать и устранить неопределенности, одновременно повысив достоверность полученных ортомозаик и DEM (Alidoost и др., 2017; Che Mat и Tahar, 2019; Terrati Losè и др., 2020) (рисунок 3.3 и 3.4).

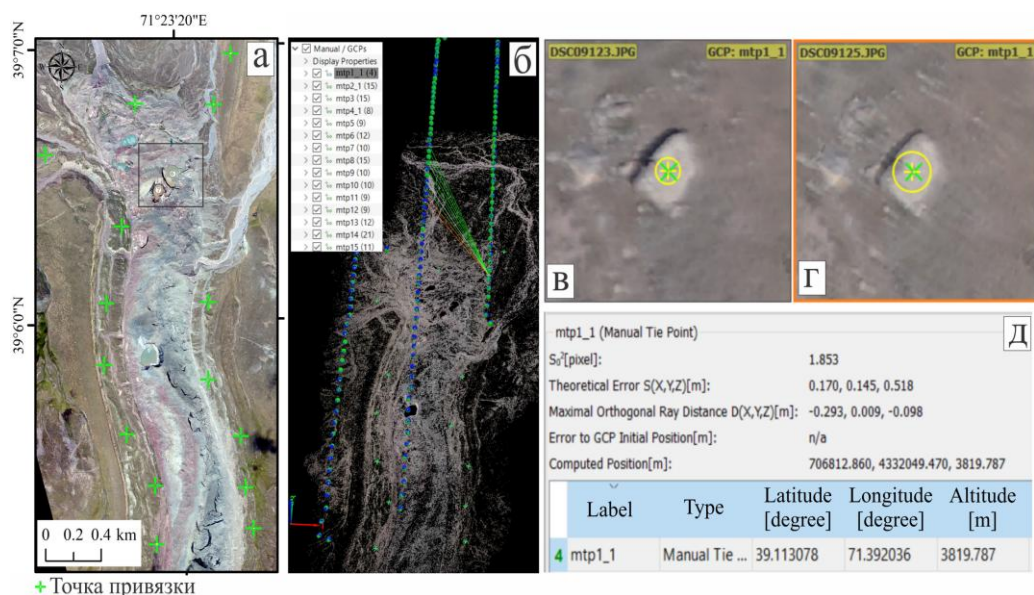


Рисунок 3.3 - Процесс обработки данных БПЛА. Облако точек и распределение ручных связующих точек из Pix4dmapper

Обработка изображений включала трехступенчатую рабочую схему:

Начальная обработка: Интеграция данных для определения различных особенностей изображения; оптимизация ориентации камеры и фокусного расстояния, включая наземные контрольные точки.

Точка облака и поверхность: Создание дополнительных контрольных точек на основе автоматических точек и получение плотного облака точек, создание 3D текстурированной поверхности.

Цифровая модель поверхности (ортомозаика): Создание цифровой модели поверхности путем объединения нескольких аэрофотографий с использованием техники ортографической трансформации.

Использование контрольных точек на стабильной местности для обработки исходных аэрофотографий позволяло существенно улучшить точность результатов (Benoit и др., 2019; Fu и др., 2021; Groos и др., 2022). Например, для ледника Саид Нафиси нами использованы данные первого полёта БПЛА для получения финальных продуктов и выявили 15 стабильных точек – например скалы или крупные валуны, которые оставались неизменными в обеих съёмках, и были помечены как ручные контрольные точки (MTPs) (рисунок 3.4).

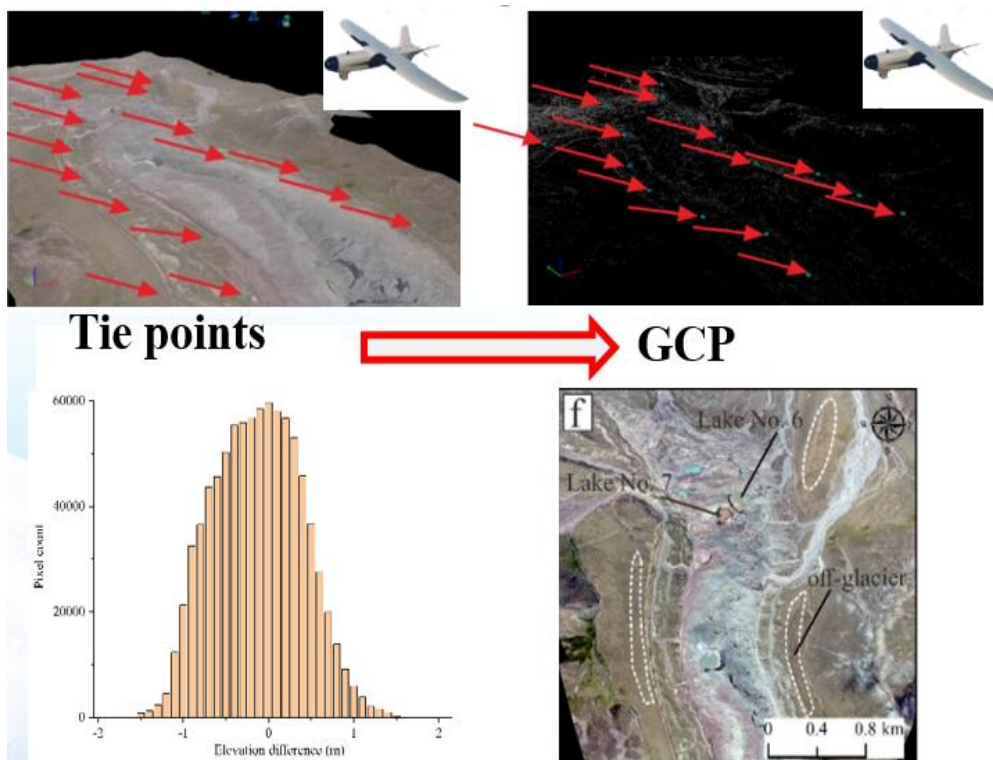


Рисунок 3.4 – Процесс обработки данных на участках ледников с применением БПЛА

Таким образом, благодаря использованию двух съёмок с БПЛА (2020-2022) была достигнута детальная оценка быстрых изменений в нижней части ледника и сопредельных озёр. Это обстоятельство требовало сосредоточенных усилий для фиксирования динамических изменений на протяжении короткого времени.

Следует отметить, что нами использованы аэрофотографии, полученные с помощью БПЛА, с высоким пространственным разрешением менее 0,4 м имеющее решающее значение для точного картирования ледников и небольших водоемов, таких как супрагляциальные озера или пруды, поскольку доступные спутниковые изображения, такие как Landsat, с пространственным разрешением 30 м (15 м панхроматический канал) не столь эффективны для изучения и делинирования малых водных объектов (Melville и др., 2019; Bisset и др., 2023).

Система координат выходных данных - это WGS84/UTM 42N. Количество перекрывающих изображений указывает на область интереса (Area of interest (AOI), охваченную более чем пятью изображениями, что приводит к улучшению качества конечного продукта. Кроме того, вариация моделируемой цифровой модели поверхности (DSM) значительно уменьшается при

наличии пяти перекрывающихся изображений (Hendrickx и др., 2018). Высококачественные результаты получаются при достаточном количестве совпадений ключевых точек для этих областей (рисунок 3.5).

Полученные данные подтверждают высокую востребованность применения технологий БПЛА для мониторинга ледников и оценки природных рисков. На наш взгляд, дальнейшее развитие и интеграция современных технологий значительно расширят возможности по изучению динамики ледников в условиях меняющегося климата, тем самым способствуя более эффективным стратегиям управления смягчением последствий и адаптации к экологическим вызовам в горных регионах.

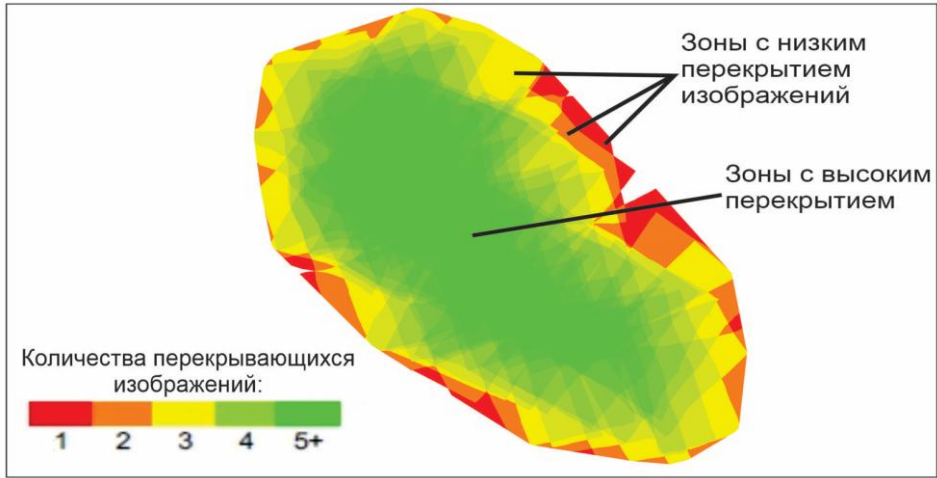


Рисунок 3.5 – Количество перекрывающихся изображений, вычисленное для каждого пикселя ортофотоплана

3.2. Исследования и мониторинг изменений потенциально опасных ледников. Пульсирующие ледники.

Природные риски

3.2.1. Изменения в потенциально опасных ледниках Таджикистана и гляциологические риски

Начиная с 2017 г. по настоящее время Научно-исследовательским центром экологии и окружающей среды совместно с научными учреждениями Национальной Академии наук Таджикистана активно применяются БПЛА для мониторинга окружающей среды в частности рек, озер, ледников, опасных природных явлений (сели, наводнения, оползни). При непосредственном участии Сафарова М.С. были организованы и проведены исследования, полевые-мониторинговые работы с использованием БПЛА в том числе пульсирующих ледников и ледниковых озер Таджикистана.

Одной из ключевых ледниковых зон Таджикистана являются Памирские горы, расположенные в верхней части бассейна реки Амударья, которые являются жизненно важными объектами и источниками водных ресурсов в Центральной Азии (Kreuzberg и др., 2004; Zhiltsov и др., 2020; Ahmadi и др., 2024). Большая часть стока Амударьи формируется в Таджикистане, питаясь в основном рекой Вахш и более крупной рекой Пяндж (Babaev, 1999; Агальцева и др., 2011).

Первое исследование ледников (июнь 2019 года), осуществлено совместно со специалистами Государственного научного учреждения «Центр изучения ледников Национальной Академии наук Таджикистана» в верховьях бассейна р. Сиёма (рисунок 3.6).

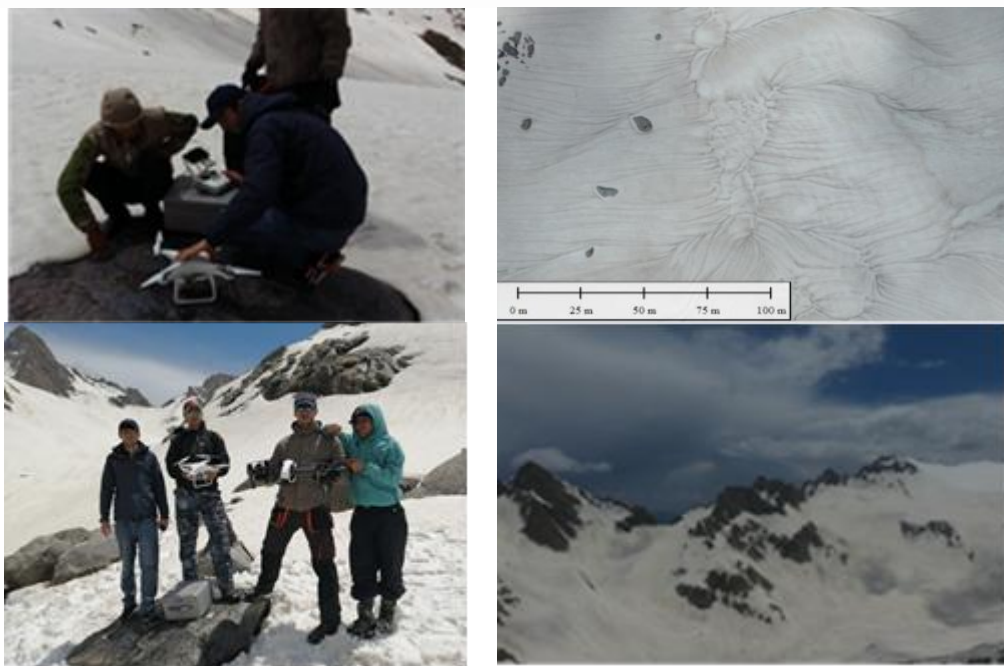


Рисунок 3.6 – Предполетная подготовка и снимок местности, полученный с использованием квадрокоптеров DJI Phantom 4 и DJI Inspire 1. Верховья бассейна р. Сиёма, 2019 г. На фотографиях Сафаров М.С. Восидов Ф., Собиров С., Давлатов Дж. и Сафаров Х.

С целью сбора информации о состоянии ледников с помощью квадрокоптеров DJI Inspire и DJI Phantom 4 были проведены полеты на высоте 3860 м над ур. м. и получены снимки с разрешением 22 см и видеозапись в формате HD. Но к сожалению, из-за большого покрытия снега не удалось исследовать ледник детально (полное покрытие ледника снегом усложняет картирование с RGB камерой БПЛА). Изыскания с использованием БПЛА по исследованию ледников Таджикистане, подтвердила их востребованность.

На рисунке 3.7 представлен процесс подготовки к мониторингу состояния ледника Дехдал (Дидалъ) в Таджикабадском районе. 19 июля 2019 г. были осуществлены аэрофотосъемки с использованием БПЛА и получены снимки с разрешением 28 см с высоты 5060 м над ур. м.



Рисунок 3.7 – Подготовка БПЛА для полета. На фотографиях: Каюмов А., Сафаров М.С., Халимов А. и представитель местной администрации Таджикабадского района. 2019 г.

С 6 по 13 августа 2020 года в бассейне реки Сурхоб на территории Лахшского и Таджикабадского районов совместно со специалистами Государственного научного учреждения «Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана» были проведены аэрофотосъемки ледника Дехдал, ледников бассейна реки Шурак и ледник Саид Нафиси.

Учитывая быстрое таяние ледников, увеличение зеркальной площади ледниковых озер, а также непредсказуемых ледниковых пульсаций в августе 2023 гг. были проведены полевые работы в ледниках Мегдор и Хирсон. Ход полевых работ и результаты этих исследований более подробно описаны ниже.

Ледник Дехдал - сложно-долинный ледник, берущий начало на крутых склонах пика Каудаль (4778 м над уровнем моря), расположен на северном склоне хребте Петра Первого, в бассейне реки Сурхоб (рисунок 3.8) являющийся опасным движущимся ледником, спровоцировавший несколько селевых потоков (Ледники Таджикистана, 2003). Площадь ледника - 1,6 км², длина - 4,8 км, тип ледника - сложно - долинный, экспозиция - северо-восточная, высота языковой части - 3220 м, максимальная высота - 3500 м,

Приток реки - бассейн реки Сурхоб, координаты - 38°59'24.13" с.ш., 70°43'5.89" в.д. (Каталог ледников СССР, 1971; Каюмов и Сафаров, 2021).

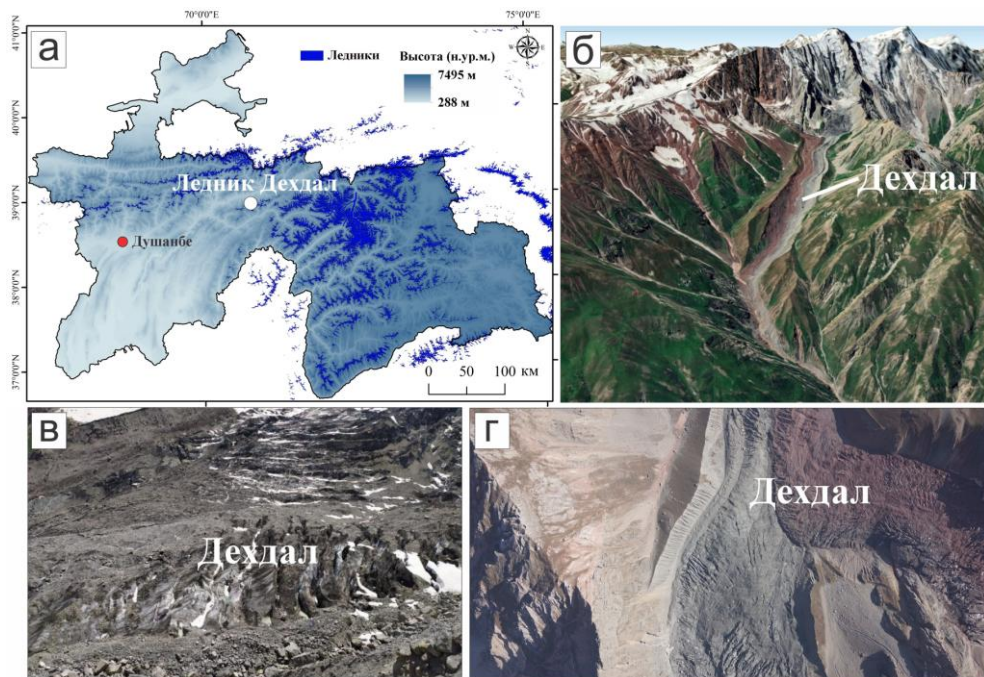


Рисунок 3.8 – Расположение ледника Дехдал на карте Таджикистана и на снимке Google Earth (а-б), Снимки ледника в 2019 г. (Фото Х.Д. Наврузшоева) и 2023 г. (М.С. Сафарова) (в-г)

Резкое увеличение скорости передвижения ледника наблюдавшийся в 1974 году привело к увеличению длины ледника на 600 метров и формированию сильных селей, устремившихся вниз по руслу Каудаль. От ледника Дехдал оторвалась передняя его часть длиной 600 метров, объёмом примерно 1.5 млн. м³ льда и гигантский поток с высокими волнами с дроблённым грязно-голубым льдом устремился, сдирая дерн вниз, по склону. Вследствие этого поверхность ледника опустился на 20-50 метров, а в верховьях образовались отвесные ледяные ступени и обрывы высотой до 60 метров, с уменьшением ширины ледника в течение 2 лет после пульсации ледяной завал на реке Каудаль постепенно таял (Ледники Таджикистана, 2003). Ниже (рисунок 3.9а) для сравнения приведены фото 1897г. и фото сделанное авторами в 2023 году (рисунок 3.9б и рисунок 3.10). Первая фотография ледника приведенная в книге «Горная Бухара» В. И. Липского (Липский, 1902) была сделана во время экспедиции учёного в 1897 году. По словам учёного в 1890 в горах под Каудалем был снежный обвал, погребший 4 пастухов, столько же собак и около 100 овец.



Рисунок 3.9 – Пик Каудаль хребта Петра 1 с ледником (1897 год) (снимок В. И. Липского) (а) и аэрофотоснимок ледника Дехдал (2023) (снимок М.С. Сафарова) (б)

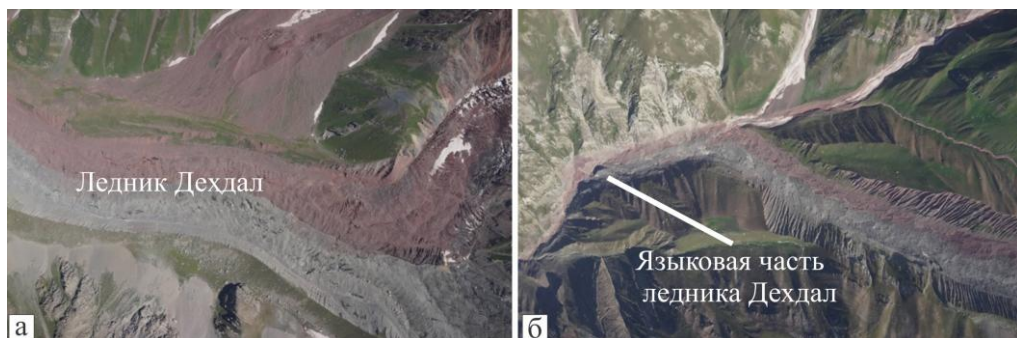


Рисунок 3.10 – Снимки ледника Дехдал сделанные с помощью БПЛА с высоты 5000 м над уровнем моря

На рисунках 3.11 и 3.12 показана река Дара (Каудаль) вытекающий из ледника и процесс полевых работ в Таджикабадском районе на хребте Петра 1.



**Рисунок 3.11 – Река Дара вытекающая из ледника.
(Фото М.С. Сафарова)**



**Рисунок 3.12 - Процесс работы на участке ледника Дехдал в Таджикибад-
ском районе. Хребет Петра Первого.
На фотографиях: Сафаров М.С., Субхонзода Х.С.**

Ледники бассейна реки Шурак. Водосбор Шураки Капали, называемый также Восточный Шурак, расположен на левом берегу реки Сурхоб в Таджикабадском районе (рисунок 3.13). В верховьях долины несколько небольших безымянных ледников каталогизированы под номерами 504, 505 и 506, с соответствующими площадями 0,3, 0,3 и 0,2 км², каждый из которых ориентирован на северо-запад, север и северо-восток (Каталог ледников СССР, 1971). Далее вниз по течению, отдельно на правой стороне, расположен самый большой ледник в этой группе, под номером 507, и ледник № 503. Установлено, что ледник № 503 содержит несвязанное ледниковое озеро в своих нижних течениях.

Исследованная территория также характерна возникновением селевых потоков, приводящих к значительным ущербам. В частности, 28 августа 2016 года отколовшаяся часть ледника, растаяв и спровоцировав сход оползня, нанесла значительный урон селу Себистон - разрушены дома, коммуникационные системы. В тот же день со склона горы села Себистон джамоата Калъаи Лаби об Таджикабадского района откололась часть ледника, которая, также стала причиной возникновения мощного оползня, перекрывшая русло реки. В результате сошедшего оползня, уровень воды в реке повысился, был разрушен мост между селами Фатхобод и Шуроб, а грязевая масса разрушила 10 жилым домов, нанеся ущерб фермерским хозяйствам и коммуникационным системам сел Фатхобод и Капали Таджикабадского района (Пирмамадов и др., 2012; Зарипов и др., 2020).

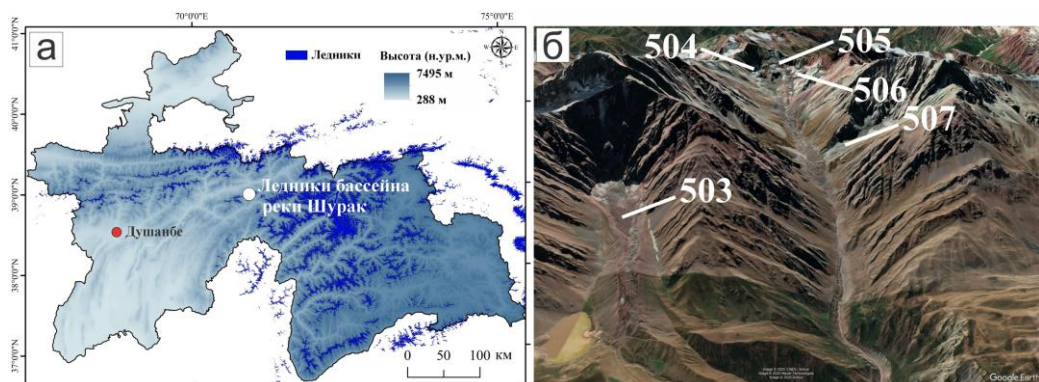


Рисунок 3.13 – Расположение ледника Дехдал на карте Таджикистана и на снимке Google Earth (а-б)

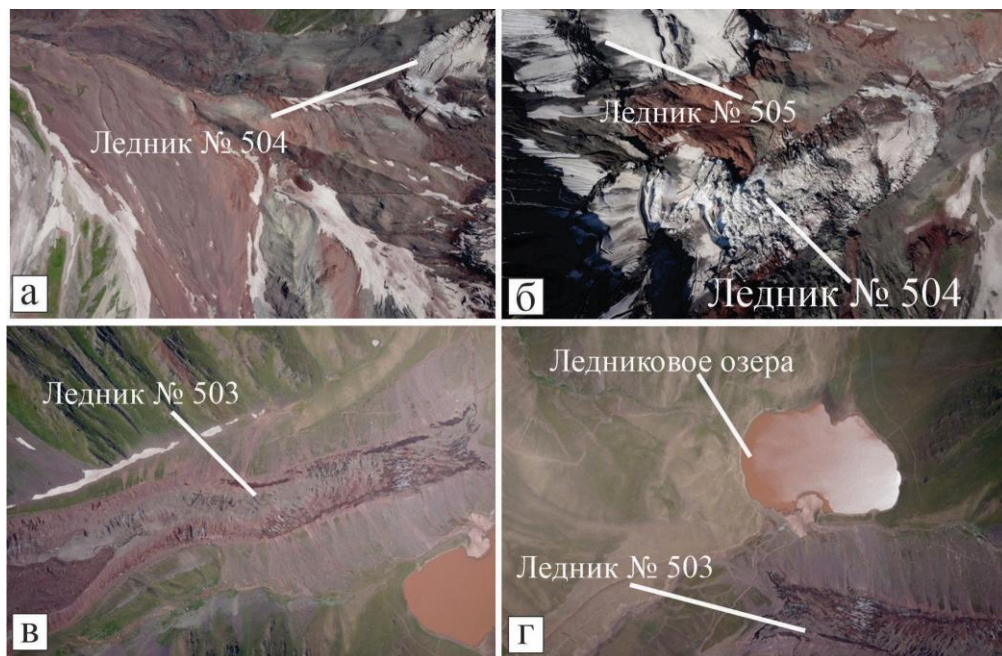


Рисунок 3.14 – Аэрофотосъемка ледников в верховьях реки Шурак с помощью БПЛА с высоты 5050 м над уровнем моря. Август 2020 (Фото М.С. Сафарова)

Ледник Саид Нафиси (39.099° с.ш., 71.386° в.д.) - пульсирующий и сложный долинный ледник, образованный слиянием двух ледников (№ 62 и 63) (Осипова и др., 1998) расположен в горном хребте Петра I, в Таджикистане (рисунок 3.15), занимает площадь $6,3 \text{ км}^2$ и находится в диапазоне высот от 3440 до 4420 м над уровнем моря (Каталог ледников СССР 1978). Область аккумуляции морфологически не выражена из-за 67% покрытия обломками (Каталог ледников СССР, 1978).

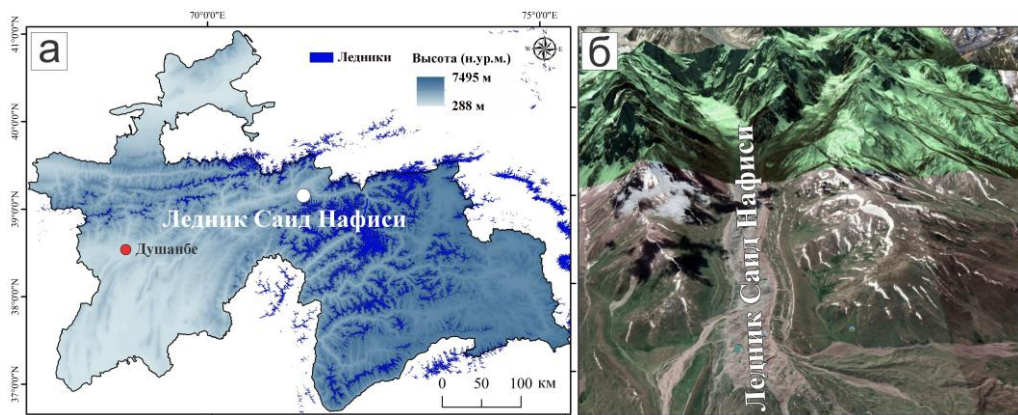


Рисунок 3.15 – Расположение ледника Саид Нафиси на карте Таджикистана (а) и на снимке Google Earth (б)

Фирновая линия совпадает с нижней границей крупных лавинно-оползневых конусов у подножия тыловых склонов ледников. Поверхность ледника волнистая, с многочисленными трещинами и озерами (Каталог ледников СССР, 1978). Пространственные фотографии ледника Саид Нафиси с помощью дрона, сделанные с высоты около 6000 м над уровнем моря (рисунок 3.16).

Тем не менее, на леднике Саид Нафиси недостатчен объем метеорологических наблюдений. В этой зоне среднегодовая температура воздуха составляет 6,3 °С, согласно данным метеорологической станции Лахш (39°17'58.53" с.ш., 71°31'32.45" в.д., высота: 2003 м над уровнем моря), при этом характер осадков сильно варьируется в зависимости от направления горных хребтов и циркуляции воздушных масс (Каталог ледников СССР, 1971; Сафаров и др., 2023). Самые высокие месячные температуры регистрируются в июле (+16 °С) и августе (+15,7 °С), а самая низкая температура наблюдается в январе (-13,4 °С).

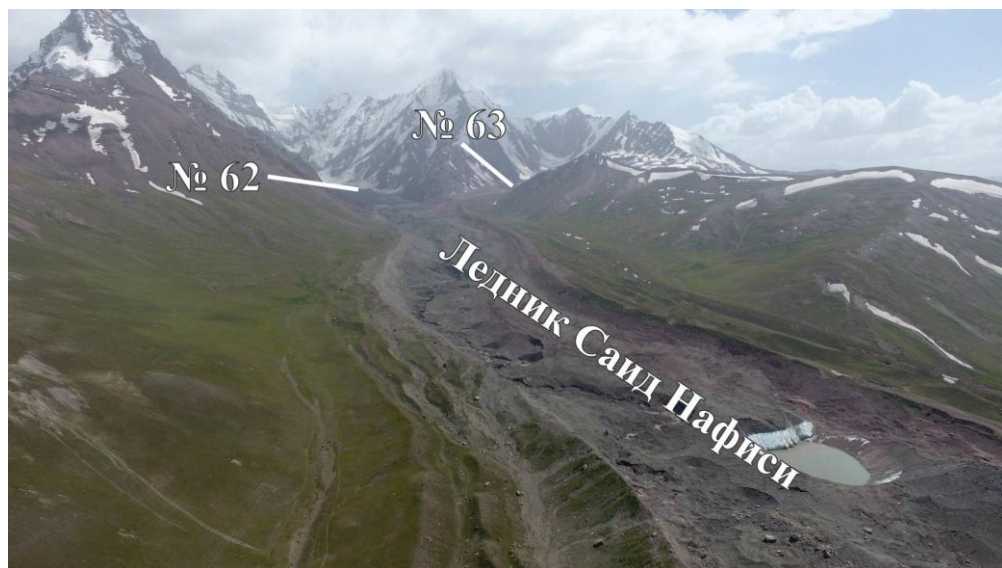


Рисунок 3.16 – Снимок ледника Саид Нафиси (Баральмос). Июль 2023

В регионе пик осадков пришелся на март (91 мм) и апрель (81 мм), а значительное количество осадков выпало в августе и сентябре (Сафаров и др., 2023). Среднегодовое количество осадков составляет около 376 мм, из которых 311 мм выпадает в период с октября по май и 65 мм с июня по сентябрь (Каталог ледников СССР, 1971). Часть талой ледниковой воды поступает в бассейн реки Сурхоб, а другая часть - в бассейн реки Обихингоу (Хингов), которая вместе образует реку Вахш (приток Амударьи).

На поверхности ледника Саид Нафиси расположены несколько надледниковых озер или прудов. При этом два озера расположенные в

нижней его части, из-за их расширения и связанных с ними рисков селей, требуют особого к себе внимания. Зона, ниже по течению характерна более частыми селями, связанные с таянием ледника и прорывами надледниковых озер, ведущие к внезапному выбросу воды, вызывая сели, влияющие на русловые и гидрологические процессы реки Арчакала (левый приток реки Сурхоб) с частичным разрушением международной автомагистрали и блокированием русла реки Сурхоб (Ёкубов и др., 2020; Сафаров и Фазылов, 2022) (рисунок 3.17 и 3.18).



Рисунок 3.17 – А - момент схода селя: 1-селевой поток, 2-русло реки Сурхоб, 3- автодорога, 4-зона перекрытия русла рек Сурхоб. Б - разрушенная автомобильная дорога после схода селевого потока в Лахшском районе. (Источник: интернет ресурсы).



Рисунок 3.18 – Селевой конус выноса левого притока р. Сурхоб и её боковые границы на космоснимке с сервиса Google Earth 2007 г. (а) и на аэрофотоснимке полученного с использованием БПЛА 2020 г (б).

На наш взгляд, внезапное опорожнение этих озер, особенно во время быстрого таяния или сильных дождей, может привести к возникновению селей (Gulley and Benn 2007; Miles и др., 2018; Sakurai и др., 2022).

Именно, такие события оказали серьезное воздействие на населенные пункты, инфраструктуру и экосистемы (Национальная стратегия снижения риска бедствий 2018; Сафаров и Фазылов, 2022).

Ледник Хирсон (Медвежий) и Мегдор (РГО). Ледники Хирсон (38,645° с.ш., 72,152° в.д.) и Мегдор (38.710° с.ш., 72.106° в.д.) являются типичными пульсирующими ледниками в верховьях бассейна реки Пяндж (суббассейн Вандж) (Осипова и др., 2015) (рисунок 19).

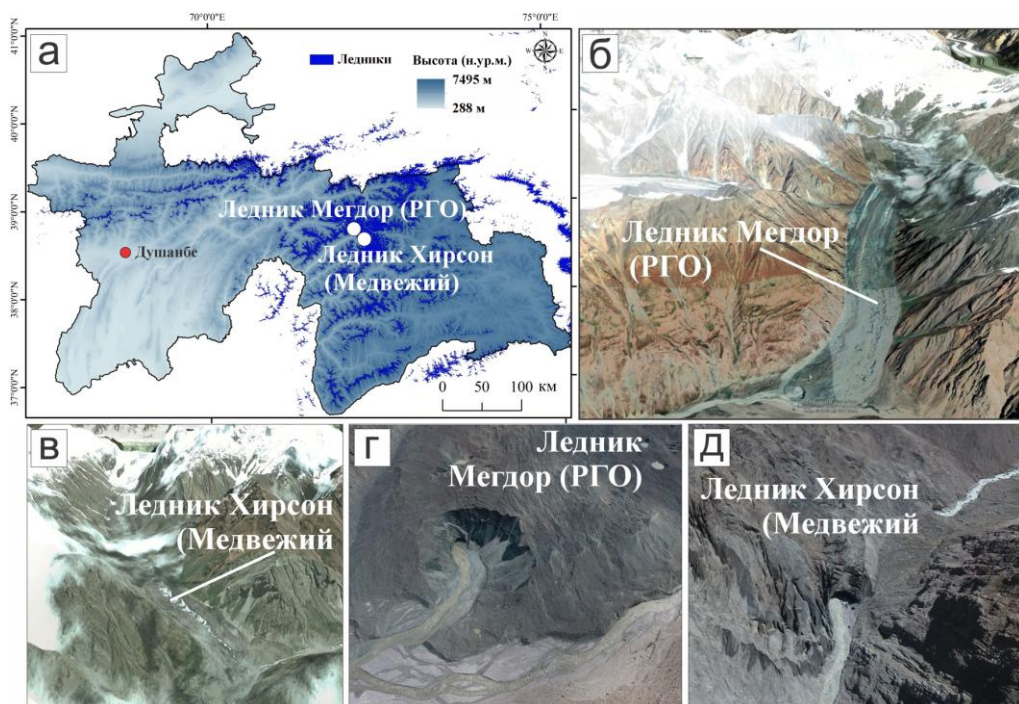


Рисунок 3.19 – Расположение ледников Мегдор и Хирсон на карте Таджикистана и на снимке Google Earth (а-в), Снимки ледника с БПЛА, Фото Сафарова М.С. (г-д)

В геологическом отношении исследуемая территория характеризуется топографическими особенностями хребта Национальной Академии наук Таджикистана, формирующими ландшафт и ледниковую морфологию, и включающий волнистый рельеф поверхности, крупные ледники, густые заснеженные вершины и высокогорные озера (Guan и др., 2023).

Ледник Хирсон, (длина - 15,8 км, площадь около 25,3 км²) расположен в верховьях реки Абдукаххор - левого притока реки Ванджоб, берущей начало на западном склоне хребта Национальной Академии Наук Таджикистана, в большом цирке, на высоте более 4500 м над уровнем моря, а конечная часть находится на высоте 3000 м.

Ледник Мегдор расположен в Центральном Памире, в верховьях Ванджобской долины на стыке Дарвазского хребта и хребта Национальной Академии Наук Таджикистана, и является крупнейшим ледником в бассейне с площадью 64,4 км² (Осипова и др., 1998).

С социально-гидрологической точки зрения исследуемая территория находится под влиянием рек, питаемых ледниками, включая реку Абдукаххор и притоки, берущие начало в ледниках, формирующие водные ресурсы для низовьев, внося существенный вклад в региональный водный баланс и играющие важную роль в динамике ледников.

В период 2003/2004 и 2005/2006 годах на Памире наблюдалось заметное увеличение количества осадков и стабильное увеличивающееся количество снега, что могло противодействовать эффектам повышения температуры воздуха, способствуя развитию наблюдаемой аномалии (Кääb и др., 2015 и Finaev и др., 2016).

При этом, установлено небольшое повышение температуры и осадков в северо-западном регионе Памира, особенно в зоне хребта Национальной Академии наук Таджикистана, являющийся ключевой областью для роста ледников. В верховьях реки Ванджоб наблюдаются особые климатические условия, регистрируемые метеостанцией Горбунова, расположенной на высоте 4300 м на леднике Ванджах. Летом температура достигает до -3°C, а зимой средняя температура опускается до -18 °C. Низкие температуры в высокогорьях вдоль хребтов Дарваз, Ванджоб, Язгулом и Национальной Академии наук Таджикистана способствуют выпадению твердых осадков (Восидов и др., 2021). При этом среднегодовое количество осадков составляет 1220 мм, с наибольшим месячным количеством осадков выпадающий в марте, хотя значительное количество осадков также наблюдалось в мае. Расчетное количество осадков в твердом виде вблизи границ питания ледников на высоте 4500 м составляет в целом до 1100 мм. (Каталог ледников СССР, 1978; Котляков и др., 2020; Погода и климат, 2024).

На рисунках 3.20-3.22 представлен процесс полевых работ в Ванджском районе, на территории ледников Мегдор и Хирсон а также аэрофотоснимки ледников с БПЛА.



Рисунок 3.20 – Процесс полевых работ на участках ледников Мегдор (РГО) и Хирсон (Медвежий) с применением БПЛА. На фотографиях: Сафаров М.С., Муродов М.Х. и сопровождающий экспедицию местный житель Ванджского района

Более ранние исследования содержат подробную информацию о пульсациях нескольких ледников в регионе Памира, включая ледник Хирсон, тем самым подтверждая, что он является одним из наиболее изученных пульсирующих ледников в регионе (Осипова и др., 1998; Осипова и др., 2015; Goerlich и др., 2020).

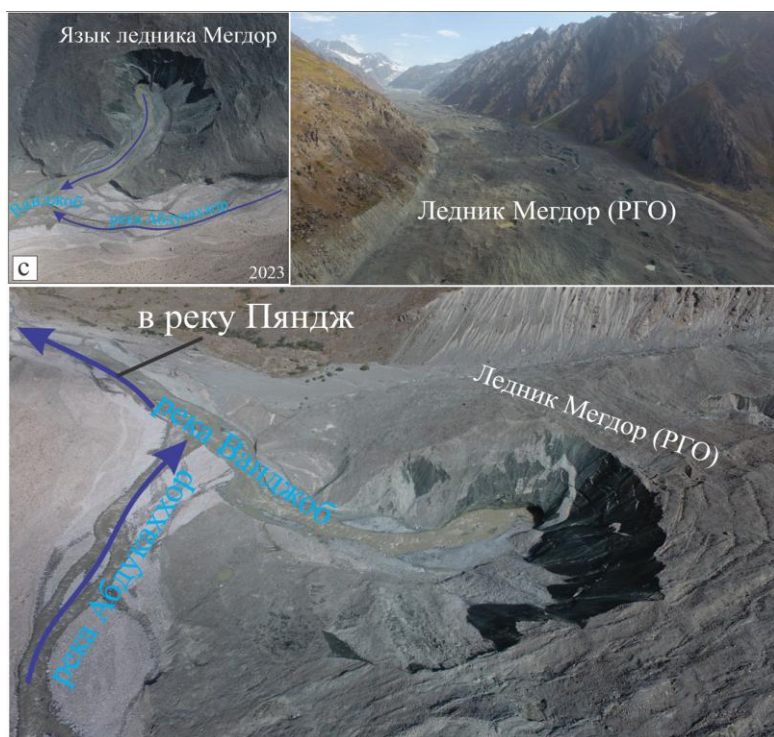


Рисунок 3.21 – Аэрофотоснимок ледника Мегдор (РГО) и реки Вандж и Абдукаххор. Фото Сафарова М.С.

На основе исторических записей установлено, что ледник Хирсон стал свидетелем пространственного перемещения с 1916 года, а быстрое продвижение было отмечено в 1951 году (Забиоров и др., 1955; Осипова и др., 2015).

В 1963 году ледник Хирсон, массивной ледяной плотиной перекрыл русло реки Абдукаххор, образовав озеро. Быстрое движение ледника с ошеломляющей скоростью 100 м/день и его продвижение на 1750 м привели к образованию гигантской ледяной плотины от концов ледника, с толщиной льда до 160 м в речной долине, что привело к образованию озера глубиной 80 м (Осипова и др., 2015).



▲ Русло реки Абдукаххор перекрыто ледником Хирсон

Рисунок 3.22 – Детальное изображение языка ледника полученное с помощью БПЛА и состояние реки Абдукаххор, с перекрытым ледником Хирсон руслом. До настоящего времени река протекает под ледником (а) и поверхность ледника (б). Фото М.С. Сафарова

Учеными-исследователями установлено, что в 1973, 1989, 2001 и 2011 годах произошли несколько подъемов ледника Хирсон, с зафиксированными заметными инцидентами, (Котляков и др., 2012; Kotlyakov и др., 2018). В том числе с 1916 года, с заметными наступлениями в 1951, 1963 годах и в последующем, ледник Хирсон на Памире испытал несколько подъемов (Осипова и др., 2015).

Ледниковые пульсации 1963 и 1973 годов привели к образованию прорыву ледниковых озер с катастрофическими последствиями ниже по течению. В фирновой области ледника за 1973–1983 годы накопление массы (на этапе восстановления ледника) составило 27,7 млн тонн в год, что меньше, чем в 1963–1973 годах (30,2 млн тонн). Кроме того, пульсации 1989, 2001 и 2011 годов были меньше по величине (Осипова и др., 2015; Котляков и др., 2018).

Относительно ледника Мегдор, следует отметить, что многими исследователями зафиксированы также следы значительного движения на леднике, задокументированные Котляковым и др. (2008) и Осиповой и др. (1998). Например, в 1960-1970-х годах наблюдались внутренние движения его компонентов, которые начинались в нижней и конечной части, хотя и постепенно снижали скорость продвижения в конце (Осипова и др., 1998). Ряд опубликованных, за последние два десятилетия, работ продемонстрировали значительную интенсификацию пульсирующих ледников и связанных с ними природных опасностей (Котляков и др., 2008; Коновалов и др., 2015; Восидов и др., 2021), что предопределяет необходимости мониторинга долгосрочных пространственно-временных изменений в эпоху изменения климата. В середине 20-го века исследуемый ледник отступил на 2,6 км, оставив покрытую обломками конечную морену в своей нижней части. Возобновление пульсации ледника было отмечено в 1965 году, с последующими продвижениями и колебаниями в его конечной части, наблюдавшиеся по крайней мере до марта 2008 года. Установлено, что ледник демонстрировал сложную динамику, включая наступления, отступления и эрозии рекой Абдукаххор, сопровождавшиеся каменной лавиной в 2001-2002 годах, повлиявшими на его баланс массы и динамику потока (Осипова и др., 2015; Котляков и др., 2008; Harrison и др., 2015).

Следует отметить, что в целом исследуемые ледники имеют историю пульсаций с заметными продвижениями и колебаниями на протяжении многих лет. Пульсирующее поведение привело к образованию ледяных плотин, затоплению ледников, динамике ледников и конечным смещениям, что в совокупности увеличило опасность ниже по течению, что может стать основанием для постоянного мониторинга и исследования.

3.2.1.1. Поведение ледников - индикатор воздействия изменения климата и топографии

Ледник Дехдал. Осуществление аэрофотосъёмок ледника Дехдал и разработка цифровой модели местности выполнены с учетом востребованности наблюдений во время интенсивной абляции, за изменениями положения и границ языков ледников, положением фронтальных морен и развитием эрозионных врезов. Как было отмечено выше (глава 3, раздел 3.2.1), Дехдал входит в число опасных пульсирующих ледников, ранее неоднократно спровоцировавший селевые потоки. Съёмки ледника с помощью БПЛА проводились нами в 2019, 2020 и 2023 гг. Данные полученные с помощью БПЛА позволили не только оценить современное состояние поверхности ледника, но также благодаря полученным высококачественным цифровым картам выявить изменение на леднике и в близлежащих территориях.

На основе полученных результатов установлено, что длина ледника в 2019г. составляло, 5.4 км (рисунок 3.23), что на 600 метров больше, чем данных приведенных в каталоге СССР (4.8 км) (Каталог ледников СССР, 1971).

На наш взгляд, это связано с пульсацией ледника в недавнем времени, что согласуется с данными некоторых авторов (Котляков и др., 2019; Котляков и др., 2020). При сравнении аэрофотоснимков 2019 и 2020 годов, на леднике Дехдал был зафиксирован обвал горной породы в верхней его части между 2019 и 2020 гг. (рисунок 3.24 в-г).

По нашему твердому убеждению, использование БПЛА позволяет расширить инновационные методы в научных исследованиях, особенно для труднодоступных территорий каковой является зона у ледника Дехдал. В дальнейшем, планируется использовать полученные материалы для изучения состояния ледников с применением детальных ортофотопланов при морфологическом анализе территории, а трёхмерные модели использовать для получения информации о поперечных размерах отдельных форм рельефа, расчета изменения высоты поверхности ледников и т.д.

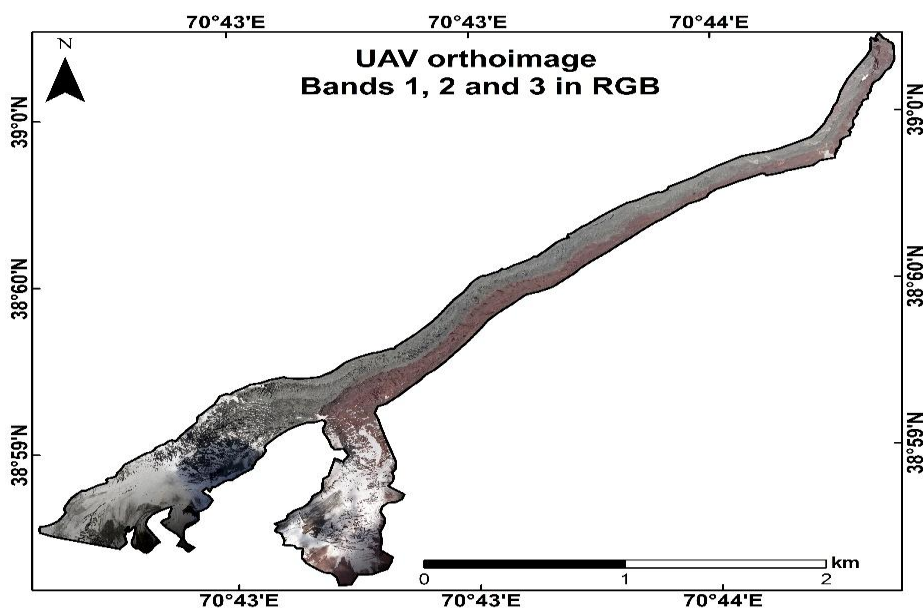


Рисунок 3.23 – Границы ледника Дехдал в 2019 году

Относительно автоматического выявления линеаментов, следует отметить, что данный процесс выполняется в два этапа: на первом определяется расположение краёв изображения - это зоны резких изменений между соседними пикселями, что указывает на возможные границы структур, а на втором осуществляется распознавание собственно линейных элементов (Adiri и др., 2017).

Оба этапа реализуются с использованием модуля LINE в программе PCI Geomatica, широко применяемого для автоматического извлечения линеаментов (Qari, 2011; Aminov и др., 2019) (Таблица 3.3). В этом модуле используются методы фильтрации и свёртки, позволяющие повысить резкость изображения и лучше выявить линейные структуры. Обнаруженные линеаменты затем извлекаются путём последовательного объединения пикселей с похожей яркостью и направлением.

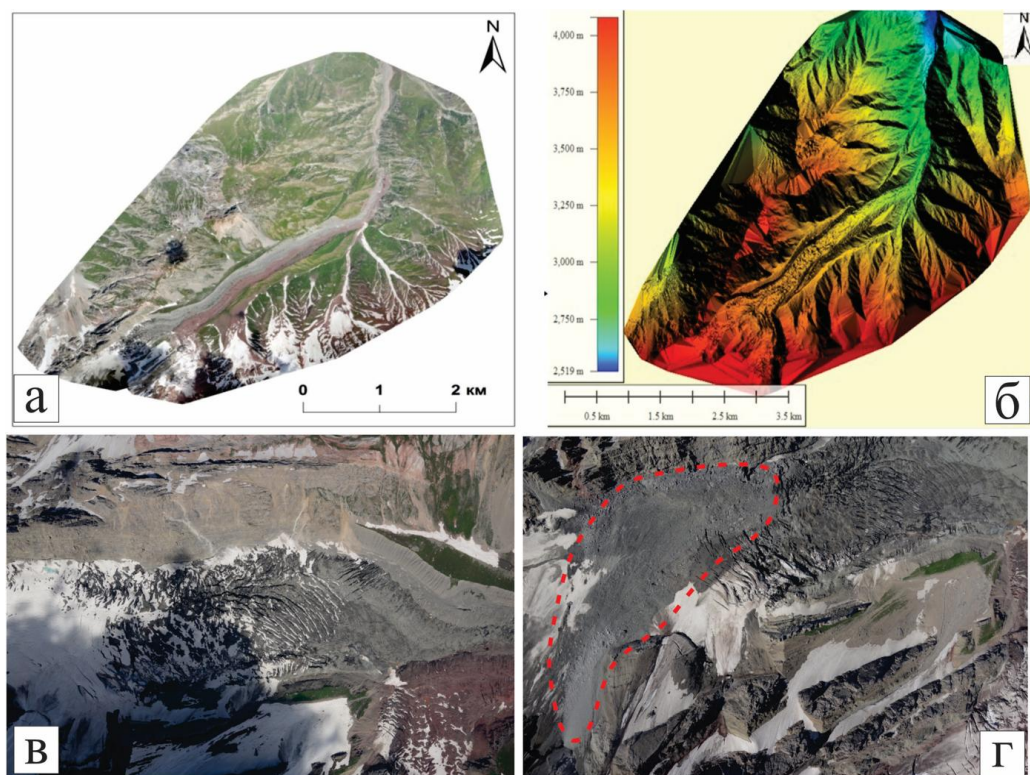


Рисунок 3.24 – Карта (ортофотомозаика) ледника Дехдал (а) и цифровая модель местности (б) полученные после обработки аэрофотоснимков БПЛА. Выявления разрушений горных пород над аккумуляционной зоной ледника Дехдал. Снимок ледника 2019 г. (в) и 2020 г. (г)

Ключевым условием успешного результата является выбор оптимальных параметров, от которых зависит точность выделения и интерпретации линеаментов.

Для выбора наиболее подходящего изображения в качестве входных данных модуля LINE были проанализированы все три спектральные полосы изображения, полученного с БПЛА, с точки зрения контрастности и выявления структурных особенностей рельефа (рисунок 3.25).

Таблица 3.3. Примененные значения параметров модуля LINE

Пороговые параметры и единицы	Значения	
	по умолчанию	предложены
1 RADI (в пикселях)	10	8
2 GTHR (в диапазонах, 0-255)	100	60
3 LTHR (в пикселях)	30	20
4 FTHR (в пикселях)	3	3
5 ATHR (в градусах)	30	15
6 DTHR (в пикселях)	20	20

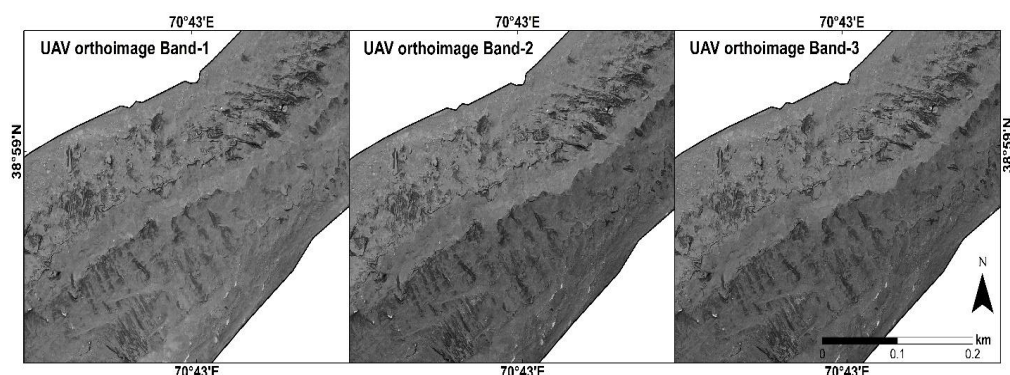


Рисунок 3.25 – Границы Полоса 1, 2 и 3 изображение БПЛА ледника Дехдал отражающие структурных и литологических особенностей.

В результате визуального анализа наиболее информативной оказалась первая полоса, обладающая высокой контрастностью и чётким отображением линейных структур. В отличие от неё, вторая и третья полосы демонстрировали как линейные элементы, так и литологические границы, что могло затруднить последующее выделение именно структурных линеаментов. По этой причине для дальнейшей обработки и автоматического извлечения линейных сегментов была выбрана именно первая спектральная полоса.

Изображение с первой полосы использовалось в качестве исходных данных для работы модуля LINE в программе PCI Geomatica, с целью построения карты линеаментов исследуемого ледника. В ходе анализа было проведено сопоставление автоматически извлечённых линеаментов с визуально интерпретированными линейными структурными элементами рельефа, достигавшаяся путём наложения выделенных линеаментов на изображение первой спектральной полосы, полученной с БПЛА.

Результаты сопоставления показали высокую степень соответствия: большинство извлечённых линеаментов располагаются в зонах, характеризующихся выраженными линейными структурными сегментами, кру-

тыми откосами и другими геоморфологическими особенностями (Рисунок 3.26а и 3.26б).

Таким образом, подтверждена высокая эффективность использования оптимизированных параметров модуля LINE для автоматического извлечения линеаментов на основе высококачественных БПЛА-снимков.

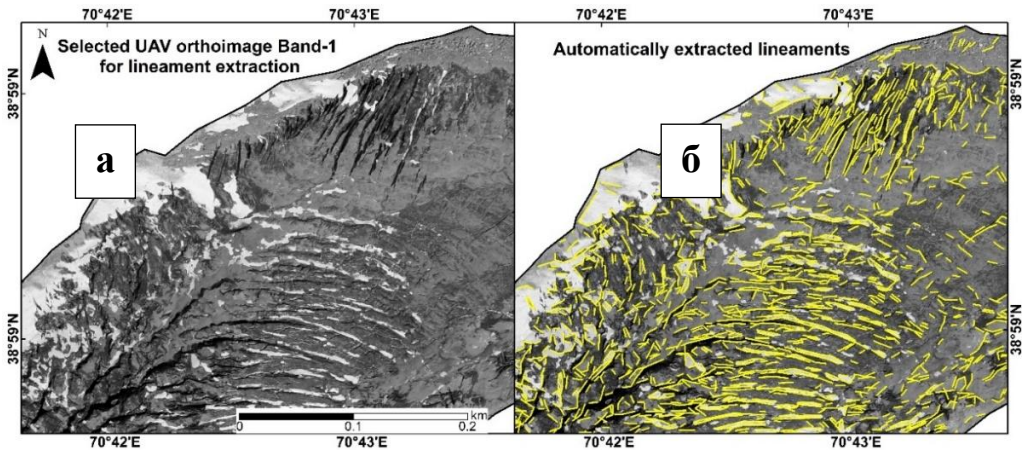


Рисунок 3.26 – а) Выбранное изображение БПЛА полоса-1 для автоматического извлечения линеаментов. б) Суперпозиция извлечённых линеаментов на изображение БПЛА полоса-1.

Карта плотности линеаментов предоставляет ценную информацию о распределении и концентрации линейных структур на единицу площади, что важно для анализа тектонических и морфодинамических процессов (Mostafa и др., 1995). В рамках данного исследования были построены карта плотности линеаментов и диаграмма роз ветров для анализа пространственной дисперсии и выявления преобладающих направлений структурных элементов (рисунок 3.27). На карте плотности высокие значения представлены оттенками красного, указывающими на участки с наибольшей концентрацией линеаментов, тогда как низкие значения отмечены зелёным цветом.

Анализ карты плотности (рисунок 3.27а) показал, что зоны с наибольшей концентрацией линеаментов локализуются преимущественно в южной части и в области терминального языка ледника, где наблюдаются интенсивные деформационные процессы. Эти участки могут указывать на повышенную тектоническую активность или внутренние напряжения в ледниковом теле. Следовательно, высокая плотность линеаментов в южной и северной частях ледника может служить индикатором повышенного уровня деформации и нестабильности этих зон.

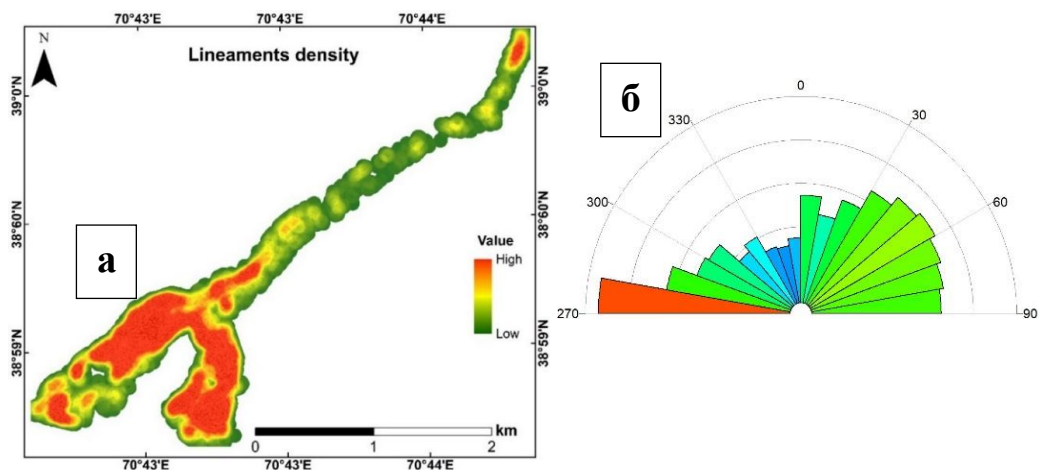


Рисунок 3.27 – Карта плотности извлечённых линеаментов (а) и диаграмма роз, показывающая ориентацию извлечённых линеаментов (б).

Дополнительно была проведена оценка ориентировки извлечённых линеаментов путём построения розы направлений, отображающей частотное распределение линий по азимутам. В результате анализа было выявлено преобладающее направление - WNW–ESE (270–280°), что указывает на наличие структурной направленности, согласующейся с региональными геодинамическими трендами (рисунок 3.27б).

Таким образом, в ходе исследования успешно достигнута основная цель - получение структурной информации и оценка морфологического состояния ледника Дехдал с использованием изображений, полученных с БПЛА, и методов цифровой обработки. Разработанный подход, основанный на методах дистанционного зондирования и линеamentного картирования, продемонстрировал свою эффективность для изучения состояния и динамики пульсирующих ледников в условиях высокогорья Таджикистана.

Ледники бассейна реки Шурак. Бассейн реки Шураки-Капали представляет собой уникальную зону активной современной гляциодинамики. Как было отмечено выше, на сравнительно не большой территории сосредоточено несколько ледников, демонстрирующие ярко выраженные процессы пульсации и стремительного наступания, в том числе откола характерные для нестабильных ледников Таджикистана (рисунок 3.28).

Установлено, что с начала 2000-х годов ледники проявляли признаки пульсации, выражающиеся в неравномерной скорости движения, деформации ледяной массы и росте напряжений в зоне питания. К 2016-2019 гг. эти напряжения достигли критических значений, что привело к резкому наступанию и обрушению ледников и их продвижения вниз по долине (рисунок 3.29), сопоставимые, по масштабам, с крупнейшими из-

вестными ледниковыми обвалами в регионе Центральной Азии. Массивные ледяные массы перемещались со скоростью, характерной для ледников-пульсаторов, подтверждая гипотезу о временном разгоне под действием гидродинамического давления талых вод в теле ледника.

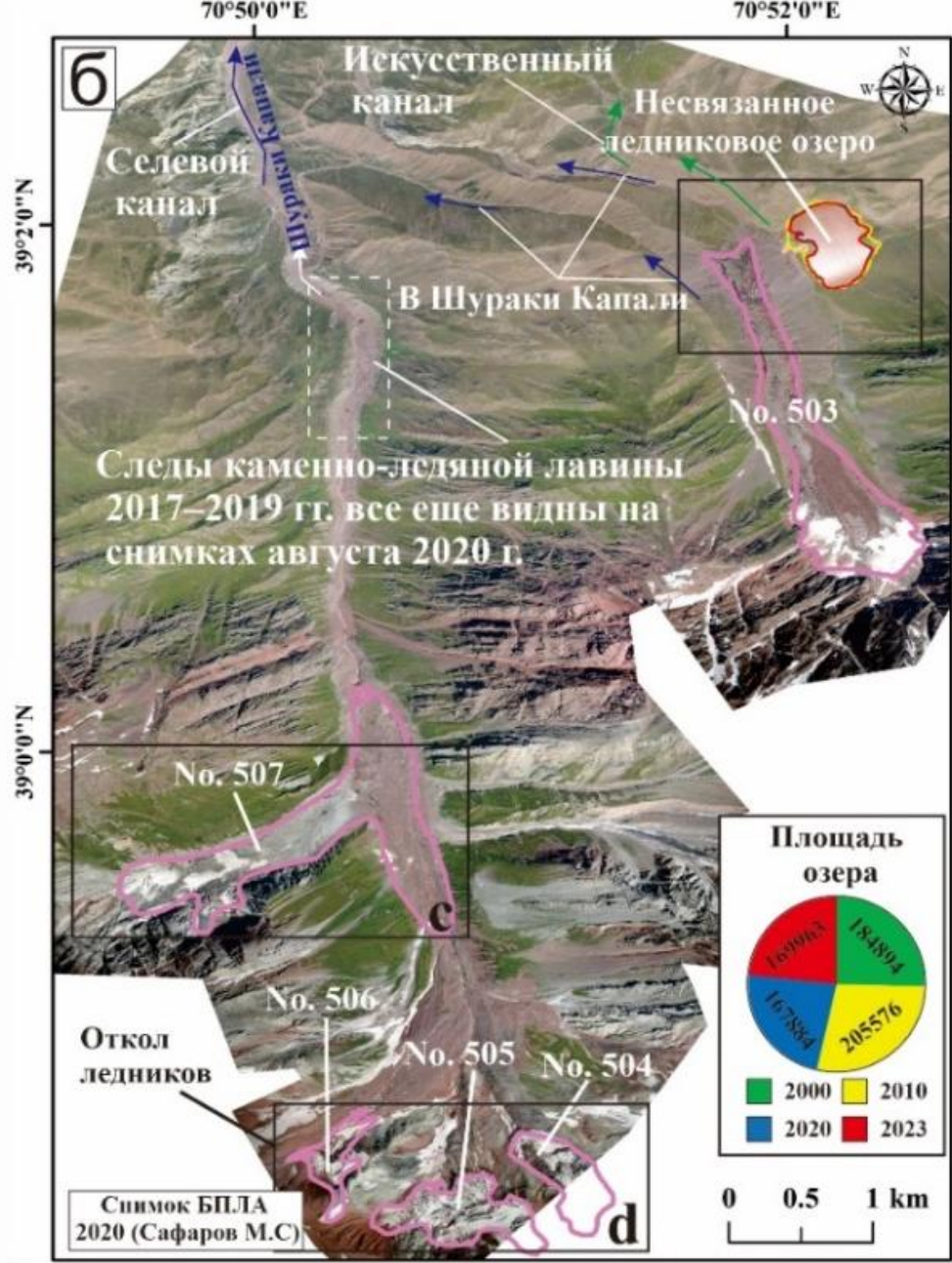


Рисунок 3.28 – Ортомозаика ледников бассейна реки Шураки и обзор каменно-ледяных лавин и изменений в озерах

Отдельного внимания заслуживает динамика ледников №504 -№506. Следует отметить, что отдельные ледники бассейна (№503, 507) проявляли признаки стабильности, тогда как ледники №504 -№506 демонстрировали активные пульсации и отколы сопровождающимся образованием многочисленных трещин и частыми обвалами ледово-каменных масс в 2017 и 2019 (рисунок 3.30). Очередной обвал произошёл 21–23 июня 2019 года (рисунок 3.30б), аналогичный по механизму события 2017 года, свидетельствующий о повторяемости подобных процессов и требующие систематического мониторинга их состояния.

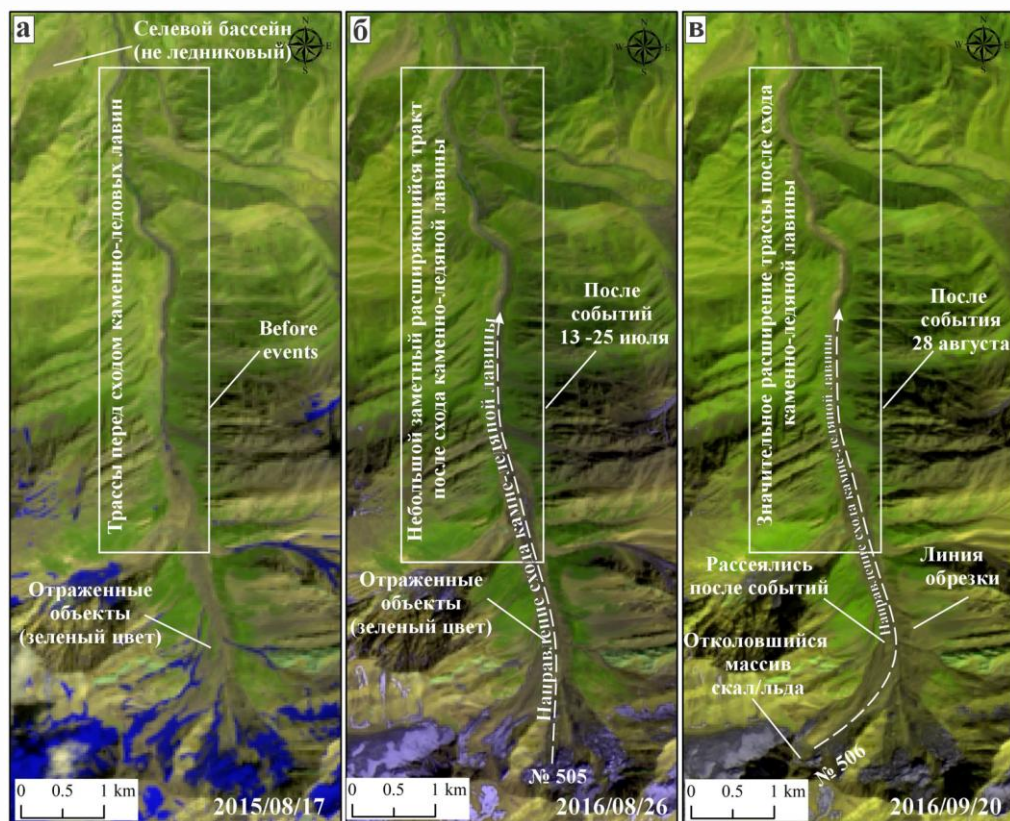


Рисунок 3.29 – Откол ледников и каменно-ледяные лавины в 2016 году и устье реки Шурак. Снимки Landsat 2015-2016 гг.

Таким образом, бассейн Шураки-Капали представляет собой активную зону пульсирующего и нестабильного оледенения, с ледниками - индикаторами климатических изменений, а также источниками потенциально катастрофических природных явлений, обладающих высоким разрушительным потенциалом. В условиях продолжающегося потепления прогнозируется усиление этих процессов, требующие особого внимания научного сообщества и природоохранных структур.

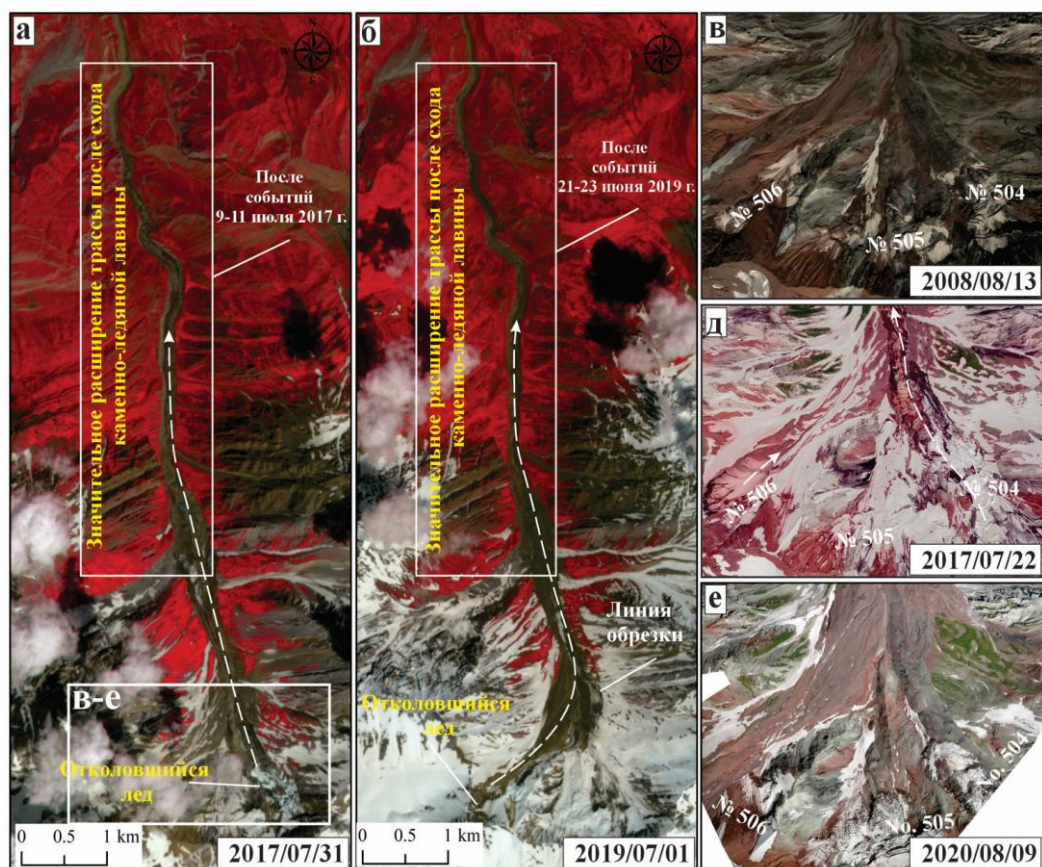
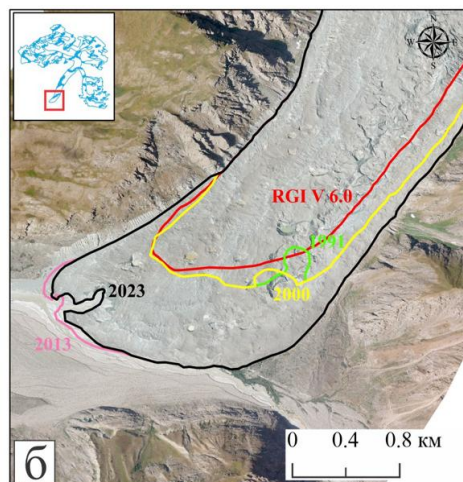
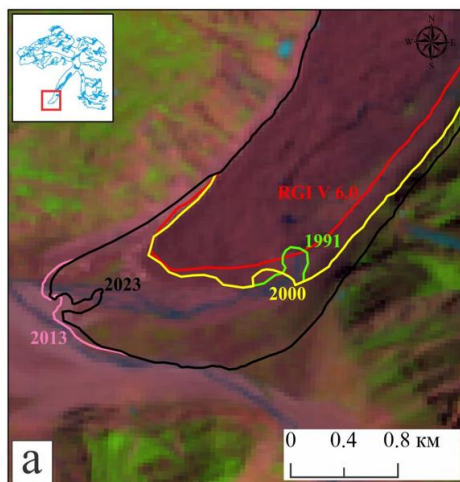


Рисунок 3.30 – Каменно-ледяная лавина в 2017 и 2019 годах. Фоновые снимки: а, б - Sentinel 2, в и д – снимки из сервиса Google Earth, е - снимок с БПЛА 2020 года

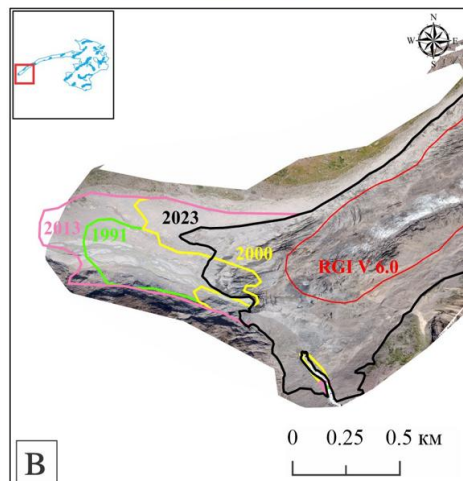
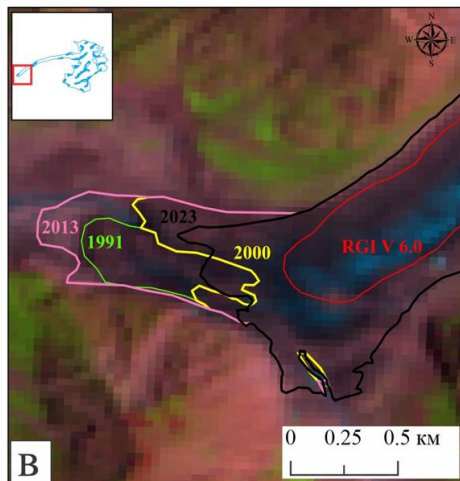
Мегдор и Хирсон. Анализ спутниковых данных и снимков с БПЛА указывает на контрастное поведение ледников за последние два десятилетия (рисунок 3.31-3.32). В то время как небольшие изменения наблюдались в период с 1991 по 2000 год для Мегдор, более выраженное событие пульсации произошло в период с 2000 по 2013 год (рисунок 3.31а и 3.31б).

Установлено, что в этот период контур ледника значительно расширился ($267,5 \pm 33$ м), а его язык опустился ниже контурной линии Мегдор, установившись на высоте 2900 метров над уровнем моря. При этом, в период с 2013 по 2023 год состояние ледника Мегдор оставалось стабильным, но с непрерывным таянием (языковой части) на высоте 2920 метров над уровнем моря.

Ледник Мегдор



Ледник Хирсон



2023 2013 2000 1991 RGI V 6

Рисунок 3.31 – Сравнение контуров ледника по данным RGI V6 (красный), Landsat (LT05 и LC08) (желтый, зеленый и розовый) и данных БПЛА (черный), показывающее пульсирующее состояние ледников. Примечание: (а–б) Снимки Landsat 1991 г. и снимки БПЛА 2023 г. контура ледника Мегдор. (в–г) Снимки Landsat 1991 г. и снимки БПЛА 2023 г. контура ледника Хирсон.

Установлено что ледник Хирсон испытал более ранний пульсирующий подъем до 1991 года, за которым последовал период таяния и изменения контура в интервале между 1991 и 2000 годами. Высотное положение языка в 1991 году составляло 2920 метров над уровнем моря, а к 2000 году он отступил на $693,60 \pm 42$ м и в последующем сместился до высоты 3000 метров над уровнем моря.

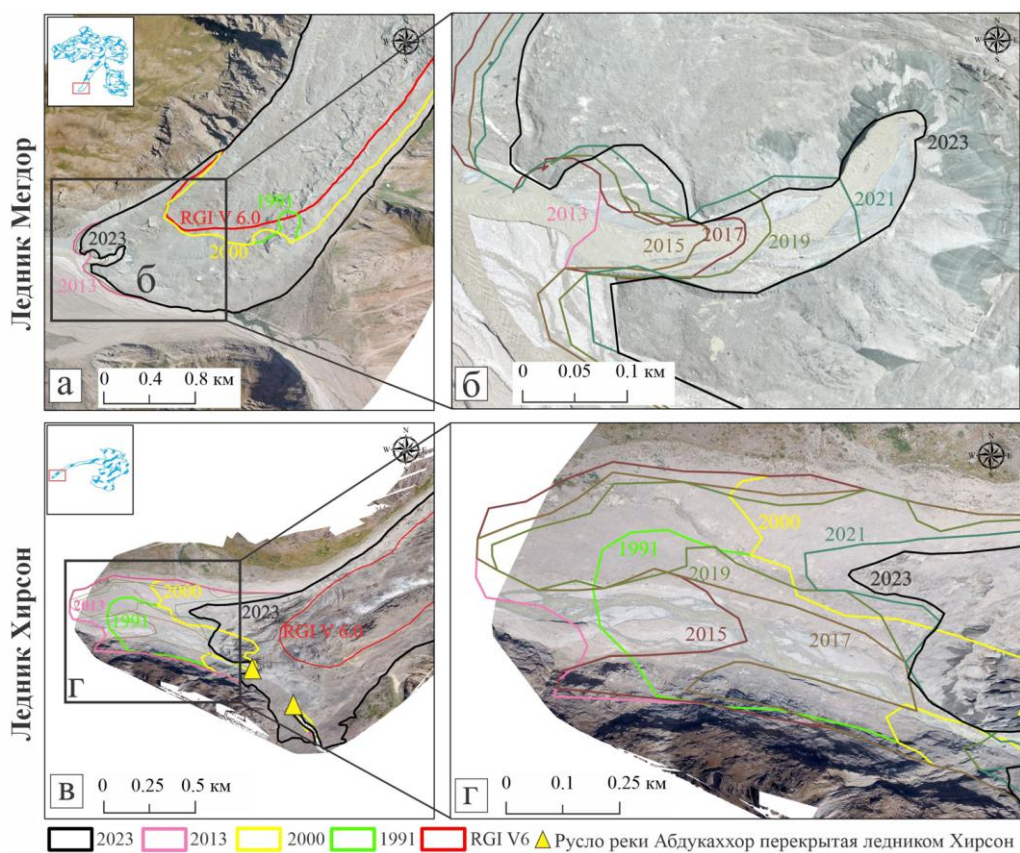


Рисунок 3.32 – Сравнение контуров ледника по данным RGI V6 (красный), Landsat (LT05 и LC08) (желтый, зеленый и розовый) и БПЛА (черный), показывающее пульсирующее состояние ледников.

Примечание: (а-б) Снимки БПЛА 2023 года контура ледника Мегдор. (в-г) Снимки БПЛА 2023 года контура ледника Хирсон.

Сравнение спутниковых снимков Landsat за 2000 и 2013 годы позволило выявить новое событие пульсации с продвижением языка на $859,00 \pm 33$ м, при этом его положение опустилось до высоты 2915 метров над уровнем моря. Установлено, что с 2013 по 2023 годы ледник Хирсон вернулся к состоянию до пульсации и начал уменьшаться на $-848,00 \pm 15$ м, при этом положение языка сместилось выше, и по результатам съемки с БПЛА в 2023 году он находится на высоте 2960 метров над уровнем моря. Примечательно, что река Абдукаххор, которая ранее была перекрыта ледником из-за пульсации, теперь в конечном итоге протекает под ледником. За период с 1991 по 2023 год ледник Мегдор показал значительный рост на $1448,3 \pm 30$ м, в то время как ледник Хирсон сократился на $-703,5 \pm 30$ м.

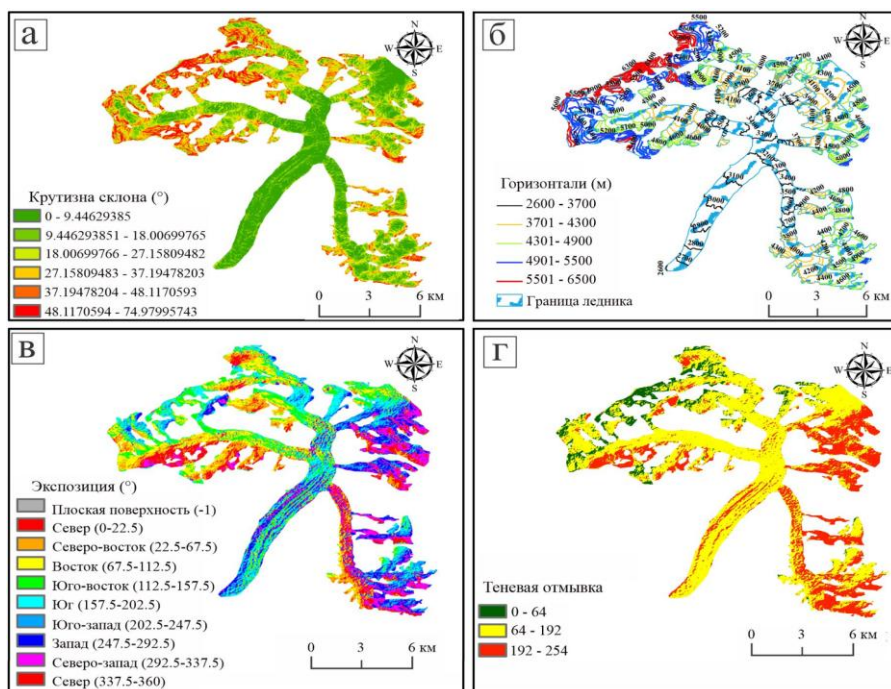
Уклон поверхности, в нашем наборе данных, составил от 0 до 74,97 градусов для ледника Мегдор и от 0 до 71,87 градусов для ледника Хирсон (рисунок 3.33а и 3.34а). Следует отметить, что в отличие от ледника Мегдор, где большие уклоны заметны в основном в верхних участках, ледник Хирсон характерен наличием крутого уклона в зоне аккумуляции, от 5,12 до 70,15 градусов. В лавинной зоне ледника Хирсон также произошло резкое изменение уклона, с быстрым ростом высоты с разницей в 500 м.

По результатам наших исследований ориентации (экспозиция) ледника Мегдор, установлено, что нижняя часть ледниковой области в основном обращена в южном, юго-западном и западном направлениях, в то время как верхняя часть, в зависимости от притоков ледника, обращена в разных направлениях (рисунок 3.33в). Выявлено, что максимальная высота (высота самой высокой точки ледника) для ледников Мегдор и Хирсон с использованием контура RGI (Randolph Glacier Inventory) и данных Alos Palsar колеблется примерно от 6557 и 5858 м н.у.м. соответственно (рисунок 3.33б и 3.34б).

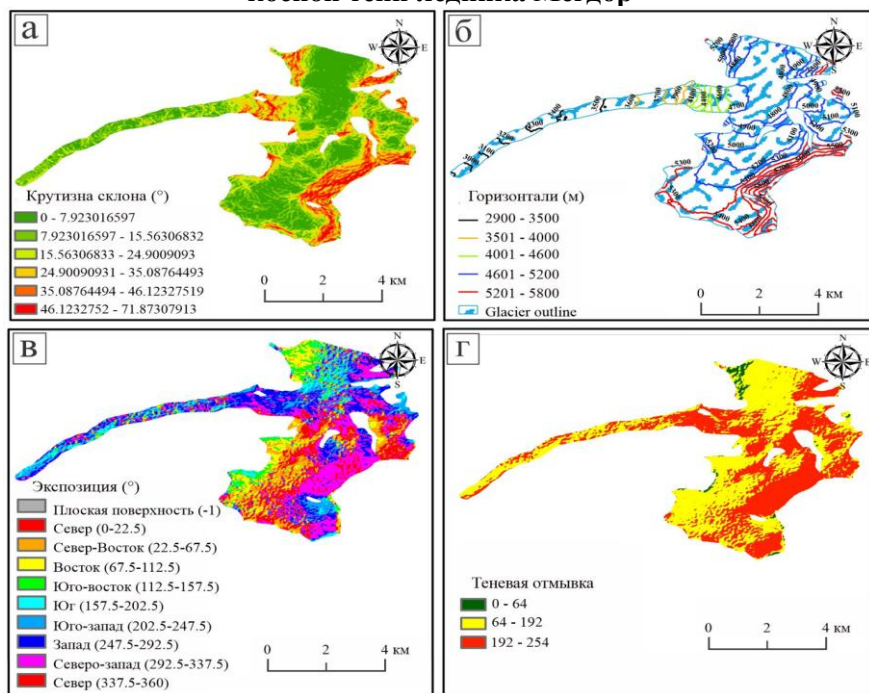
Диапазон значений для теневой отмывки, созданной в ArcGIS, обычно находится в диапазоне от 0 до 254, где 0 представляет самые темные тени, а 254 - самые яркие области. Результат отмывки обоих ледников показаны на рисунках 3.33г и 3.34г, где более *низкие* значения (0–64) - области, находящиеся в глубокой тени, где рельеф блокирует прямой солнечный свет; *средние* значения (64–192) – области с частичным затенением, где рельеф блокирует часть прямого солнечного света; более *высокие* значения (192–254) - области, которые полностью подвержены прямому солнечному свету, где рельеф не препятствует поступающему солнечному излучению.

Проведёнными исследованиями подтверждена пространственная связь между климатическими параметрами и событиями, связанными с пульсациями ледников за последние 30 лет.

С использованием алгоритмов Google Earth Engine (GEE) нами были получены пиксельные данные о температуре и осадках из базы данных ERA5, точно соответствующие расположению языковых частей ледников. Далее была проведена перекрёстная корреляция между этими климатическими данными и зарегистрированными событиями пульсаций ледников. Исследованием установлена слабая восходящая тенденция обоих климатических параметров, при этом наиболее выраженные изменения наблюдаются в последние годы (рисунки 3.35 и 3.36).



**Рисунок 3.33 – Визуальное изображение склона, экспозиции, контура и от-
косной тени ледника Мегдор**



**Рисунок 3.34 – Визуальное изображение склона, экспозиции, контура и от-
косной тени ледника Хирсон**

В случае ледника Мегдор увеличение количества осадков было отмечено в начале 2000 года, что коррелируется повторными пульсациями и активным продвижением ледника в период с 2000 по 2013 год. Более того, наблюдается тенденция к умеренному повышению температуры с 2000 года, несмотря на её временное снижение в период 2012 - 2014 годов. Однако с 2013 года наблюдается частичное отступление ледника, особенно в его языковой части, вероятно, вследствие повышения температуры, в то время как количество осадков также демонстрирует восходящую тенденцию (рисунок 3.35).

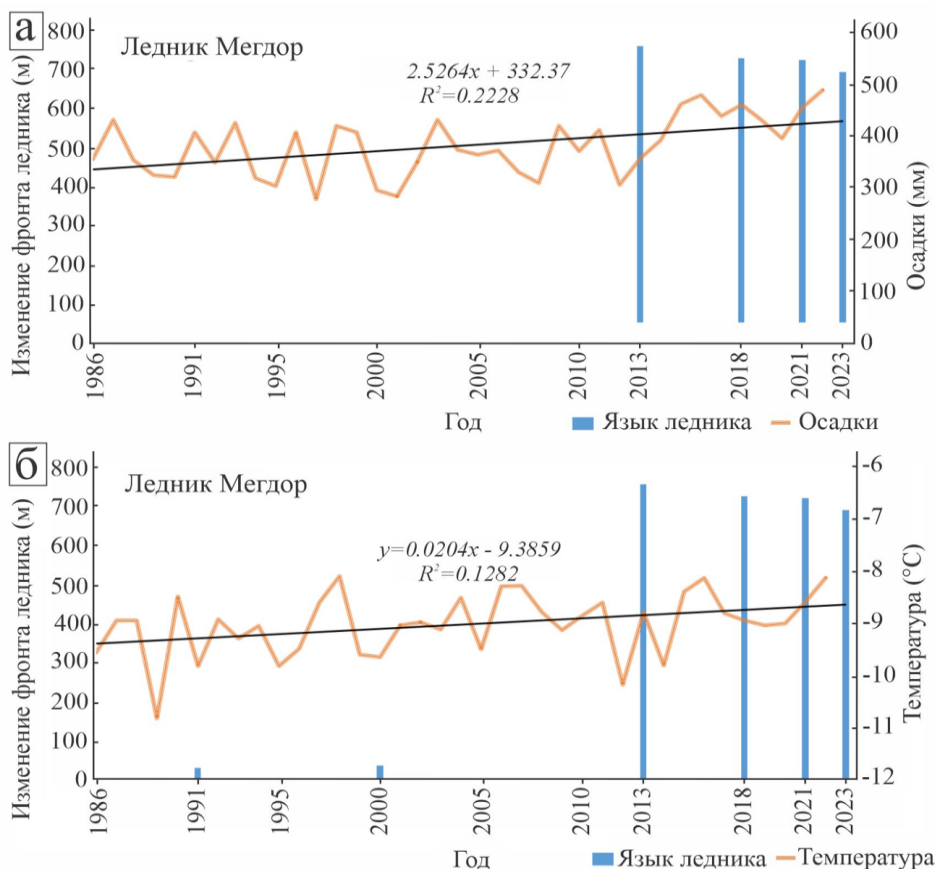


Рисунок 3.35 – Пространственная связь между климатическими переменными и изменением фронта ледника Мегдор с 1986 по 2023 год. (а) Годовые осадки и (б) температура на леднике. Примечание: положение языка ледника в 1986 году принято за точку отсчета (ноль), а изменения в его положении по сравнению с этой базовой линией оцениваются для последующих лет.

Более того, для ледника Хирсон неравномерное распределение осадков наблюдается до 2013 года, что создает существенную проблему для определения влияния осадков на продвижение ледника с 2000 - 2013 годах. Однако после 2013 года наблюдалось значительное увеличение ко-

личества осадков, что еще больше спровоцировало процесс продвижения ледника, вплоть до 2015 года.

Выявленный температурный тренд указывает на небольшое снижение в период с 2010 по 2013 год, однако он постепенно увеличивался в 2015–2016 годах а также после 2021 года, приведшее к значительному сокращению ледникового покрова и свидетельствующее о начале процесса отступления ледника (рисунок 3.36).

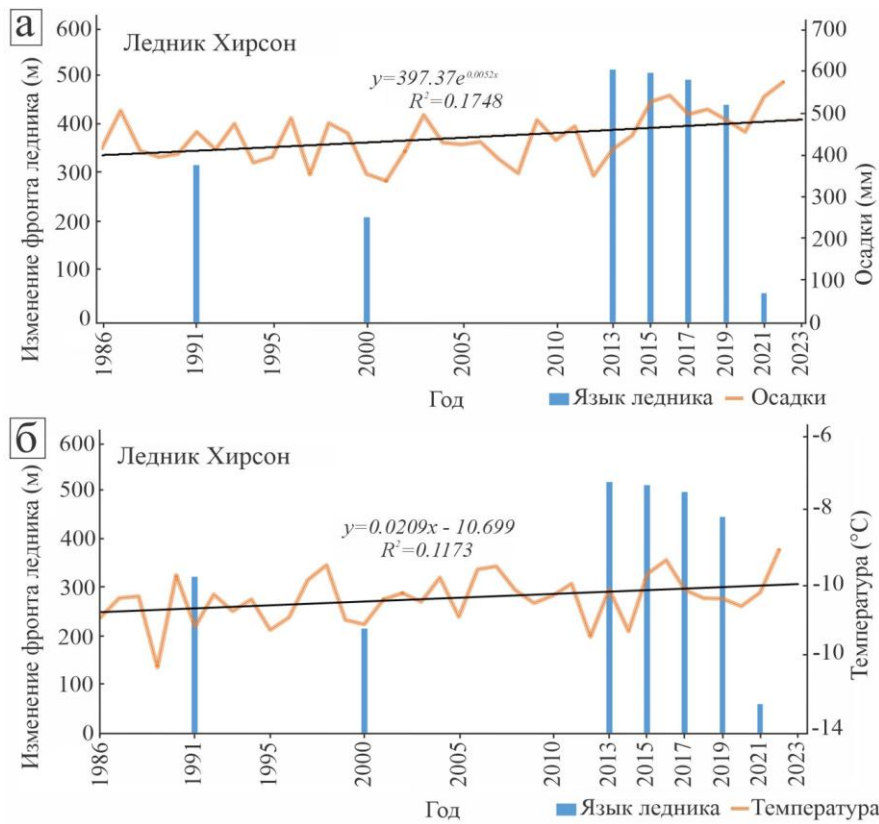


Рисунок 3.36 – Пространственная связь между климатическими переменными и изменением фронта ледника Хирсон с 1986 по 2023 год. (а) Годовые осадки и (б) температура на леднике. Примечание: положение языка ледника в 1986 году принято за точку отсчета (ноль), а изменения в его положении по сравнению с этой базовой линией оцениваются для последующих лет

Таким образом, исследование ритма или периодичности пульсирующих событий на двух ледниках выявило сложное взаимодействие факторов, влияющих на их динамику. Волны на леднике Мегдор демонстрируют отчетливую периодичность по сравнению с волнами на леднике Хирсон, что указывает на наличие уникальных управляющих триггеров или механизмов.

Сравнительно, большая зона аккумуляции на леднике Хирсон и отсутствие значительных отрогов на высоте 4700-5600 метров, где твердые отложения превышают 4 метра (Каталог ледников СССР, 1978) и обеспечивают благоприятные условия для аккумуляции массы (Evans и др., 2006). Это явление критически включает в себя достаточное накопление массы в течение каждых 10-12 лет, тем самым часто совершая волны и вызывая значительное разрушение окружающей среды (Долгушин и др., 1982; Долгушин и др., 1989). Несколько пульсаций ледника Хирсон в 1916, 1951, 1963, 1989, 2001, 2011 и ледника Мегдор в 1960-1970-х годах с последующими продвижениями и колебаниями в его конечном положении наблюдались по крайней мере до марта 2008 года (Kotlyakov и др., 1997; Котляков и др., 2008; 18).

Goerlich и др., (2020). В то время как небольшие изменения наблюдались между 1991 и 2000 годами для ледника Мегдор, более выраженное пульсирующее событие произошло между 2000 и 2013 годами, когда контур ледника расширился на значительные $1267,5 \pm 33$ м и опустился на отметку 2900 метров над уровнем моря. Эти изменения согласуются с предыдущими исследованиями, которые задокументировали схожие расширения контуров ледников и падения высоты языка во время событий пульсации, подкрепляя понимание ледниковых пульсаций в разных регионах (Mayer и др., 2011; Mukherjee и др., 2017; Steiner и др., 2018). В отличие от этого, дифференциальная скорость пульсации ледника наблюдалась в леднике Мегдор, что можно объяснить относительно более отдельной зоной аккумуляции и наклоном поверхности с меньшим количеством ледниковых отрогов (Осипова и др., 1998; Котляков и др., 2008). В период с 2013 по 2023 год ледник Мегдор оставался стабильным, однако, наблюдалась непрерывная ситуация таяния с языка ледника. Ледник Хирсон в период с 1991 по 2000 год отступил на $-693,60 \pm 42$ м, а с 2000 по 2013 год выявил новое пульсирующее событие с продвижением на $859,00 \pm 33$ м. Этот пульсирующий процесс привел к ожидаемому воздействию, поскольку река Абдукаххор, ранее была перекрыта из-за пульсирующего ледника Хирсон (Осипова и др., 2015; Truffer и др., 2021). С 2013 по 2023 год ледник Хирсон вернулся в свое прежнее состояние и начал уменьшаться на $-848,00 \pm 15$ м.

Результаты наших исследований с использованием современных записей БПЛА о течении реки Абдукаххор, подтвердили вышеприведенные тезисы и выводы.

Реализованные наблюдения подтверждают факт обширной истории пульсаций обоих ледников, характерные заметными продвижениями и конечными сдвигами. Динамика этих ледников не только способствует образованию ледяных плотин и прорывоопасных озер, но и усугубляет риски опасностей ниже по течению.

3.2.1.2. Динамика озер потенциально опасных ледников Таджикистана

На поверхности ледников Мегдор и Хирсон было обнаружено значительное количество надледниковых прудов и озер различных размеров (рисунок 3.37 и 3.38).

Анализ снимков Landsat с 1991 по 2023 год позволил выявить значительное уменьшение площади озер на леднике Мегдор, которая увеличилась с $20\,360 \pm 33 \text{ м}^2$ до $12\,879 \pm 33 \text{ м}^2$. При этом установлено, что за этот период времени не было обнаружено никаких изменений в количестве озер, присутствующих на леднике. Вместе с тем, на основе анализа снимков Landsat установлено, что на поверхности ледника Хирсон в 1991 и 2023 годах не было обнаружено ни одного озера.

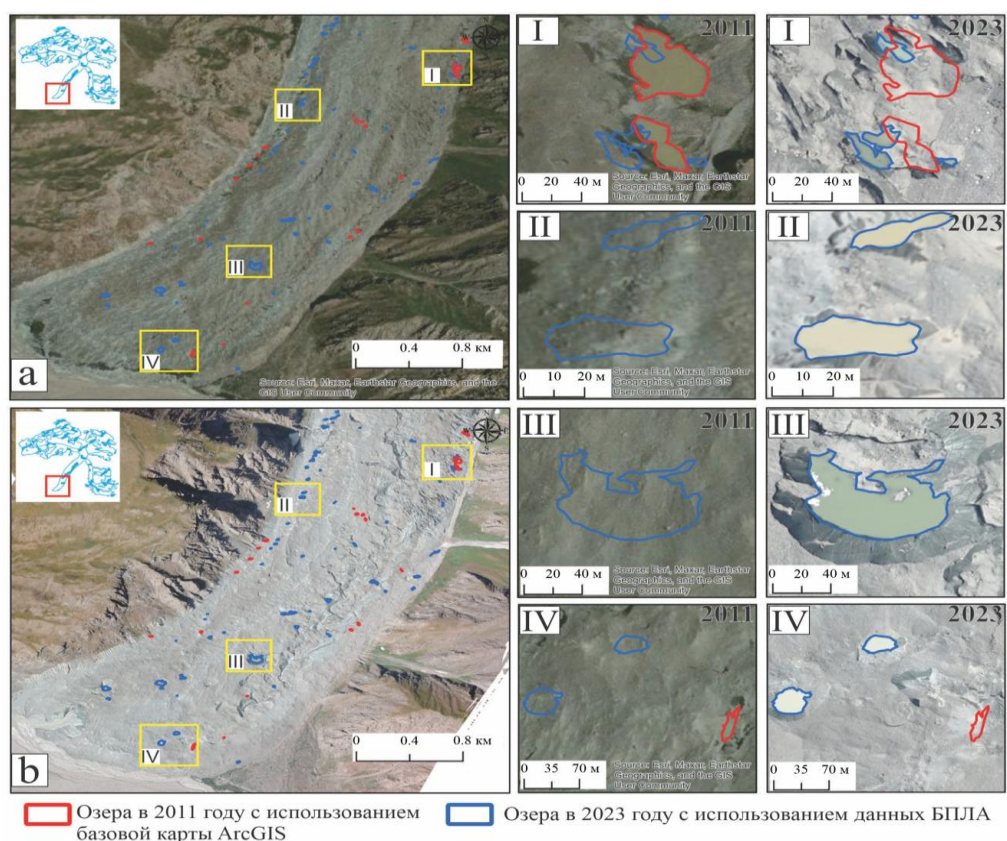
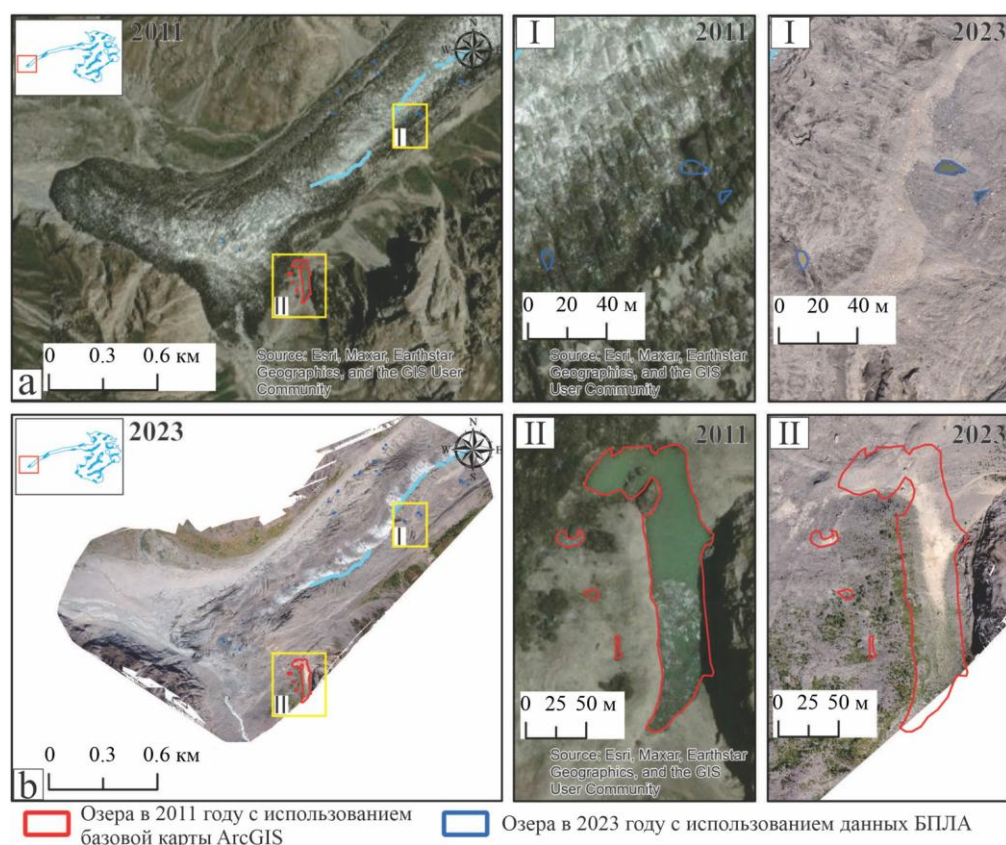


Рисунок 3.37 – Озера на нижнем течении ледника Мегдор в период с 2011 по 2023 гг. (а) Озера на базовом картографическом изображении ArcGIS 2011 г., (б) Озера на снимках с БПЛА, полученных в 2023 г. I–IV обозначает увеличенную часть над-ледниковых озер

Следует отметить, что в период с 2011 и 2013 годы было обнаружено одно крупное озеро, площадь которого за рассматриваемый период

уменьшилась на $-5705,9 \pm 33 \text{ м}^2$. Из-за ограничений разрешения снимков Landsat (30м, 15м) и небольшого размера большинства прудов и озер поверхность прудов оказалась плохо просматриваемой. Нами для сравнения со снимками с БПЛА мы для этого региона использовали самые качественные снимки с базовой карты ArcGIS 2011 года.

В 2011 году на поверхности ледника Мегдор были выявлены в основном небольшие пруды и озера. Аэрофотоснимки, полученные нами в 2023 году, позволили констатировать увеличение, как количества, так и размера этих водоемов. В 2011 году в нижней части ледника были расположены 19 озер размером от 11 до $1474 \pm 0,6 \text{ м}^2$, тогда как в 2023 году количество озер в той же области увеличилось до 75, с размерами от 6 до $3345 \pm 0,6 \text{ м}^2$ (рисунок 3.39).



В 2011 году на поверхности ледника Мегдор были выявлены в основном небольшие пруды и озера. Аэрофотоснимки, полученные нами в 2023 году, позволили констатировать увеличение, как количества, так и размера этих водоемов. В 2011 году в нижней части ледника были расположены 19 озер размером от 11 до $1474 \pm 0,6 \text{ м}^2$, тогда как в 2023 году количество озер в той же области увеличилось до 75, с размерами от 6 до $3345 \pm 0,6 \text{ м}^2$ (рисунок 3.39).

2023 году, позволили констатировать увеличение как количества, так и размера этих водоемов. В 2011 году в нижней части ледника были расположены 19 озер размером от 11 до $1474 \pm 0,6 \text{ м}^2$, тогда как в 2023 году количество озер в той же области увеличилось до 75, с размерами от 6 до $3345 \pm 0,6 \text{ м}^2$ (рисунок 3.39).

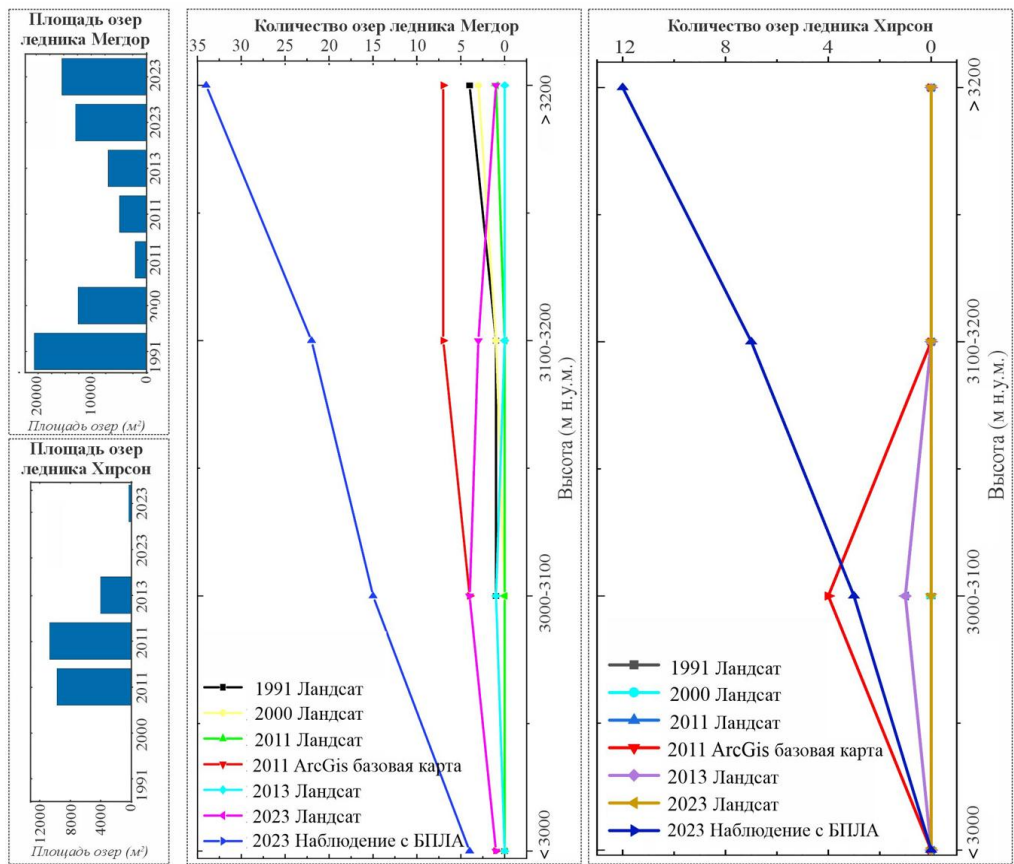


Рисунок 3.39 – Площадь и количество озер на нижнем течении ледников Мегдор и Хирсон

Таким образом, на основе сравнения карты ArcGIS 2011 года и данных БПЛА высокого разрешения 2023 года установлено значительное увеличение количества (с 19 до 75) и площади (с $4889,7 \pm 0,6 \text{ м}^2$ до $15345,5 \pm 0,6 \text{ м}^2$) ледниковых озёр и надледниковых водоёмов на леднике Мегдор. Также было зафиксировано наличие многочисленных термокарстовых озёр, окружённых воронкообразными ледяными образованиями, а также развитие надледниковых водоёмов в трещинах, образовавшихся на поверхности ледника.

Установлено, что в отличие от ледника Мегдор, ледник Хирсон характерен относительно меньшим количеством надледниковых водоемов и озер (рисунок 3.39). Вместе с тем следует отметить, что в 2011 году на левой стороне ледника было обнаружено большое озеро площадью $10406 \pm 0,6 \text{ м}^2$, но уже в 2023 году из-за его прорыва, согласно данным съемки с помощью БПЛА, оно не наблюдалось.

Таким образом, в 2011 году после пульсации ледник Хирсон продемонстрировал стабилизированное состояние с несколькими идентифицированными прудами и озерами. В целом, количество озёр на леднике Хирсон увеличилось с 4 до 22, однако их суммарная площадь уменьшилась с $10\,715,2 \pm 0,6 \text{ м}^2$ до $365,6 \pm 0,6 \text{ м}^2$. Проведённое нами обследование также выявило наличие заметной надледниковой реки, чётко различимой на изображениях с БПЛА (рисунок 3.38b).

Ледник Саид Нафиси. На основе анализа полевых данных ледника Саид Нафиси установлено значительное изменение на его поверхности в том числе развитие ледниковых озер, ообенно в его языковой части. Осуществленный анализ с использованием снимков Landsat позволил выявить значительное расширение озер по сравнению с 2002 годом. Но вместе с тем было установлено неизменность шести озер общей площадью 20500 м^2 разграниченные в 2002 году (рисунок 3.40).

Однако следует отметить, что во время нашей текущей оценки с использованием БПЛА в 2023 году, было зарегистрировано в общей сложности семь озер вместе с несколькими небольшими водоемами, которые затем были оперативно исследованы. Изменения площади ледников и озер по снимкам Landsat после ручной коррекции за период с 2002 по 2022 гг. показаны на рисунке 3.40ё. Значительные изменения площади озер наблюдались в период с 2002 по 2022 гг. При этом установлено, что площадь увеличилась с 20500 до $62800 \pm 21 \text{ м}^2$, с небольшим изменением в языковой части ледника.

Для выявления детальных изменений в нижней части ледника и озерах, способствующие возникновения, в результате прорыва озер селевых потоков, осуществлена обработка данных полученные с помощью БПЛА в период с 2020 по 2022 гг., позволившая подготовить ортофотоплан исследуемой территории (рисунки 3.41-3.42).

На различных участках ледника зафиксировались постоянно расширяющиеся водосборные зоны, способствующие ускоренному таянию ледника. На рисунке 3.41I представлена конечная часть языка ледника с рядом небольших надледниковых озёр, морфология которых не претерпела значительных изменений за двухлетний период наблюдений.

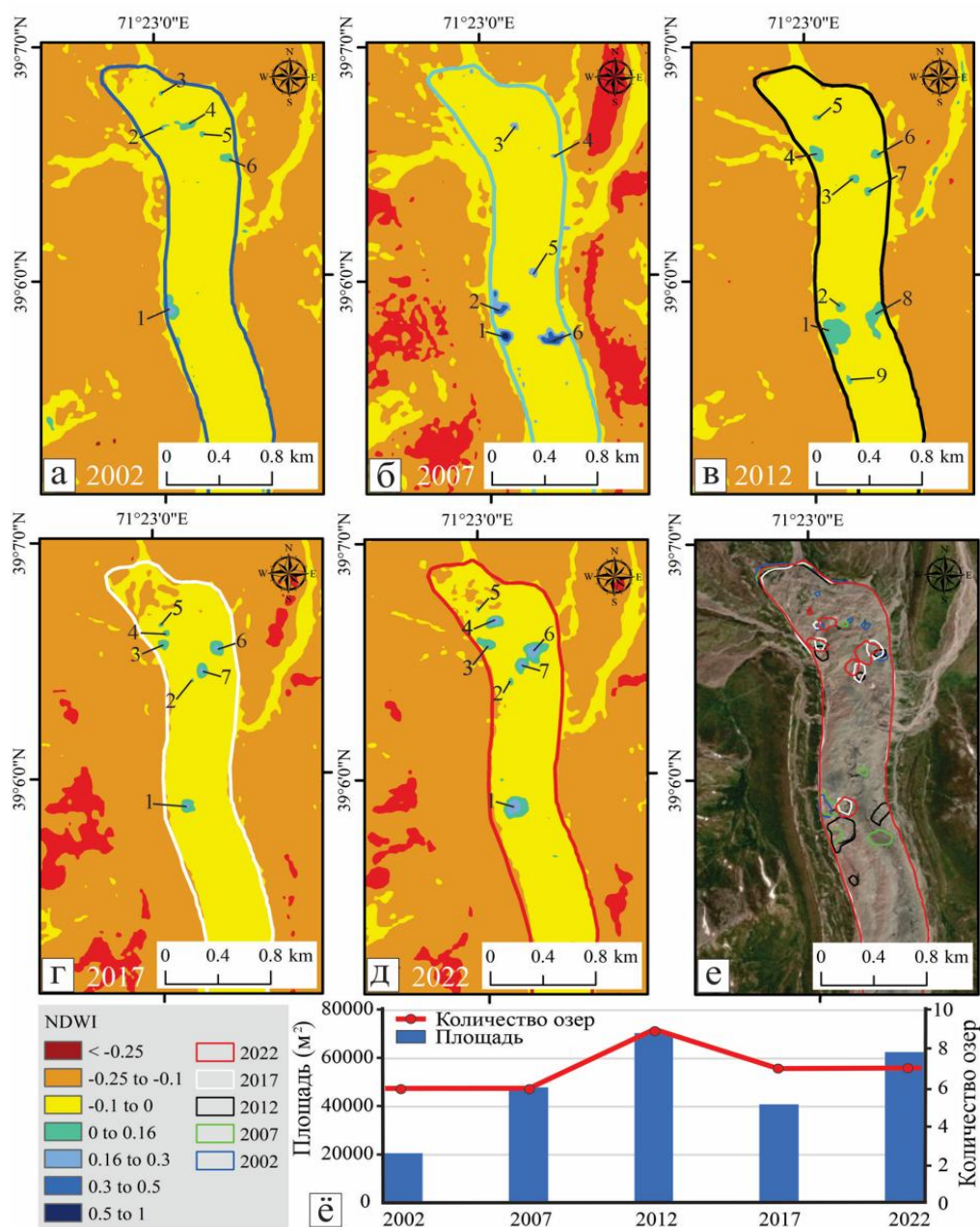


Рисунок 3.40 – Распределение и изменения озер ледника Саид Нафиси с использованием метода, нормализованного разностного водного индекса (NDWI) с 2002 по 2022 год. Цифры (от 1 до 9) подчеркивают пространственное расширение озер в разные годы. (Источник: фоновое изображение рисунка 3.40е было получено от ERSI, Maxar)

Однако изменение геометрии зафиксированы на двух озерах - на озере № 4 (в 2020 году максимальная длина составила 170 м, максимальная ширина - 38 м, площадь - 3100 м^2 , а в 2022 году максимальная длина сократилась на 132 м, максимальная ширина увеличилось до 92 м, а площадь достигла 7130 м^2). Особого внимания заслуживают озера №6 и №7 (рисунок 3.41III), площадь которых сократилась на $6470,2 \pm 0,4 \text{ м}^2$ и $9900,0 \pm 0,4 \text{ м}^2$ соответственно. По нашему мнению, именно эти значительные сокращения могли спровоцировать три случая схода селей в 2020 и 2022 годах.

Аэронаблюдениями установлено, что за двухлетний период (2020-2022 гг.) площадь этих двух озер уменьшилась на 31,9% и 66,5% соответственно, что подтверждает тезис о том, что существует прямая связь с предыдущими селями, вызванными прорывами озер, в период обследований. Кроме того, были выявлены несколько небольших водоемов, обнаруженные в 2020 году, отсутствующие на снимках 2022 года. На рисунке 3.41 (правый столбец) представлена цифровая модель рельефа нижней части языка ледника по состоянию на 2022 год.

Таким образом, различная реакция ледников на явления пульсации подчеркивают важность включения надледниковых особенностей в научное понимание ледниковой динамики (Bhambri и др., 2017; Miles и др., 2020; Bazai и др., 2021). Временное и пространственное разрешение снимков Landsat ограничивает возможность надёжной идентификации мелких водоёмов, многие из которых остаются слабо различимыми (Verpoorter и др., 2012). Так, например, на ледниках Мегдор и Хирсон наряду со съёмкой БПЛА 2023 года, базовой карты ArcGIS 2011 года, использовавшиеся для детального изучения состояния озер в 2011 и 2023 годах, позволяют выявить существенное увеличение количества (с 19 до 75) и площади (с $4889,7 \pm 0,6 \text{ м}^2$ до $15345,5 \pm 0,6 \text{ м}^2$) на леднике Мегдор, а для ледника Хирсон количество озер увеличилось с 4 до 22, но площадь озер сократилась с $10715,2 \pm 0,6 \text{ м}^2$ до $365,6 \pm 0,6 \text{ м}^2$.

Самое большое озеро, с площадью 10406 м^2 , было выявлено в 2011 году, в юго-восточной части ледника, которое не было выявлено в 2023 году. То есть видимо был прорыв данного озера. Аналогично, Осипова и др., (2015) и Harrison и др., (2015) зафиксировали быстрое движение ледника Хирсон и образование озера в 1963 и 1973 годах, а несколько других исследований также описали значительные быстрые движения ледника и повышенный риск наводнений (Richardson и др., 2000; Кааб и др., 2005; Bazai и др., 2021).

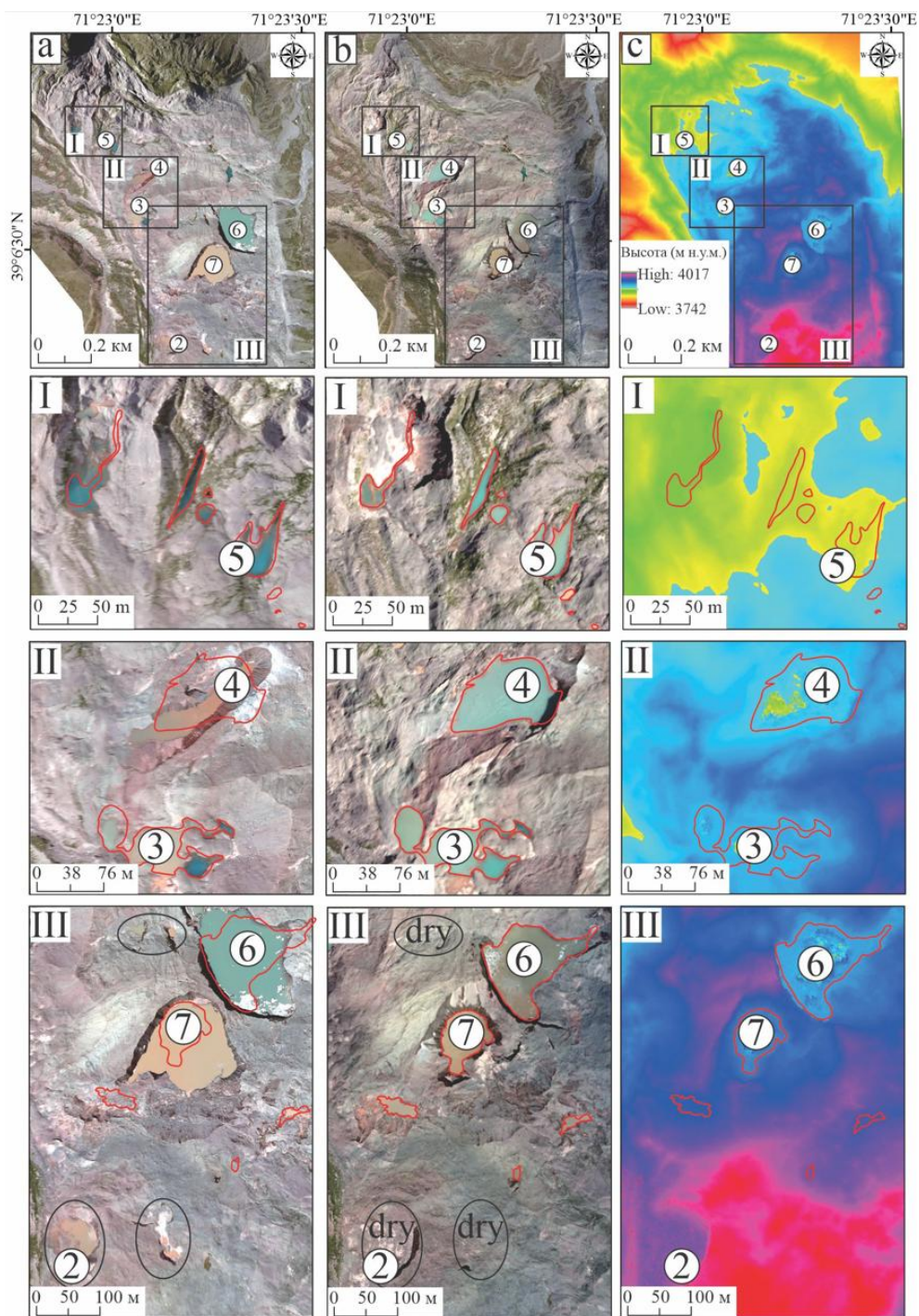


Рисунок 3.41 – Ортофотопланы нижнего ледника. (а) Расположение озер в 2020 году. (б) Расположение озер в 2022 году. (с) ЦМР 2022 года. I–III показывают увеличенную часть изменений озер

Более того, результаты наших исследований на северо-западе Памира показали, что ледник Саид Нафиси также претерпел значительные изменения за период с 2002 по 2022 год, связанное, скорее всего с развитием надледниковых озер и прудов.

Выводы, сделанные нами по результатам исследований, в части образования и расширения озер под воздействием изменения климата согласуются с результатами ранних исследований других ученых (Paul и др., 2004; Fujita и Nuimura, 2011). В частности, площадь, покрытая этими озерами, значительно увеличилась от 20500 до 62800 ± 21 м²., что также согласуются с более ранними результатами исследований, задокументированные процесс расширения площадей озер в высокогорных регионах в последние годы (Zheng и др., 2021; Viani и др., 2022). Процесс развития исследованных озер можно объяснить усилением таяния поверхности ледника, вызванного повышением температуры воздуха, приводящее к накоплению талой воды в углублениях и трещинах на леднике (Dykes и др., 2011; Westoby и др., 2020; Strickland и др., 2023).

Расширение надледниковых озер часто связано с тенденциями потепления, но вместе с тем следует отметить, что они также могут испытывать отступление в соответствии с рельефом поверхности или региональными структурами коренных пород, что способствует сбросу воды из озера. Размер и поведение надледниковых озер и прудов формируются не только под воздействием повышения температуры, но также и под влиянием динамики таяния ледника и уникального рельефа поверхности. Более быстрое отступление ледника может привести к образованию новых впадин, изначально способствуют росту озер. Поэтому непрерывный мониторинг надледниковых озер и прудов необходим для понимания их поведения и последствий в более широком масштабе. Это имеет решающее значение для оценки потенциальных опасностей, связанных с этими озерами, поскольку их размер и наличие могут сильно влиять на стабильность ледника и гидрологическую динамику (Benn и др., 2012; Rounce и др., 2017).

3.2.1.3. Мониторинг изменения высоты и поверхностных скоростей течения ледников

Доказательства значительной потери льда, в том числе, обрушения льда, были выявлены на прибрежной стене между озерами в период с 2020 по 2022 годы. Предварительный анализ показывает, что наряду с уменьшением площади озер № 6 и № 7 с 2020 по 2022 год, наблюдалась значительная потеря льда на прибрежной стене между этими озерами с максимальной высотой снижения $13,1 \pm 0,5$ м и появлением нового отрыва льда после 2022 года (рисунок 3.42).

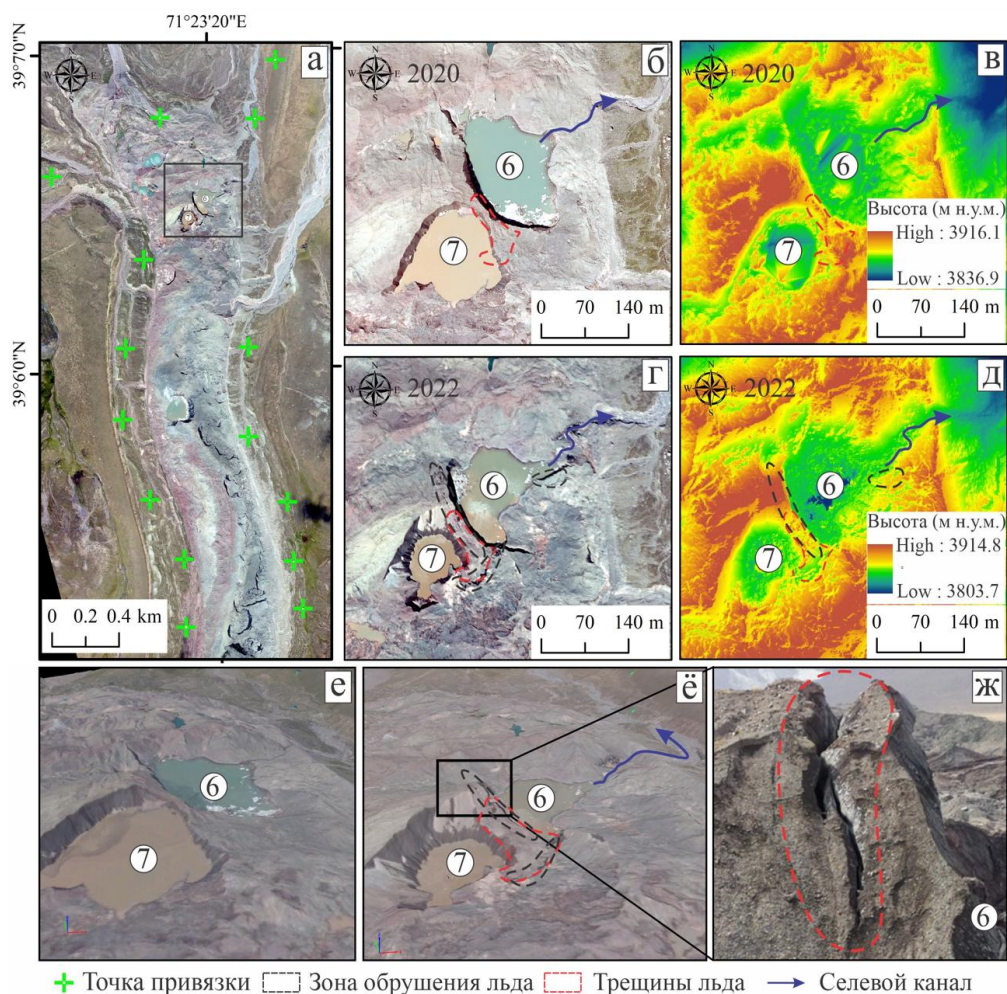


Рисунок 3.42 – Ортофотоснимки и ЦМР озер № 6 и № 7; (а) Расположение озер № 6 и № 7 на леднике Саид Нафиси; (б, в) Ортофотоснимки и ЦМР озер в 2020 году; (г, д) Ортофотоснимки и ЦМР озер в 2022 году (е, ё) 3D-модель распределения озер в 2020 и 2022 годах; (ж) Аэрофотоснимок отрыва льда между озерами

Характер изменений высоты на леднике Саид Нафиси был крайне неоднородным, указывающий на значительную изменчивость величины и распределения изменений по всему леднику (рисунок 3.43). На наш взгляд, разнообразные процессы, наблюдаемые на поверхности ледника, являются результатом различных экологических и топографических влияний. В период с 2020 по 2022 годы средняя высота поверхности изменилась на $-2,7 \pm 0,5$ м, при этом максимальное увеличение высоты наблюдалось ниже по течению и вдоль боковых сторон ледника ($5,8 \pm 0,5$ м), при этом, установлено, что уменьшение высоты произошло вблизи озер и

трещин на поверхности ледника ($-16,3 \pm 0,5$ м) (рисунок 3.43). Такое значительное отрицательное значение высоты было связано с тем, что в районах вблизи водоемов таяние ледника происходит быстрее, и значительная скорость поверхности ледника была замечена вдоль этих озер, где уклон, рельеф и наличие водоемов, а тепловое состояние также играют важную роль и влияет на скорость движения ледника.

В процессе исследований, скорость движения ледника определялась с использованием снимков Landsat 8 и 9, а анализ проводился с использованием инструмента Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation (COSI-Corr), интегрированное в программное обеспечение ENVI, точно регистрирующий и коррелирующий данные дистанционного зондирования. Следует отметить, что данный метод, разработанный Leprince и др., (2007) и более подробно описанный Scherler и др., (2008), использует высокоразвитую программу сопоставления на основе Фурье, обеспечивающая субпиксельную точность и широко используется для измерения движений ледников (Das and Sharma 2021; Rana и др., 2023). Применив улучшенную методологию Rana и др., (2023), мы использовали панхроматический диапазон снимков Landsat 8 и 9 OLI с разрешением 15 метров для расчета смещений в направлении восток-запад и север-юг, а также изображение отношения сигнал-шум. Для повышения точности карты корреляции смещения были установлены пороговое значение маски частоты 0,9 и итерация надежности 2 для снижения влияния шума. Затем были применены меры постобработки для устранения плохо коррелированных пикселей с отношением сигнал/шум менее 0,9. После удаления всех не корректных точек данных, окончательные значения смещения были рассчитаны с использованием формулы геометрии евклидова расстояния.

$$D = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Где D - общее смещение, x - смещение с востока на запад, а y - смещение с севера на юг.

Временной интервал (t-дней) между получением двух изображений использовался для определения скорости движения льда (V) в мд^{-1} , которая затем была скорректирована для представления скоростей на ежегодной основе для 365-дневных периодов (мд^{-1}).

$$V = \left(\frac{D}{t}\right) 365$$

Эта адаптированная формула (Rana и др., 2023), служит фундаментальным методом в гляциологии для оценки скорости движения поверхностного льда.

Таким образом, потеря льда произошла на прибрежной стене между озерами, указывающая на крупный обвал ледника в период между двумя проведенными исследованиями (рисунок 3.42 б-г).

Полученные ортофотопланы и ЦМР нижней части ледника с БПЛА позволили нам обнаружить ледниковые озера и понять топографию поверхности ледника. При этом, на поверхности ледника было обнаружено множество трещин, которые могут вызвать таяние ледника и далее стать зоной сбора талой ледниковой воды и образование озер. При этом, оконечность ледника расположена выше окружающей местности, что указывает на значительные геоморфологические последствия для местного ландшафта и гидрологических систем и может привести к увеличению стока талой воды в нижние по течению районы, значительно изменит гидрологию реки и потенциально усилит риски наводнений. В процессе значительной потери льда, надледниковые озера или пруды превращаются в источник риска внезапного выброса воды, потенциально вызывая прорыв ледниковых озер.

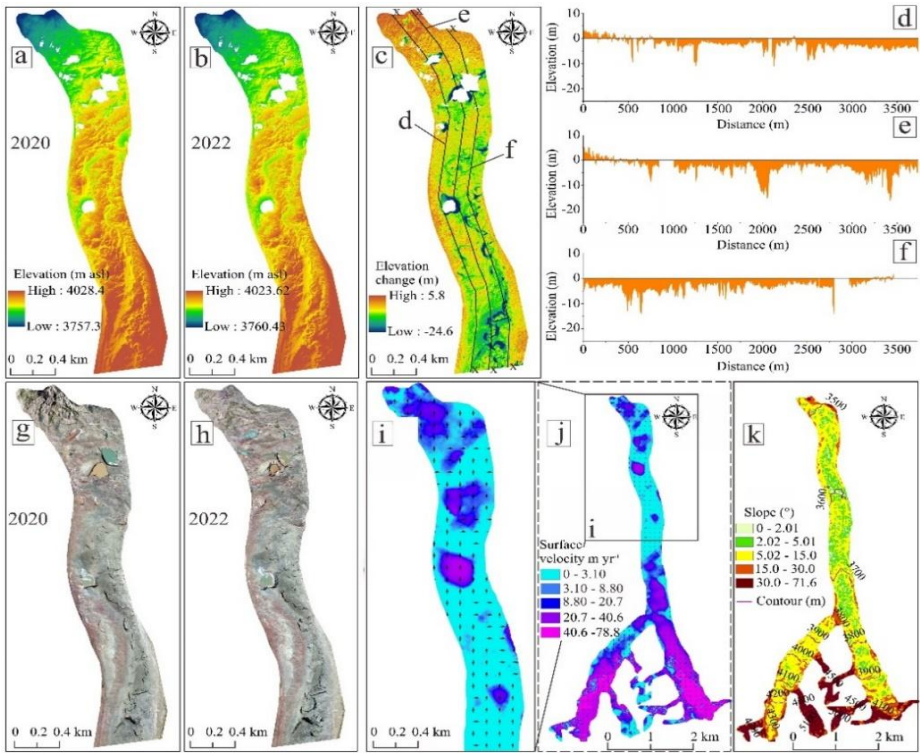


Рисунок 3.43 – Пространственно-временные изменения ледника Саид Нафиси. (а, б) ЦМР обследованной БПЛА территории в 2020 и 2022 гг., (с и d-f) Изменение высоты, обследованной БПЛА территории в период с августа 2020 г. по август 2022 г. и профили высот, (g, h) Ортофотоплан для 2020 и 2022 гг., (i, j) Скорость движения поверхности ледника в период 2020-2022 гг., (k) Уклон и контур высоты ледника

Следует отметить, что используя общедоступные данные и известный геодезический подход, была оценена динамика изменений высоты поверхности ледника Мегдор с 2000 по 2019 гг. (рисунок 3.44). Результаты показывают одновременное изменение поверхности в центральной части и увеличение высоты в языковой части между 2000-2009.

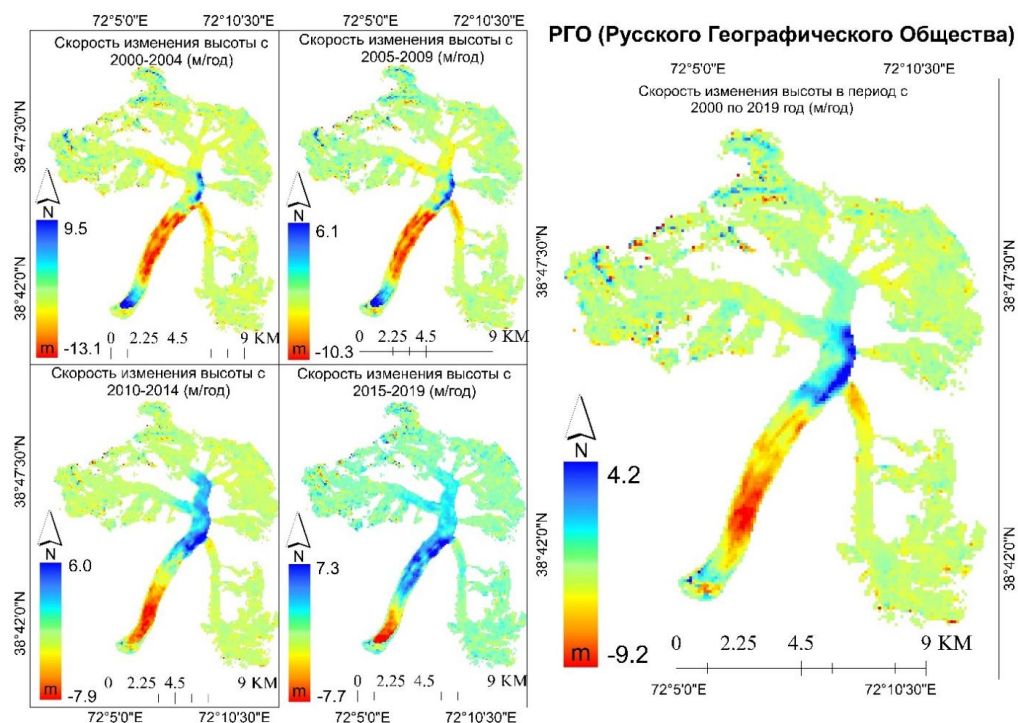


Рисунок 3.44 – Изменение высоты поверхности ледника Мегдор (РГО) с 2000 по 2019 гг. (м/год^{-1}). Изменения высоты ледника в течение 2000-2019 гг. Холодные цвета указывают на положительный баланс массы, тогда как теплые цвета указывают на отрицательные значения высоты

Исследования процесса изменения поверхности ледника Мегдор, в период с 2000 и 2019 годы позволили установить, что средняя часть исследуемого ледника сократилась на 9,2 м (в год), тогда как языковая часть имела максимальный рост на 2,4 м.

Полученные данные подтверждают быстрое таяние изучаемого ледника, с ускоренным его перемещением от своей верхней части к нижней, приводящий к постепенной потере массы в области абляции.

Относительно ледника Хирсон следует отметить, что он также испытал заметные изменения высоты поверхности в период исследования, но в последние годы он постепенно теряет массу в зоне абляции (рисунок 3.45), подтверждающий тезис об его уязвимости к продолжающимся изменениям окружающей среды.

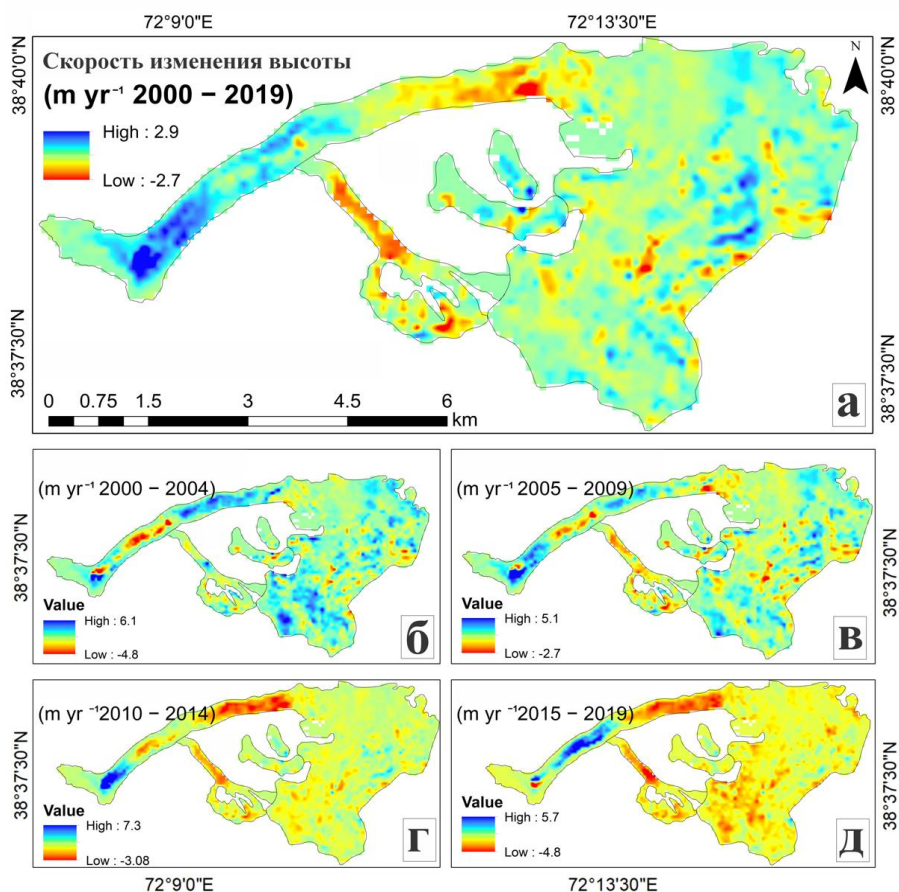


Рисунок 3.45 – Изменения высоты поверхности ледника Хирсон с 2000 по 2019 год (м/год⁻¹) (Murodov и др., 2024) (а) Общее изменение высоты по всему леднику за исследуемый период. (б–е) Увеличенные изображения определенных временных интервалов: 2000–2004, 2005–2009, 2010–2014 и 2015–2019 соответственно. Теплые цвета указывают на отрицательный баланс массы (опускание поверхности), тогда как холодные цвета представляют положительный баланс массы (прирост поверхности), подчеркивая пространственные и временные изменения толщины ледника.

Глава 4. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ, СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКОВ И ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР

4.1. Последствия прорывов озер, пульсации ледников и каменно-ледяных лавин

Исследованиями выявлено увеличение частоты прорывов озер, указывающие влияния изменения климата на ледниковые системы и на процесс прорыва озер. Быстрое образование и расширение надледниковых озер может дополнительно спровоцировать прорывы. Анализ изображений до и после событий выявил значительные изменения в надледниковых озерах и на берегу реки Сурхоб, которые спровоцировали повышенные риски образования селей (рисунок 4.1 и 4.2). В период с 11 по 16 августа 2020 года наблюдался значительный сброс воды из озер № 6 и № 7 (рисунки 4.1а и 4.1б), Площадь озёр № 6 и № 7 уменьшилась с 20859 м² до 8946 м², и с 15056 м², до 5002 м² соответственно. Процесс внезапного сброса воды задокументированное Комитетом по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороне Республики Таджикистан, привел к ледниковым прорывам, существенно повлиявшие на морфологию берегов реки Сурхоб и разрушения близлежащей дорожной инфраструктуры.

Установлено, что 11 августа 2020 года было наводнение на 250-ом километре автодороги Вахдат-Лахш-Саритош близ села Сурхоб Лахшского района. Селевой поток из русла реки Арчакала под влиянием ледника Саид Нафиси частично перекрыл автодорогу и реку Сурхоб. Исследованиями подтверждено, что образованию селевых потоков предшествовали значительные изменения в надледниковых озерах или они были косвенно связаны с таянием ледника Саид Нафиси. В частности, после крупных наводнений 2020 года, площади озер № 6 и № 7 снова начали увеличиваться и как следствие - прорывы озер в 2021 и 2022 годах. Следует отметить, что в зоне ледника Саид Нафиси в 2020-2022 годах было зафиксировано в общей сложности пять случаев схода селей: 12 июня 2020 года; 11 августа 2020 года; 28 июля 2021 года; 9 сентября 2021 года; и 25 июля 2022 года.

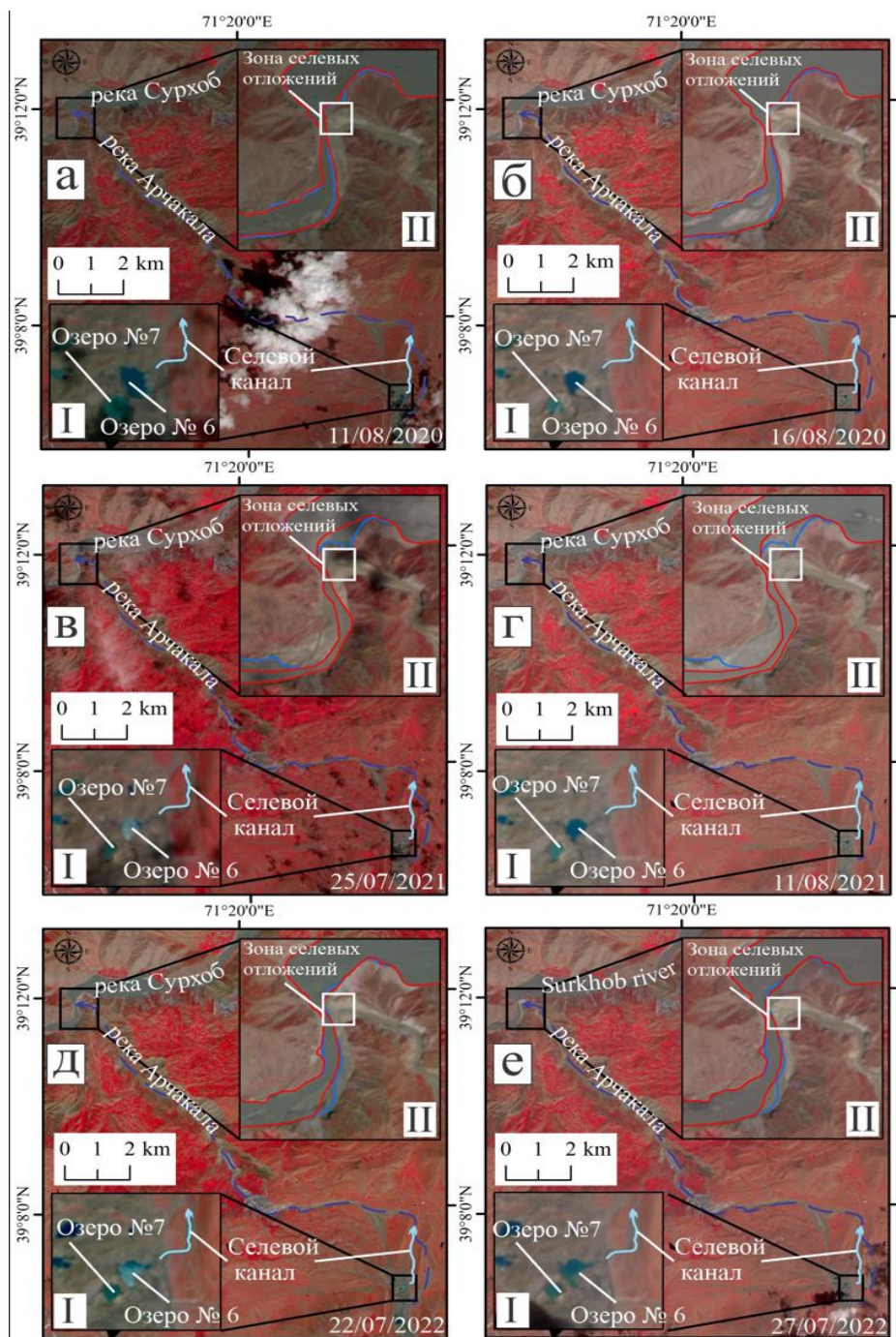


Рисунок 4.1 – Анализ изменений надледниковых озёр и береговой линии реки Сурхоб с использованием данных спутникового мониторинга: (а–е) Сравнительный анализ состояния озёр и береговой линии до и после событий

факт дополнительно подтвержден инфракрасными диапазонами снимков Landsat за тот же период (рисунок 4.2ё).

Для оценки потенциальных сценариев прорыва высокогорных озёр, сформированных на поверхности ледников, в настоящем исследовании была использована численная модель RAMMS: Debris Flow (RApid Mass Movements Simulation), разработанная Институтом снежных лавин и ландшафтов Швейцарии (SLF). Лицензия на использование программного обеспечения была предоставлена в рамках международного проекта GLOFCA (Glacial Lake Outburst Floods in Central Asia), финансируемого региональным офисом ЮНЕСКО в Алматы. В рамках этого проекта также была проведена подготовка специалистов из стран Центральной Азии по методикам численного моделирования опасных геодинамических процессов.

RAMMS: Debris Flow представляет собой современную двумерно- и трёхмерно-решаемую физико-математическую модель, предназначенную для моделирования движения масс различного происхождения (селей, камнепадов, прорывных потоков и лавин) по цифровой модели рельефа. Движение моделируется на основе закона трения Вельми, в котором сопротивление среды описывается двумя составляющими:

- Сухое трение Кулона (μ), масштабируемое с нормальным напряжением.
- Квадратичное сопротивление (ξ), отражающее влияние вязко-турбулентного трения.

Полное выражение сопротивления трения имеет следующий вид:

$$S = \mu \rho H g \cos(\varphi) + \rho g U^2 / \xi,$$

где:

- S - общее сопротивление (Па),
- ρ - плотность потока (кг/м^3),
- H - глубина потока (м),
- g - ускорение свободного падения (9.81 м/с^2),
- φ - угол уклона поверхности (рад),
- U - скорость потока (м/с).

Исходные данные и параметры моделирования

Для корректного трёхмерного моделирования применялись следующие исходные данные:

- Цифровая модель рельефа (ЦМР) высокой точности, полученная методом фотограмметрии с беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 RTK;
- Ортофотоплан высокого разрешения (Google Hybrid и UAV-данные);
- Сценарии прорывного объёма от 100 000 до 500 000 м^3 ;
- Параметры трения, подобранные в соответствии с эмпирическими значениями, наблюдаемыми для аналогичных геологических условий.

В качестве примера, при моделировании сценария с прорывным объёмом 500 000 м^3 использовались параметры трения: $\mu = 0.02$, $\xi = 800 \text{ м/с}^2$. Це-

лью моделирования являлось определение ключевых характеристик потока: максимальной глубины, скорости, давления и пространственной протяженности пораженной зоны.

Результаты численного моделирования потенциального прорыва ледникового озера №6, расположенного на поверхности ледника Саид Нафиси, были представлены в виде пространственно-временных картографических слоёв, отражающих ключевые параметры потока: расходы, скорости, глубины и давления.

На рисунке 4.3а представлен график расхода, демонстрирующий пиковое значение в $22.77 \text{ м}^3/\text{с}$. Глубина потока в прибрежной части достигает более 10 м, что указывает на высокоэнергетичный характер потока. На рисунке 4.3б показано распределение максимальной скорости потока, при этом на отдельных участках, особенно в местах сужения долины, скорость достигает 14.5 м/с , что значительно увеличивает разрушительный потенциал.

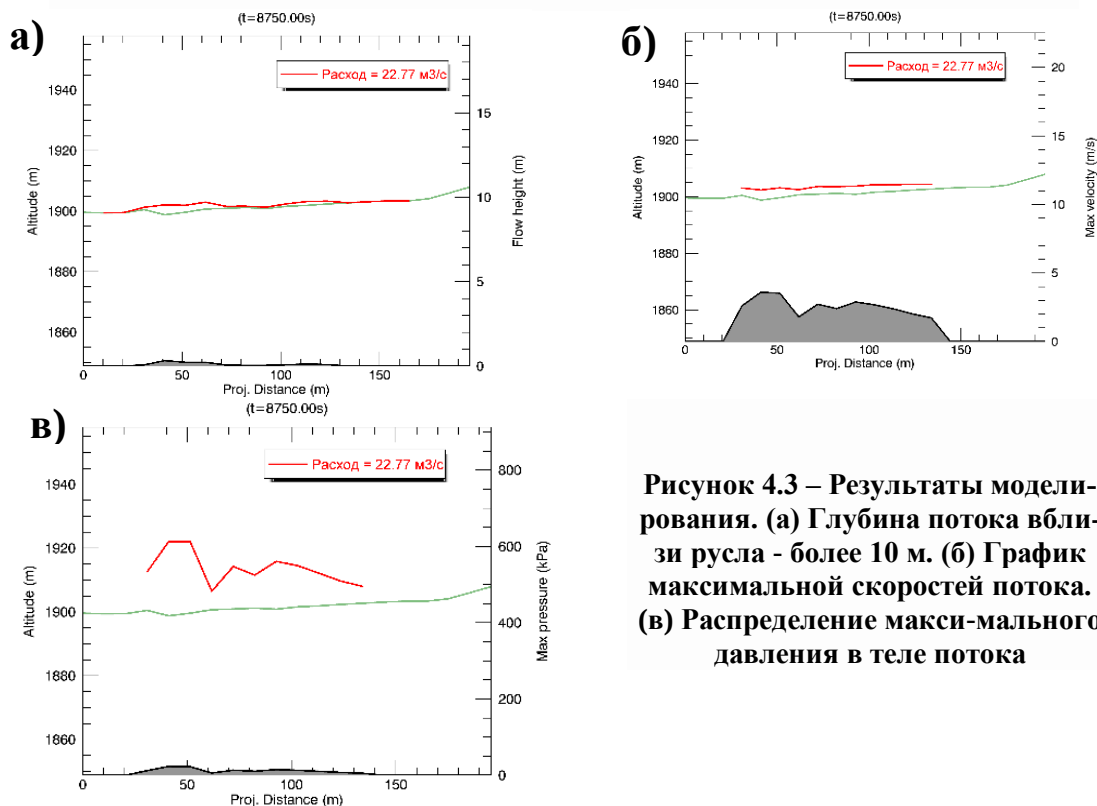


Рисунок 4.3 – Результаты моделирования. (а) Глубина потока вблизи русла - более 10 м. (б) График максимальных скоростей потока. (в) Распределение максимального давления в теле потока

Рисунок 4.3в иллюстрирует карту давления в теле потока: максимальные значения составляют до 500 кПа, что способно привести к серьёзным механическим повреждениям гидротехнических и транспортных сооружений.

ний. Рисунок 4.4а представляет пространственное распределение глубины потока на стадии его наибольшего развития. Глубина варьируется от 1 до 10 м, отражая морфологические особенности долины и влияние уклона. На рисунке 4.4б приведена карта максимальных скоростей потока, где значения скорости превышают 12 м/с в зонах с интенсивным падением уклона, что дополнительно подчеркивает высокий уровень геодинамической опасности моделируемого события.

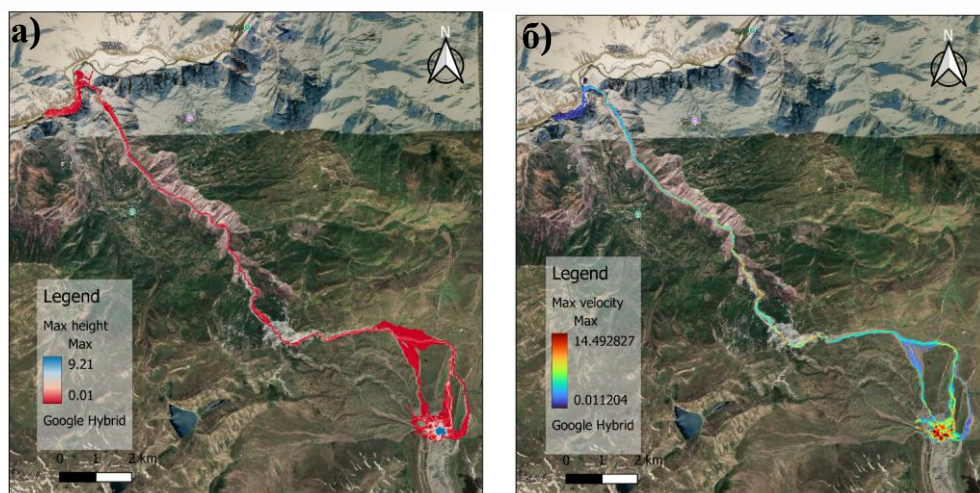


Рисунок 4.4 – Результаты моделирования. (а) Пространственное распределение глубины потока на стадии максимального развития: глубина варьируется от 1 до 10 м. (б) Карта максимальных скоростей: отмечены участки, где скорость потока превышает 12 м/с.

Полученные данные позволяют сделать вывод о высокой разрушительной способности возможного прорывного потока и подчеркивают необходимость постоянного мониторинга подобных озёр в условиях быстро меняющегося климата.

В 2016 и 2017 годах в бассейне реки Шураки-Капали наблюдались каменно-ледяные лавины, спровоцировавшие возникновения селей, нанесший значительный ущерб местному населению и инфраструктуре (рисунок 4.3).

В последние годы, в связи с резким изменением климата - включая повышение среднегодовых температур и учащение экстремально жарких летних периодов - наблюдается ускорение процессов таяния ледников. Это, в свою очередь, способствует значительному увеличению природных рисков, связанных с ледниковыми образованиями.

Подтверждением вышеизложенного являются селевые проявления в районе Шураки-Капали, которые нанесли серьёзный ущерб населенным пунктам, расположенным ниже по течению. Катастрофический селевой поток был зафиксирован в этом регионе летом 2016 года (рисунок 4.5).

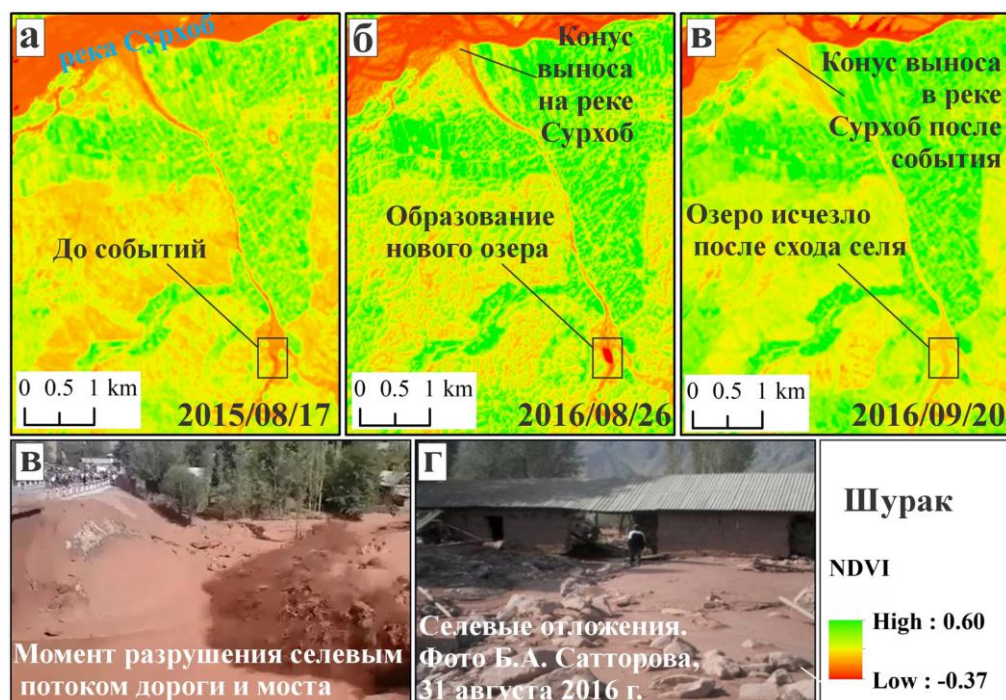


Рисунок 4.5 – Каменно-ледяные лавины и изменений в озерах, приводящих к опасностям на участке Шураки-Капали

Наличие подтверждённых гляциологических рисков указывает на высокую динамичность ледниковых процессов (Саидов и др., 2019) и подчёркивает необходимость систематического мониторинга, а также разработки и внедрения эффективных мер по управлению природными рисками.

Эти события, характеризующиеся откалыванием массивных ледяных глыб от ледников и быстрым спуском по долине, не являются уникальными для этой области. Последние 2 км до впадения в реку Сурхоб, река Восточный Шурак протекает среди полей сельскохозяйственной окраины районного центра Таджикабад. Ледово-каменный селя в верховьях долины привел к выбросу значительных объемов воды, оказавшее воздействие на берега реки. Сравнение снимков до и после описываемых событий, показывает, что русло реки Восточный Шурак в устьевой зоне расширилось более чем вдвое, сопровождавшееся смывом 20,5 га плодородных земель и несколько построек.

К концу лета 2020 года язык, спускавшийся по речному каньону ниже ледника № 507, сильно деградировал, его нижний край отступил на 1300 м от положения в июле 2017 года. Вместе с тем, в период с 21 по 23 июня 2019 года на том же месте произошел еще один каменно-ледовый обвал, что еще раз подчеркнуло сохраняющиеся опасности, связанные с изменением ледника в этом районе. Воды реки Восточный Шурак пробились сквозь лед, обратив при этом своды она вышла на поверхность. На наш взгляд, в ближайшие 2-3 года - это единое тело распадется на отдельные части и скорее всего исчезнет.

За последние десятилетия гляциальные селевые потоки были выявлены также и в других горных районах Таджикистана (рисунок 4.6 и 4.7). В частности, сход гляциальных селевых потоков на территории западного Памира наблюдался в долине реки Барсемдара в 2015 г.

Последствия данного ЧС катастрофическими. Установлено, что, сформировавшийся в ходе селевой катастрофы конус выноса реки Барсемдара перегородил русло реки Гунт с последующим образованием подпрудного озера в 15 км города Хорога (Черноморец и др., 2015; Докукин и др., 2019; Пирмамадов и др., 2020). И как следствие, в зоне затопления оказалось значительное количество сельскохозяйственных территорий, жилых построек, автодорог.



Рисунок 4.6 – Результаты проведения аэрофото-видеосъемочных работ исследуемого участка села Барсем в 2023 г. Фото М.С. Сафарова

Юдиной и соавторами была проведена оценка характеристик потенциальных современных селевых потоков в долине реки Барсемдара (Юдина, 2022). Расчёты выполнены на основе цифровой модели рельефа, полученной в 2019 году с использованием данных, собранных с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в пределах конуса выноса.

Для моделирования использовались гидрографы в программной среде FLO-2D, результаты которых представлены на рисунке 4.7. Эти данные отражают потенциальные зоны затопления при повторении катастрофического селевого события 2015 года, с учётом современного состояния рельефа селевого конуса.

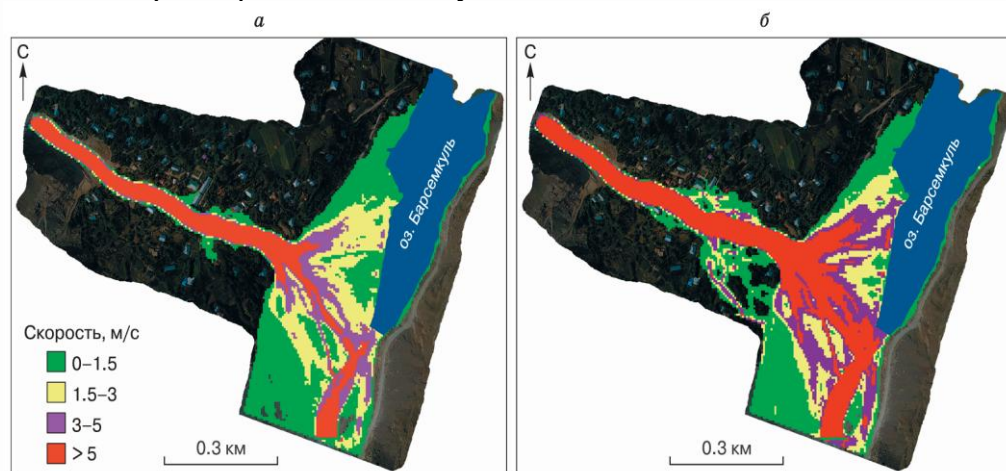


Рисунок 4.7 – Плановое распределение скоростей первой волны, полученное в результате моделирования по различным сценариям согласно с использованием программного комплекса FLO-2D и данных, полученных с БПЛА (Юдина, 2022)

В 2002 году в результате прорыва термокарстового озера в долине реки Дашт образовался катастрофический селевой поток (Mergili и др., 2011b; Наврузшоев и Фазылов, 2022). Основные разрушения наблюдались на конусе выноса реки. Погибли 24 человека и 510 голов скота, было разрушено 75 домов и 2 моста, 4 км автомобильной дороги (Докукин и др., 2020; Юдина и др., 2022).

Прорывные наводнения относятся к быстрому выбросу воды из ледниковых источников, несущие обильное количество осадков, включая грязь и мусор. Эти наводнения часто переносят осадки, которые были отложены вниз по склону от ледника из-за предыдущего таяния и эрозии. При этом прорывные наводнения выполняют решающую роль в перераспределении материала, способствуя эволюции окружающего ландшафта и формированию аллювиальных особенностей в регионе (Safarov и др., 2024b). Исследуемый регион характерен несколькими историческими наводнениями, которые нанесли значительный ущерб имуществу и инфраструктуре (Mergili и др., 2011b; Komatsu

и Watanabe 2014; Scaini и др., 2024a; Scaini и др., 2024b), включая разрушение дорог, разрушение электроснабжения и препятствие течению реки (Cenderelli and Wohl 2003; Bajracharya и др., 2007; Сафаров и Фазылов, 2022). Отмечено резкое увеличение региональных ледниковых озер и надледниковых прудов вместе с их потенциальным воздействием на местные сообщества, инфраструктуру и экосистемы в высокогорных регионах (Zhang и др., 2015; Zhou и др., 2018; Bolch и др., 2012; Bolch и др., 2019; Nie и др., 2021).

На основе изучения первичных данных Комитета по чрезвычайным ситуациям, а также других источники, нами проведены несколько оперативных полевых визитов в районы, подверженные стихийным бедствиям. Осуществлен анализ ежегодных статистических данных о частоте и видах стихийных бедствий (лавины, сели, землетрясения, сильные ветры, ливневые дожди, камнепады, оползни, повышение уровня воды в водохранилищах, грозы) влияющие на различные сектора экономики и население Таджикистана.

Кроме того, спутниковые наборы данных являются незаменимыми инструментами для мониторинга стихийных бедствий, в том числе селей (Atefi и Miura, 2022; Safarov и др., 2024a). Исследования осуществлялись с применением спутниковых снимков для анализа выбранных участков с использованием NDWI и NDVI для получения данных о состоянии растительности, плотности и наличии водоемов, потенциально влияющие на риски возникновения селей.

Например, снижение значений NDVI может сигнализировать о стрессе растительности или изменениях почвенно-растительного покрова, что потенциально повышает риск возникновения селей. Кроме того, изображения БПЛА и исторические снимки Landsat были использованы для разграничения озер, визуального обнаружения изменения границ селевых отложений и русел рек. Спутниковые данные прошли этапы предварительной обработки, включая геометрические коррекции, и были дополнительно проверены с помощью изображений Google Earth для обеспечения точности анализа. Кроме того, нами использованы спутниковые снимки из Google Earth до схода селя и сравнили их с аэрофотоснимками, после схода селя с помощью БПЛА, для выявления деталей повреждений в районах.

Исследование интегрировало данные цифровой модели рельефа (ЦМР) Advanced Land Observing Satellite (ALOS) Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) с разрешением 12,5 метров (ASF 2023). Этот набор данных использовался для создания карт уклонов, экспозиций и контуров бассейнов селевых потоков на выбранных участках. Методы валидации использовались для оценки точности полученных индексов и сравнения с существующими наборами данных. Благодаря включению этих подробных методологий исследование обеспечило надежный и всесторонний анализ районов, подверженных селям, с использованием как спутниковых, так и БПЛА-данных.

Всестороннее изучение опасностей, возможно, способствует управлению земельными ресурсами и управлению рисками стихийных бедствий, где восприимчивость к опасностям и зонирование могут управлять ими и уменьшать ущерб сельскохозяйственным угодьям и инфраструктуре (Chen и др., 2023).

Кроме того, горизонтальное расширение озер может привести к более быстрому таянию ледника и увеличить риск возникновения прорывопасных ледниковых озер (ППЛО) и селей (Otto, 2019). По мере расширения этих озер они могут создавать условия, которые усиливают явления откола, способствующее дестабилизации поверхности ледника и увеличивает объем воды, доступной для потенциальных ППЛО. При этом, образованные трещины, часто заполняются накапливающейся водой, еще больше ускоряет скорость таяния ледника (Kirkbride and Warren 1999; Röhl 2008; Banerjee и др., 2024a). Поэтому для устранения потенциальных опасностей, связанных с образованием озер, необходимы скоординированные усилия, которые недостаточны в горных районах Таджикистана (Pescoraro и др., 2019). Тем не менее, непрерывный мониторинг и локальные системы раннего оповещения (early warning system - EWS) в совокупности эффективны для минимизации потенциальных опасностей, связанных с нагонами ледников и прорывами озер.

4.2. Социально-экономические последствия: анализ ущерба от природных катастроф

Природные катастрофы - ледниковые озёрные взрывы и оползни, стали одной из главных угроз для сообществ и экосистем в Таджикистане, подчеркивая необходимость глубокого анализа их социально-экономических последствий. В период с 2020 по 2023 годы в Таджикистане было зарегистрировано 1826 природных катастроф, что привело к жертвам и экономическим потерям на сумму около 30,2 миллиона долларов США. Увеличение числа катастроф связано с изменениями климата, приводящими к ускоренному таянию ледников и образованию ледниковых озёр, что в свою очередь увеличивает риск оползней и других связанных угроз. В частности, в 2022 году количество зарегистрированных оползней возросло на 94,2% по сравнению с предыдущим годом, что отражает возрастание уязвимости местного населения и его имущества.

Экономические последствия данных катастроф значительны: разрушение жилых домов, инфраструктуры и сельскохозяйственных угодий негативно сказывается на уровне жизни населения. Местные сообщества, особенно в уязвимых зонах, таких как Лахш и Таджикабад, сталкиваются с постоянной угрозой, требующей не только усилий по спасению жизней, но и системного подхода к управлению рисками. Здесь важно учитывать адаптивные стратегии, которые включают интеграцию местных знаний, а также использование

новых технологий для мониторинга потенциальных угроз. Налаживание систем раннего предупреждения о ППЛО может помочь значительно снизить риски и обезопасить проживание местного населения.

Необходимость применения современных технологий становится очевидной в условиях постоянного изменения природной среды. Использование БПЛА и спутниковых снимков для анализа природы и структуры опасностей открывает новые возможности для быстрого сбора данных и оценки изменений, которые могут поддержать управление чрезвычайными ситуациями. Важно, чтобы меры по повышению устойчивости местных сообществ строились на основе как физического мониторинга, так и учета социальных факторов. Для этого необходимо постоянное развитие методов обнаружения угроз и создание эффективных стратегий управления, направленных на защиту жизни и имущества местных жителей. Таким образом, внедрение комплексного, междисциплинарного подхода, охватывающего информационные, социальные и экономические аспекты воздействия природных катастроф, является краеугольным условием для обеспечения устойчивого развития и повышения адаптационного потенциала сообществ в условиях изменяющегося климата.

Изменения в ледниковых системах и ледниковых озерах оказывают значительное влияние на экосистемы и местное население, в том числе на сельское хозяйство и водоснабжение. С уменьшением объема ледников в результате глобального потепления наблюдается снижение водных ресурсов, что в свою очередь влияет на доступность водных запасов для ирригации сельскохозяйственных угодий и местного населения.

Сокращение площади ледников приводит к уменьшению объемов стока пресной воды в реки и водоемы, в свою очередь, может спровоцировать сокращение биологических ресурсов и деградацию водных экосистем. Этот процесс угрожает биоразнообразию, так как множество видов флоры и фауны зависит от устойчивого водоснабжения и стабильных гидроэкологических условий. Например, рыбные популяции и другие водные организмы, обитающие в речных бассейнах, могут подвергаться экологическому стрессу в результате изменения температурного режима, уменьшения уровня растворённого кислорода, а также снижения уровня воды в водоемах.

Сельское хозяйство, как одно из ключевых отраслей экономики, также страдает от экологических последствий, связанных с изменениями водных ресурсов. С увеличением частоты засух и уменьшением доступной пресной воды, фермеры сталкиваются с трудностями в орошении сельскохозяйственных культур и как следствие снижение урожайности и повышение цен на производимую продукцию. Изменения в экосистемах могут вызвать миграцию работоспособного населения в поисках лучших условий жизни, создавая дополнительное давление на социальные и экономические структуры регионов.

Таким образом, трансформация ледниковых и озерных систем представляют собой многогранную проблему, воздействующую на экологическую устойчивость, социальную стабильность и экономическое развитие региона. Данная проблема требует глубокого междисциплинарного анализа, разработки адаптационных стратегий и координированных мер реагирования со стороны местных, национальных и международных институтов управления.

Глава 5. РЕКОМЕНДАЦИИ МОНИТОРИНГА ЛЕДНИКОВ, ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР И УПРАВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫМИ РИСКАМИ, СВЯЗАННЫЕ С НИМИ

5.1. Рекомендации по управлению опасными природными явлениями, связанные с динамикой ледников и ледниковых озер. Превентивные меры снижения риска возникновения стихийных бедствий

Эффективное решение проблем, связанных с исследованием горных прорывоопасных озер, и создание механизма их мониторинга на национальном и региональном уровнях требует последовательных и целенаправленных действий, разработанных с учетом долгосрочных перспектив. Объединение усилий правительств, гражданского общества, бизнес-структур и научного сообщества, а также развитие международного сотрудничества, может обеспечить комплексный подход к управлению рисками, связанными с ледниками и ледниковыми озерами, включающее мультидисциплинарный подход, сочетающий как научные, так и практические аспекты.

Ключевым шагом на этом пути является создание эффективных систем раннего мониторинга и предупреждения. Решение данной проблемы должно основываться во внедрении комплексных систем мониторинга, объединяющие наземные наблюдения и технологии дистанционного зондирования, включая данные, полученные с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и спутников.

Использование БПЛА позволяет осуществить аэрофотоснимки высокого разрешения (менее 30 см), позволяющие реализовать детальное картографирование ледников, озер и территорий, подверженных селям. Именно такой подход позволяет выявить более мелкие объекты, к которым отнесены надледниковые пруды, и получить детальное представление о пространственных изменениях, происходящих в ледниках, являющиеся критически важными для оценки сопутствующих опасностей, в том числе прорывы ледниковых озер.

Для обеспечения долгосрочного мониторинга рекомендовано использовать БПЛА не только для фиксации текущих изменений, но также и для верификации прогностических моделей. Важным этапом дальнейших исследований является акцент на внедрение новых технологий БПЛА, включая RGB и LIDAR, которые могут значительно улучшить сбор и анализ данных о состоянии ледников и пойменных озер. Одним из основных элементов, обеспечивающий получение достоверных данных, на основе постоянного мониторинга климатических условий и изменений в ледяном покрове является установка стационарных метеорологических станций вблизи ледников, позволяющая не только следить за изменениями, но также планировать превентивные меры по управлению рисками.

Значимым направлением исследований является осуществление батиметрических съемок, включающие инвентаризацию высокогорных

озер, оценку их состояния и устойчивости плотин, а также характеристику рек, находящихся ниже по течению относительно населенных пунктов в потенциально опасной зоне. Анализ и оценка полученных данных позволяют составить диаграммы распределения площадей, объемов и максимальных глубин озер, а также определить безопасные уровни воды. Данные, характеризующие рельеф озерных перемычек, имеют решающее значение для проектирования профилактических мероприятий, направленных на снижение риска прорыва.

Применение технологий по разрядке напряженности в зонах, подверженных ППЛЮ, также представляется многообещающим. Исторический опыт показывает успешные случаи, такие как первая аварийная мелиорация моренного озера в Иле Алатау в 1964-1970 годах в Казахстане, где использование сифонов позволило эффективно снижать уровень воды в угрожающем озере № 2, расположенном у конца ледника Туйыксу (Туюксу). Однако важно учитывать, что опорожнение озер может активизировать криогенные процессы, создавая новые очаги селей. Поэтому эффективность подобных методов должна быть тщательно обоснована и проверена с точки зрения снижения рисков и предотвращения катастрофических последствий (Фазылов и др., 2024).

На сегодняшний день в Казахстане накоплен значительный опыт предотвращения прорыва ледниковых озер, который может стать надежной основой для разработки превентивных мер по снижению рисков прорыва ледниковых озер в Таджикистане (рисунок 5.1 – 5.4). Превентивные мероприятия, например, в бассейне реки Киши Алматы у ледника М. Маметовой, которые начаты в 1976 году, сосредоточены на снижении объема воды в озерах. Создание искусственного эрозионного канала для контролируемого сброса воды помогает увеличить безопасность и предотвращает образование селевых потоков.

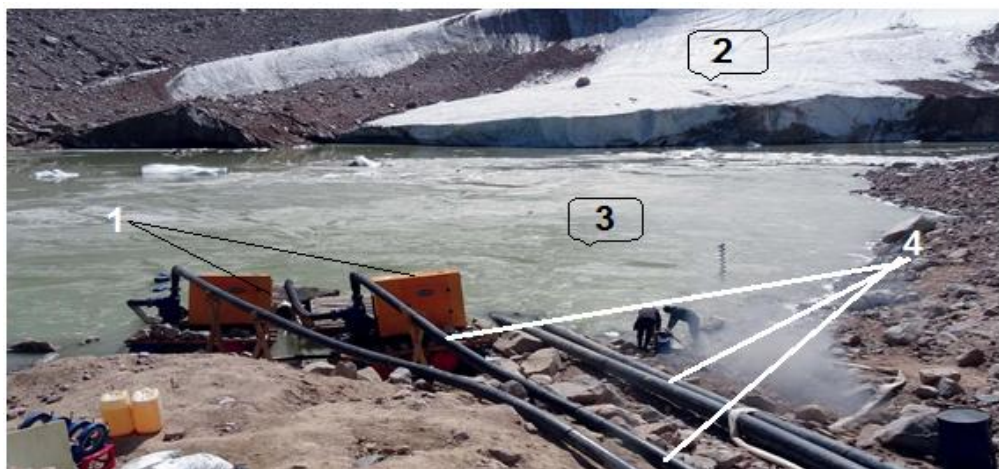


Рисунок 5.1 – Откачка воды из приледникового озера насосами и сифонами (Медеев, 2011). 1-сифоны; 2-ледник; 3-озеро; 4-отводящие (сбросные) трубопроводы.



Рисунок 5.2 – Работы на озере №6 у ледника М. Маметовой в бассейне р. Киши Алматы (Медеу, 2011). 1 - брезентовый экран; 2 - мягкий затвор.

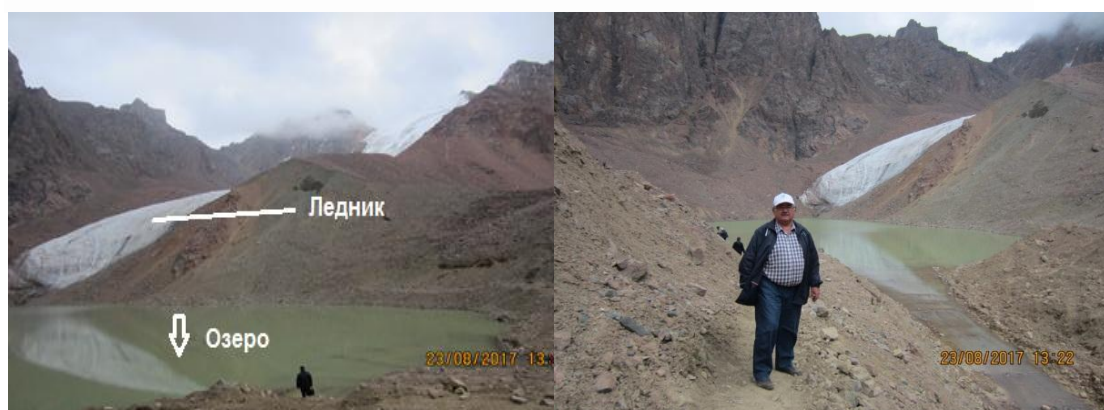


Рисунок 5.3 – Потенциально опасное озеро Маншук Маметовой

Одним из надежных методов предотвращения риска прорыва ледниковых озер является устройство эвакуационных каналов, которые позволяют контролировать сброс воды без проведения взрывных работ. Такой подход не только повышает безопасность прилегающих территорий, но и обеспечивает более эффективное управление водными ресурсами.



Рисунок 5.4 –Прокладка эвакуационного канала (1) для опорожнения приледникового озера с использованием экскаватора и бульдозера. Фото Фазылова А.Р. (23.08.2017г.) (Фазылов и др., 2024)

Не менее важным является строительство плотины (рисунок 5.5), а также использование гибких противоселевых конструкций (рисунок 5.6), способные адаптироваться к гидравлике селевых потоков и минимизировать их разрушительные последствия. В качестве прогностических признаков для определения рисков селей гляциального генезиса предлагается учитывать ряд климатических параметров: температурный фон, положение нулевой изотермы, уровень увлажненности, солнечную радиацию и общие осадки, а также состояние озерных перемычек. Кроме того, для защиты от селей на малых водотоках, отличающихся высокой селевой активностью, эффективным решением являются гибкие многоуровневые селезащитные барьеры (Park и др., 2013).

Конструкции из кольцевых (кольчужных) сеток продемонстрировали высокую надёжность как в лабораторных испытаниях, так и в реальных условиях эксплуатации по всему миру. Они способны эффективно задерживать твёрдую фракцию селевого потока, при этом не препятствуя прохождению воды и мелкодисперсных частиц. Такие барьеры применяются в качестве элементов селевой сортировки, защитных ограждений, альтернативных традиционным бетонным дамбам, а также в составе систем барражей, способствующих снижению уклона русла и уменьшению донной эрозии. Их использование значительно повышает уровень безопасности в потенциально опасных горных районах (Волосухин и др., 2011; Волосухин и Титоренко, 2012).



Рисунок 5.5 – Противоселевые барьеры в провинции Сичаунь, КНР. Фото Сафарова М.С.

Как показала практика, использование только метеорологических показателей не всегда приводит к точному прогнозированию прорыва высокогорных водоемов. Более эффективным является изучение взаимосвязей между температурой воздуха и талым стоком в конкретных бассейнах (Титоренко, 2012). Неравномерное изменение режима стока, внезапное снижение уровня воды в водоемах могут служить сигнальными признаками возможных прорывов (Шафиев, 2014, Черноморец и др., 2018; Черноморец и др., 2019;)



Рисунок 5.6 – Облегченное гидротехническое противоселевое сооружение

Для полноты прогнозирования катастрофически опасных ситуаций необходимо непрерывное исследование и архивирование данных о температуре воды, уровне осадков, динамику зеркальной площади озер, морфологические характеристики плотин природного и техногенного происхождения, а также гидрологическое состояние питающих и подпитывающих рек. На наш взгляд именно комплексный подход позволит разрабатывать обоснованные и эффективные стратегии управления рисками, которые будут адаптированы к специфике различных горных регионов.

При этом следует иметь в виду, что комплексный подход, включающий мониторинг, научные исследования и участие местных сообществ, несомненно, повысит устойчивость регионов к природным катастрофам и обеспечит защиту населения от потенциальных угроз.

5.2. Перспективные направления исследования в области динамики ледников и ледниковых озер

Дальнейшие исследования изменений ледников и ледниковых озер в Таджикистане должны быть сфокусированы на мультидисциплинарных подходах для более глубокого понимания этих процессов и их последствий для экосистемы и общества. Основное внимание следует уделить динамике ледников, их массе и скорости таяния, которая в значительной мере определяется погодными условиями и изменениями климата. Проведение полевых исследований и мониторинг состояния ледников с использованием современных технологий, таких как LiDAR и спутниковые данные, могут дать более точную информацию о состоянии ледников и предсказать их последствия для региональной гидрологии.

Важно также исследовать воздействие изменений в ледниковой системе на гидрологический режим рек и экосистему в целом. Уменьшение объема ледников может привести к изменению качества и количества воды, что влияет на сельское хозяйство и водоснабжение местных населенных пунктов. Отслеживание этих изменений даст возможность оценить социально-экономические последствия и поможет разработать стратегии для адаптации местных сообществ к новым условиям. Моделирование, основанное на собранных данных, позволит прогностически оценивать будущее поведение ледников и их влияние на более широкие экосистемы.

Наконец, стоит усилить сотрудничество между научными учреждениями, правительственными организациями и международными партнерами. Обмен данными и опытом, создание совместных исследовательских программ и проектов помогут быстрее находить эффективные решения проблем, связанных с изменениями льда. Организация международных конференций и семинаров позволит создать платформу для обмена знаниями и наилучшими практиками, что будет способствовать развитию научной базы и практического применения результатов исследований.

5.3. Научно-технические основы актуальности применения технологий и технических средств ДЗЗ в области мониторинга ледников и ледниковых озер

Применение методов и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для мониторинга ледников и ледниковых озер в Таджикистане демонстрирует высокую экономическую эффективность как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Одним из основных преимуществ ДЗЗ является возможность получать данные о состоянии ледников в больших объемах и с высокой пространственной разрешающей способностью без необходимости проводить большие полевые исследования, значительно сокращающие временные и финансовые затраты на сбор данных, особенно в условиях ограниченных ресурсов.

Кроме того, данные, полученные с использованием технологий ДЗЗ, могут быть использованы не только для мониторинга ледников, но также для анализа более широких экосистемных процессов, предоставляющие информацию об изменениях в землепользовании, сельском хозяйстве, а также позволяющие оценить последствия изменений в ледниковой системе для местного климата.

Таким образом, технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) эволюционируют в универсальный и высокоэффективный инструмент, как для проведения фундаментальных и прикладных научных исследований, так и для оперативного и стратегического управления природными ресурсами (Шовенгердт и др., 2013; Быков и др., 2016; Сафаров и Фазылов, 2023). Их применение способствует повышению точности мониторинга окружающей среды, рационализации природопользования и, в конечном итоге, улучшению экологических и социально-экономических условий жизни населения.

Внедрение технологий ДЗЗ создает основу для повышения устойчивости местных сообществ. Доступ к актуальной информации о состоянии ледников и их возможных последствиях для водных ресурсов позволит местным администрациям более эффективно управлять ресурсами, что, в свою очередь, может способствовать экономическому развитию региона.

Инвестирование в технологии ДЗЗ может стать стратегическим шагом для обеспечения безопасного будущего для местных жителей, сокращая риски, связанные с изменениями климата и экосистемами и позволяющее получить не только экономические выгоды, но также обеспечить защиту населения и экологию региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение ледников и ледниковых озер Таджикистана и что немало важно исследование возможных проявлений гляциологических рисков, является не только важным элементом гляциологии, но и критически значимым для понимания экосистемных изменений, происходящих на фоне глобального потепления. Ледники Таджикистана, выполняют жизненно важные функции, играя ключевую роль в гидрологическом цикле региона.

В условиях изменения климата, наблюдаемого в последние десятилетия, они становятся чувствительными индикаторами изменений экосистемы, что содержит важные предупреждения о грядущих экологических и социально-экономических последствиях.

На основе полученных результатов установлено, что ледники Таджикистана подвергаются интенсивным трансформациям как в плане пространственного распространения, так и в отношении массы и объемов.

Данные, собранные с помощью высокоточных спутниковых снимков, исторические сцены Landsat, аэрофотосъёмки с применением БПЛА, подтверждают тенденцию к сокращению ледников и увеличению числа ледниковых озер. Проявляющиеся изменения становятся фактором формирования новых природных угроз, включая прорывы моренных озёр, требующие разработки интегрированных, многоуровневых и адаптивных стратегий управления природными рисками, основанных на научном мониторинге и межсекторальном взаимодействии.

Изменения климатических условий, особенно в виде повышения температуры и измененного режима осадков, в значительной степени способствуют ускоренному таянию ледников. Результаты наших исследований, позволяют утверждать, что многие ледники, в том числе Ванджях, утратили значительное количество массы, что ведет к ухудшению ситуации с водоснабжением для местных сообществ, которые во многом зависят от стабильных потоков пресной воды, производимой этими ледниками. Сокращение площадей ледников непосредственно сказывается на доступности ресурсов для сельскохозяйственных нужд и других отраслей.

Климатические изменения усиливают образование и экспансию ледниковых озер. В процессе данного исследования было выявлено, что количество увеличенных озер напрямую связано с растущими температурами, что создает предпосылки для их переполнения и потенциальных прорывов, что ведет к разрушению инфраструктуры и возникновения угрозы для жизни населения. С учетом современных реалий, следует отметить важность интеграции систем мониторинга и научных исследований с целью профилактики, проектирование митигационных работ для смягчения последствий и подготовки к возможным чрезвычайным ситуациям.

С учетом того, что динамика ледников и ледниковых озер в Таджикистане несут в себе социально-экономические последствия, необходимо иметь в виду, что использование и развитие систем раннего предупреждения о рисках, связанных с ледниковыми прорывами, могут оказать значительное влияние на снижение числа жертв и ущерба от подобных катастроф.

Предлагается создать платформу сотрудничества между учеными, местными властями и сообществами, что позволит улучшить восприятие рисков и эффективность реагирования на природные угрозы.

Понимание процессов, связанных с изменением ледников и ледниковых озер, является важным фактором возможного прогнозирования и водной безопасности для региона. Адаптация сельского хозяйства и других отраслей к изменяющимся гидрологическим условиям требует комплексного анализа и внедрения новых технологий для эффективного управления водными ресурсами, обеспечивающего продовольственную безопасность и устойчивое развитие местных сообществ.

Важно также акцентировать внимание на необходимости интеграции местных знаний и практик в современную систему управления водными ресурсами. Местные сообщества обладают ценными знаниями о своих экосистемах, которые могут быть полезны для научных исследований и разработки адаптационных стратегий. Вовлечение населения в процессы мониторинга и управления рисками позволит повысить уровень доверия и сотрудничества между наукой и обществом.

Не менее значительным является междисциплинарный подход к изучению изменений в ледниковых системах. Климатология, гидрология, экология и социальные науки должны объединиться для комплексного анализа происходящих процессов. Создание совместных исследовательских проектов и платформ для обмена данными между разными дисциплинами может привести к более глубокому пониманию взаимосвязи между изменениями в ледниках и их влиянием на окружающую среду и людей.

В контексте провозглашения Организацией Объединённых Наций 2025 года Международным годом защиты ледников, задачи по всестороннему исследованию и регулярному мониторингу состояния ледников Таджикистана приобретают особую актуальность для обеспечения водной, энергетической и продовольственной безопасности, а также социально-экономического благополучия населения и устойчивого развития горных регионов.

Результаты исследования позволяют утверждать о критической важности защиты ледников как фундаментальных компонентов высокогорных экосистем и стратегических резервуаров пресной воды.

Особое значение имеет инициатива, единогласно принятая 13 августа 2024 года Генеральной Ассамблеей Организации Объединённых Наций - «Десятилетие действий в поддержку криосферных наук на 2025-

2034 годы», выдвинутая Республикой Таджикистан совместно с Французской Республикой. Она подчёркивает необходимость международной мобилизации научных ресурсов и политической воли для всестороннего изучения, сохранения и устойчивого управления криосферными системами. Данная инициатива отражает возрастающее осознание того, что деградация криосферы представляет собой глобальную проблему, затрагивающую не только устойчивость горных экосистем, но и водный баланс, климатические процессы и уровень моря на планетарном масштабе.

Назрела необходимость в реализации комплексных и скоординированных мер, направленных на сохранение ледников, разработку адаптационных стратегий к изменению климата и минимизацию негативных последствий для местных сообществ, особенно в уязвимых и труднодоступных территориях.

Дальнейшее изучение трансформаций и динамики ледников в Таджикистане остаётся приоритетным направлением научной и практической деятельности и требует интеграции междисциплинарных подходов.

Обмен научными данными, развитие международных партнёрств и применение современных технологий дистанционного мониторинга способны существенно повысить эффективность управления водными ресурсами и снижения природных рисков.

Примером именно такого подхода были результаты Международной Конференции высокого уровня по сохранению ледников состоявшегося с 29 по 31 мая 2025 года в городе Душанбе, Таджикистан.

Устойчивое будущее Таджикистана, как и всего региона Центральной Азии, напрямую связано с уровнем научного понимания, политического внимания и практических действий в сфере охраны ледников и охраны окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хакимов Ф.Х., Мирзохонова С.О., Мирзохонов О.В. Изменение температурного режима на территории восточного Памира. 2006, том 49, №10-12. С. 948-954
2. Dushanbe Water Process, 2022 Glacier preservation- a global challenge. Another global initiative of the President of the Republic of Tajikistan was supported. Access data: <https://dushanbewaterprocess.org/glacier-preservation-a-global-challenge-another-global-initiative-of-the-president-of-the-republic-of-tajikistan-was-supported/>
3. Kure, S.; Jang, S.; Ohara, N.; Kavvas, M.L.; Chen, Z.Q. Hydrologic impact of regional climate change for the snow-fed and glacier-fed river basins in the Republic of Tajikistan: Statistical downscaling of global climate model projections. *Hydrol. Process.* 2013, 27, 4071–4090. <https://doi.org/10.1002/hyp.9536>
4. Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Душанбе, 2022. – 260 с.
5. Groll, M., Opp, C., Kulmatov, R. et al. Water quality, potential conflicts and solutions—an upstream–downstream analysis of the transnational Zarafshan River (Tajikistan, Uzbekistan). *Environ Earth Sci* 73, 743–763 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2988-5>
6. Umuhoza, J., Jiapaer, G., Yin, H., Mind'je, R., Gasirabo, A., Nzabarinda, V., & Umwali, E. D. (2021). The analysis of grassland carrying capacity and its impact factors in typical mountain areas in Central Asia—A case of Kyrgyzstan and Tajikistan. *Ecological Indicators*, 131, 108129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108129>
7. Asian Development Bank (2021) Preparation of the irrigation and drainage modernisation in the Vakhsh river basin. Asian development bank project number: 53109 transaction technical assistance, TA-9867 TAJ for preparation of a sector road map, feasibility studies for Yovon and Qumsangir I&D schemes, and an Investment project. Sector assessment and road map. <https://www.adb.org/sites/default/files/linkedddocuments/53109-001-ld-02.pdf>. (Дата обращения: 2 мая 2024 г.)
8. Sharipov UA, Boboev FJ, Khusainov MN, et al. (2022) Energy of the region: some conditions necessary for its development in the Central Asian region. In IOP conference series: Earth and environmental science. 1070 (1) 012012. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012012>
9. Gafforzoda IG, Arabov F P, Sodikov AK (2023) Sustainable development of water resources of Tajikistan. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1229 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1229/1/012024>
10. Nowak, A., Nowak, S., Nobis, M. (2020). The Pamir-Alai Mountains (Middle Asia: Tajikistan). In: Noroozi, J. (eds) *Plant Biogeography and Vegetation of High Mountains of Central and South-West Asia*. Plant and Vegetation, vol 17. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45212-4_1

11. Lioubimtseva, E., & Henebry, G. M. (2009). Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations. *Journal of Arid Environments*, 73(11), 963-977.
12. Nie Y, Pritchard HD, Liu Q, et al. (2021) Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram. *Nat Rev Earth Environ* 2: 91–106. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00124-w>
13. Ullmann, A. L., Haag, I., & Bulbulshoev, U. (2022). Ecological calendars of the Pamir Mountains: Illustrating the importance of context-specificity for food security. *GeoHealth*, 6(12), e2022GH000610. <https://doi.org/10.1029/2022GH000610>
14. Кобулиев З. В. Мониторинг состояния ледников Таджикистана с учётом изменения климата. URL: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/hlm/projects/UNDA-9th_tranche/Documents/Tajikistan/2017_May/03_Kobuliyev.pdf.
15. Долгушин Л.Д. Пульсирующие ледники. Материалы гляциологических исследований, 1968, № 14, с. 298-301
16. Осипова Г.Б., Цветков Д.Г., Щетинников А.С., Рудак М.С. Каталог пульсирующих ледников Памира. Под редакцией В.М.Котлякова. Каталог Гляциологическая ассоциация, Москва, 1998. 134 с.
17. Забиров Р. Д. Оледенение Памира. Географгиз 1955 год. 372 с.
18. Осипова Г.Б. Пятьдесят лет исследований Института географии РАН на леднике Медвежьем, Западный Памир. *Лёд и Снег*. 2015. 55(1):129-140. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-1-129-140>
19. Goerlich F, Bolch T, Paul F (2020) More dynamic than expected: an updated survey of surging glaciers in the Pamir, *Earth Syst. Sci. Data* 12: 3161–3176. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3161-2020>
20. Котляков В.М., Десинов Л.В. Подвижка ледника Медвежьего в 2011 году. *Лёд и Снег*. 2012; 52(1):128-131. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-1-128-131>
21. Kotlyakov VM, Chernova LP, Khromova TE, et al. (2018) Unique Surges of Medvezhiy Glacier. *Dokl. Earth Sci.* 483: 1547-1552. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18120152>
22. Murodov M, Li L, Safarov M, Lv M, Murodov A, Gulakhmadov A, Khusrav K, Qiu Y. A Comprehensive Examination of the Medvezhiy Glacier's Surges in West Pamir (1968–2023). *Remote Sensing*. 2024; 16(10):1730. <https://doi.org/10.3390/rs16101730>
23. Truffer M, Kääb A, Harrison WD, et al. (2021) Chapter 13 - Glacier surges, In *Hazards and Disasters Series, Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters* 2nd ed. Wilfried H, Colin W. Elsevier, 417-466. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00003-2>.
24. Котляков В.М., Осипова Г.Б., Цветков Д.Г. Космический мониторинг пульсирующих ледников Памира // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2008. № 4. С. 74–83

25. Harrison WD, Osipova GB, Nosenko GA, et al. (2015) Glacier surges. In *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*. Academic Press. pp 437-485. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394849-6.00013-5>
26. Zhang Z, Liu S, Wei J, Xu J, Guo W, Bao W, et al. (2016) Mass Change of Glaciers in Muztag Ata–Kongur Tagh, Eastern Pamir, China from 1971/76 to 2013/14 as Derived from Remote Sensing Data. *PLoS ONE* 11(1): e0147327. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147327>
27. Сафаров, М.С., Фазылов А.Р. Селевая активность в бассейне реки Арчакапа. *Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук.* – 2022. – № 2(187). – С. 125-135. – EDN ZYTWVQ.
28. Khromova TE, Osipova GB, Tsvetkov DG, et al. (2006) Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery. *Remote Sens Environ* 102(1-2): 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.019>
29. Harrison S, Kargel JS, Huggel C, et al. (2018) Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere* 12: 1195–1209. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>
30. Safarov M, Kang SC, Fazylov A, Gulayozov M, Banerjee A, Navruzshoev H, Chen P, Xue Y, Murodov M (2024b) Estimating glacier dynamics and supraglacial lakes together with associated regional hazards using high-resolution datasets in Pamir. *Journal of Mountain Science* 21(11). <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8936-x>
31. Наврузшоев Х.Д., Фазылов А.Р., Гулаёзов М.Ш., Сафаров М.С. Идентификация и каталогизация горных озер с использованием современных методов дистанционного зондирования. *Международная конференция, посвященная 30-летию Международного фонда спасения Арала (МФСА). Региональное сотрудничество в Центральной Азии: сборник статей МФСА.* г. Душанбе, Таджикистан, 2023. с. 123-130
32. Zhang M, Chen F, Tian B (2018) An automated method for glacial lake mapping in High Mountain Asia using Landsat 8 imagery. *J Mt Sci* 15(1): 13–24. [doi:10.1007/s11629-017-4518-5](https://doi.org/10.1007/s11629-017-4518-5)
33. Borah SB, Das AK, Hazarika N, et al. (2022) Monitoring and assessment of glaciers and glacial lakes: climate change impact on the Mago Chu basin, eastern Himalayas. *Reg Environ Change* 22 (124) <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01984-2>
34. Mergili M, Schneider D, Worni R, et al. (2011a) Glacial lake outburst floods in the Pamir of Tajikistan: Challenges in prediction and modelling, In: Genevois et al., *5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Padua: Università La Sapienza, Roma, Italy, November. 973-982. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-106>

35. Richardson SD, Reynolds JM (2000) An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quat Int* 65-66: 31–47. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(99\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(99)00035-X)

36. Mergili M, Schneider JF (2011b) Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11: 1447–1462. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1565-2013>

37. Safarov M, Kang SC, Murodov M, Banerjee A, Navruzshoev H, Gulayozov M, Fazylov A, Vosidov F (2024a) Quantifying glacier surging and associated lake dynamics in Amu Darya river basin using UAV and remote sensing data. *Journal of Mountain Science* 21(9). <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8538-z>

38. Li DS, Cui BL, Wang Y, et al. (2019) Glacier extent changes and possible causes in the Hala lake basin of Qinghai-Tibet Plateau. *J Mt Sci* 16: 1571-1583 (2019): <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5198-5>

39. Roy DP, Wulder MA, Loveland TR, et al. (2014) Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sens Environ* 145: 154-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>

40. Jiang ZL, Liu Sy, Peters J, et al. (2012) Analyzing Yengisogat Glacier surface velocities with ALOS PALSAR data feature tracking, Karakoram, China. *Environ Earth Sci* 67: 1033-1043. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1563-9>

41. Yan Sh, Guo H, Liu G, et al. (2013) Mountain glacier displacement estimation using a DEM-assisted offset tracking method with ALOS/PALSAR data, *Remote Sensing Letters* 4(5): 494-503. doi: 10.1080/2150704X.2012.754561

42. Banerjee A, Kang S, Guo W, et al. (2024a) Glacier retreat and lake outburst floods in the central Himalayan region from 2000 to 2022. *Nat Hazards* 120: 5485-5508. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06415-5>

43. Gautam VK, Gaurav PK, Murugan P, et al. (2015) Assessment of surface water dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and K-T transformation. *Aquat Procedia* 4: 739-746. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.095>

44. Xu J, Zhou G, Su S, et al. Cao Q, Tian Z. (2022) The Development of A Rigorous Model for Bathymetric Mapping from Multispectral Satellite-Images. *Remote Sensing*. 14(10): 2495. <https://doi.org/10.3390/rs14102495>

45. Bisset RR, Nienow PW, Goldberg DN, et al. (2023) Using thermal UAV imagery to model distributed debris thicknesses and sub-debris melt rates on debris-covered glaciers. *J Glaciol* 69(276):981-996. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.116>

46. Сафаров М.С. Фазылов А.Р. Применение современных технологий дистанционного зондирования для мониторинга селеопасных районов горных территорий / М.С. Сафаров, // ГеоРиск. –Том XIV, -2020. -№2. -С. 32-41, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-32-41> .

47. Hamdi DA, Iqbal F, Alam S, et al. (2019) Drone forensics: A case study on DJI Phantom 4, 2019 IEEE/ACS 16th International conference on computer systems and applications (AICCSA). Abu Dhabi, United Arab Emirates. 2019. 1-6. doi: 10.1109/AICCSA47632.2019.9035302.
48. Ryan JC, Hubbard AL, Box JE, et al. (2015) UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet. *The Cryosphere* 9: 1-11. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1-2015>
49. Immerzeel WW, Kraaijenbrink PD, Shea JM, et al. (2014) High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sens Environ* 150: 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.025>
50. Alidoost F, Arefi H (2017) Comparison of UAS-based photogrammetry software for 3d point cloud generation: a survey over a historical site, *Isprs Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*, IV-4/W4, 55–61. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017>
51. Che Mat N, Tahar KN (2019) Surf zone mapping using multicopter unmanned aerial vehicle imagery, *Int J Opt* 298730:13. <https://doi.org/10.1155/2019/2987301>
52. Teppati Losè L, Chiabrando F, Giulio Tonolo F (2020) Boosting the timeliness of UAV large scale mapping. Direct georeferencing approaches: Operational strategies and best practices. *ISPRS Int J Geo-Inf* 9(10): 578. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100578>
53. Benoit L, Gourdon A, Vallat R, et al. (2019) A high-resolution image time series of the Gorner glacier – Swiss Alps – derived from repeated unmanned aerial vehicle surveys. *Earth Syst Sci Data* 11: 579–588. <https://doi.org/10.5194/essd-11-579-2019>
54. Fu Y, Liu Q, Liu G, et al. (2022) Seasonal ice dynamics in the lower ablation zone of Dagongba glacier, southeastern Tibetan Plateau, from multitemporal UAV images. *J Glaciol* 68(270):636-650. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.123>
55. Groos AR, Aeschbacher R, Fischer M, et al. (2022) Accuracy of UAV photogrammetry in glacial and periglacial Alpine terrain: A comparison with airborne and terrestrial datasets. *Front Remote Sens* 3:16. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.871994>
56. Melville B, Fisher A, Lucieer A (2019) Ultra-high spatial resolution fractional vegetation cover from unmanned aerial multispectral imagery. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 78: 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.013>
57. Hendrickx H, Vivero S, De Cock L, et al. (2018) The reproducibility of SfM algorithms to produce detailed digital surface models: the example of PhotoScan applied to a high-alpine rock glacier. *Remote Sens Lett* 10(1): 11-20. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1519641>

58. Kreuzberg E., Gorelkin N (2004) The Promise for Freshwater Biodiversity Conservation in Central Asia: Focus on the Aral Sea Basin. The Conservation and Sustainable Use of Freshwater Resources in West Asia, Central Asia and North Africa, 32.

59. Zhiltsov, S.S., Zonn, I.S., Orlovsky, N.S., Semenov, A.V. (2020). Main Problems of Water Resources Use in Central Asia. In: Zonn, I., Zhiltsov, S., Kostianoy, A., Semenov, A. (eds) Water Resources Management in Central Asia. The Handbook of Environmental Chemistry, vol 105. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/698_2020_601

60. Ahmadi, J. (2024). Dynamic Geomorphology of the Amu Darya Basin in Afghanistan: A Study of Physiography, Basin Erosion, and Channel Development. *Sprink Journal of Arts, Humanities and Social Sciences*, 3(5), 48–52. <https://doi.org/10.55559/sjahss.v3i5.313>

61. Babaev, A.G. (1999). The Natural Conditions of Central Asian Deserts. In: Babaev, A.G. (eds) Desert Problems and Desertification in Central Asia. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60128-6_2

62. Агальцева Н.А., Болгов М.В., Спекторман Т.Ю., Трубецкова М.Д., Чуб В.Е. Оценка гидрологических характеристик в бассейне Амударьи в условиях изменения климата. *Метеорология и гидрология*. №10. стр. 58-69. 2011

63. Каталог ледников СССР. Том 14. Сред-няя Азия. Выпуск 3. Амударья. Часть 6. Бассейн реки Сурхоб между устьями рек Обихингоу и Муксу. -Л.: Гидрометеои-здат, 1971. - 92 с.

64. Каюмов А.К., Сафаров М.С. Инновационные методы изучения ледников // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Водные ресурсы: состояние, новые подходы и перспективы развития», посвященной 30-летию Государственной Независимости Республики Таджикистан. 22-23 октября 2021 г., Душанбе, Республика Таджикистан // Душанбе, 2021, т.1. № 3. с. 39-43.

65. Ледники Таджикистана / Министерство охраны природы Республики Таджикистан/Главное управление по гидрометеорологии и наблюдениям за природной средой, стр. 12-14, Душанбе – 2003.

66. В.И. Липский / Горная Бухара: Результаты трёхлетних путешествий в Среднюю Азию в 1896, 1897 и 1899 году / стр. 439, 484. 1902.

67. Каталог ледников СССР. Том 14. Сред-няя Азия. Выпуск 3. Амударья. Часть 9: Бассейн реки Обихингоу, Гидрометеиздат, Ленинград. 109. 1978

68. Сафаров М.С., Фазылов А.Р. Дистанционное зондирование и мониторинг селеопасных районов горных территорий Таджикистана. - Душанбе: «Промэкспо», 2023. -192 с. ISBN 987-99985-57-81-9

69. Постановление Правительства Республики Таджикистан № 348. О переименовании некоторых географических объектов территории Рес-

публики Таджикистан. От 31 июля 2023 года. (Дата обращения 11 апреля 2023 года)

70. Gulley J, Benn DI (2007) Structural control of englacial drainage systems in Himalayan debris-covered glaciers. *J Glaciol* 53(182): 399-412. <https://doi.org/10.3189/002214307783258378>

71. Miles ES, Watson CS, Brun F, et al. (2018) Glacial and geomorphic effects of a supraglacial lake drainage and outburst event, Everest region, Nepal Himalaya. *The Cryosphere* 12: 3891–3905. <https://doi.org/10.5194/tc-12-3891-2018>

72. Sakurai N, Narama C, Daiyrov M, et al. (2022) Simultaneous drainage events from supraglacial lakes on the southern Inylchek glacier, Central Asia. *J Glaciol* 68(268): 209-220. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.77>

73. Национальная стратегия Республики Таджикистан по снижению риска стихийных бедствий на 2019-2030 годы. Постановление Правительство Республики Таджикистан от 29 декабря 2018 года №602 г. Душанбе, 161 стр. URL: <https://khf.tj/sites/default/files/pdf/Natsionalnaya-Strategiya.pdf>

74. Guan H, Huang J, Li L, et al. Li X, Miao S, Su W, ... Huang H (2023) Improved Gaussian mixture model to map the flooded crops of VV and VH polarization data. *Remote Sensing of Environment*. 295: 113714. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113714>

75. Kääb A, Treichler D, Nuth C, et al. Berthier E (2015) Brief Communication: Contending estimates of 2003–2008 glacier mass balance over the Pamir–Karakoram–Himalaya. *The Cryosphere* 9: 557-564. <https://doi.org/10.5194/tc-9-557-2015>

76. Finaev AF, Shiyin L, Weijia B, et al. (2016) Climate change and water potential of the Pamir mountains. *Geogr Environ Sustain* 9(3): 88-105. https://doi.org/10.15356/2071-9388_03v09_2016_06

77. Восидов Ф.К., Курбонов Н.Б., Митусов А.В., Халимов А.М. Дистанционный мониторинг подвижка ледника русского географического общества в условиях изменения климата. Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы VIII Международной научной конференции; электронное научное издание, Красноярск, 14–17 сентября 2021 года / Науч. редактор Е.А. Ваганов, отв. ред. Г.М. Цибульский. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. – С. 155-161. – EDN JCCLNL.

78. Погода и климат (2024) Справочно-информационный портал. Гидрометеорологическая станция Горбунова. Электронный источник данных: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 15 октября 2023 г.)

79. Забиров Р.Д. (1955). Оледенение Памира. М., Географгиз, 372 с.

80. Котляков В.М., Носенко Г.Г., Осипова Г.Б. и др. (2008). Космический мониторинг подвижки ледника географического общества на памире. Материалы гляциологических исследований 105: 145-148. –EDN KYOBLT

81. Коновалов В.Г., Рудаков В.А. Возможности использования данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга ледников и гляциологических расчётов. *Лёд и Снег*. 2015;55(1):15-27. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-1-15-27>
82. Котляков В. М, Чернова Л. П., Муравьев А. Я., Хромова Т. Е. Динамика пульсирующих ледников бассейна реки Сугран на Памире. //Доклады академии наук. 2019. Т. 489, № 3, С. 307–312
83. Котляков в.м., Десинов Л.В.1, Десинов С.Л.1, Рудаков В.А. Подвижки ледников Памира в первые 20 лет XXI века. //Доклады российской академии наук. Науки о земле. 2020. Т. 495. № 1 С. 64-68
84. Adiri Z., el Harti A., et al. (2017). Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. *Adv. Space Res.*, 60, 2355–2367.
85. Qari M. H. T. (2011). Utilizing Image Processing Techniques in Lithologic Discrimination of Buwatah Area, Western Arabian Shield, *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 4, 13-24. doi:10.1007/s12517- 009-0049-x.
86. Aminov J., Xi C., et al. (2019). Comparison of multi-resolution optical Landsat-8, Sentinel-2 and radar Sentinel-1 data for automatic lineament extraction: A case study of Alichur area, S-E Pamir. *Remote Sensing*. 11, 778. 1.
87. Mostafa M. E., Qari M.Y.H. (1995). An exact technique of counting lineaments. *Eng. Geol.*, 39, 5–15.
88. Evans IS (2006) Glacier distribution in the Alps: statistical modeling of altitude and aspect. *Geogr Ann Ser A-Phys Geogr Geo-grafiska Annaler: Series A, Physical Geography* 88(2): 115-133. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2006.00289.x>
89. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. (1982) Пульсирующие ледники. Гидрометеиздат, Ленинград, 192 с.
90. Mayer C, Fowler A, Lambrecht A, et al. (2011) A surge of North Gasherbrum Glacier, Karakoram, China. *Journal of Glaciology*, 57(205): 904-916. doi:10.3189/002214311798043834
91. Kotlyakov, V.M., Osipova, G.B., & Tsvetkov, D.G. (1997). Fluctuations of unstable mountain glaciers: scale and character. *Annals of Glaciology*, 24, 338 - 343.
92. Mukherjee K, Bolch T, Goerlich F, et al. (2017) Surge-Type Glaciers in the Tien Shan (Central Asia). *Arct Antarct Alp Res*Arctic, Antarctic, and Alpine Research 49(1): 147-171. <https://doi.org/10.1657/AAAR0016-021>
93. Steiner JF, Kraaijenbrink PDA, Jiduc SG, et al. (2018) Brief communication: The Khurdopin glacier surge revisited – extreme flow velocities and formation of a dammed lake in 2017. *The Cryosphere* 12: 95-101. <https://doi.org/10.5194/tc-12-95-2018>

94. Bhambri R, Hewitt K, Kawishwar P, et al. (2017) Surge-type and surge-modified glaciers in the Karakoram. *Sci. Rep* 7: 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15473-8>
95. Miles KE, Hubbard B, Irvine-Fynn TD, et al. Miles ES, Quincey DJ, Rowan AV (2020) Hydrology of debris-covered glaciers in High Mountain Asia. *Earth-Science Reviews*, 207,: 103212. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103212>
96. Bazai NA, Cui P, Carling PA, et al. (2021) Increasing glacial lake outburst flood hazard in response to surge glaciers in the Karakoram. *Earth-Sci RevEarth-Science Reviews* 212: 103432. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103432>
97. Verpoorter C, Kutser T, Tranvik L (2012) Automated mapping of water bodies using Landsat multispectral data, *Limnol. Oceanogr. Methods*, 10: 1037-1050. <https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.1037>
98. Kääb, A., Reynolds, J.M., Haeberli, W. (2005). Glacier and Permafrost Hazards in High Mountains. In: Huber, U.M., et al. Bugmann, H.K.M., Reasoner, M.A. (eds.), *Global Change and Mountain Regions. Advances in Global Change Research*, vol 23. Springer, Dordrecht. pp 225-234. https://doi.org/10.1007/1-4020-3508-X_23
99. Paul F, Kääb A, Maisch M, et al. (2004) Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophys Res Lett* 31(21): L21402 <https://doi.org/10.1029/2004GL020816>
100. Fujita K, Nuimura T (2011) Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers. *P Natl Acad Sci* 108(34): 14011-14014. <https://doi.org/10.1073/pnas.1106242108>
101. Zheng G, Allen SK, Bao A, et al. (2021) Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation. *Nat Clim Chang* 11(5): 411-417. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01028-3>
102. Viani C, Colombo N, Bollati IM, et al. (2022) Socio-environmental value of glacier lakes: assessment in the Aosta Valley (Western Italian Alps). *Reg Environ Change* 22(7). <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01860-5>
103. Dykes RC, Brook MS, Robertson CM, et al. (2011) Twenty-first century calving retreat of Tasman glacier, Southern Alps, New Zealand. *Arct Antarct Alp Res* 43(1): 1-10. <http://dx.doi.org/10.1657/1938-4246-43.1.1>
104. Westoby MJ, Rounce DR, Shaw TE, et al. (2020) Geomorphological evolution of a debris-covered glacier surface. *Earth Surf Process Landf* 45: 3431-3448. <https://doi.org/10.1002/esp.4973>
105. Strickland RM, Covington MD, Gulley JD, et al. (2023) Englacial drainage drives positive feedback depression growth on the debris-covered Ngozumpa glacier, Nepal. *Geophys Res Lett* 50(16). <https://doi.org/10.1029/2023GL104389>
106. Benn DI, Bolch T, Hands K, et al. (2012) Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implica-

tions for outburst flood hazards. *Earth-Sci Rev* 114(1-2): 156-174. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.03.008>

107. Rounce DR, Watson CS, McKinney DC (2017) Identification of hazard and risk for glacial lakes in the Nepal Himalaya using satellite imagery from 2000–2015. *Remote Sens* 9(7): 654. <https://doi.org/10.3390/rs9070654>

108. Leprince S, Ayoub F, Klinger Y, et al. (2007) Co-registration of optically sensed images and correlation (COSI-Corr): an operational methodology for ground deformation measurements. *IEEE International geoscience and remote sensing symposium, Barcelona, Spain. 1943-1946.* doi: 10.1109/IGARSS.2007.4423207.

109. Scherler D, Leprince S, Strecker MR (2008) Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery—Accuracy improvement and quality assessment. *Remote Sens Environ* 112(10): 3806-3819. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.05.018>

110. Das S, Sharma MC (2021) Glacier surface velocities in the Jankar Chhu watershed, western Himalaya, India: Study using Landsat time series data (1992–2020). *Remote Sens Appl: Soc Environ* 24: 100615. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100615>

111. Rana AS, Kunmar P, Mehta M, et al. (2023) Glacier retreat, dynamics and bed overdeepenings of Parkachik glacier, Ladakh Himalaya, India. *Ann Glaciol* 1–14. <https://doi.org/10.1017/aog.2023.50>

112. Юдина (Куровская) В. А., Черноморец С. С., Виноградова Т. А., Крыленко И. Н. Моделирование селевых потоков снегового генезиса (на примере реки Барсемдара, Таджикистан) // *Криосфера Земли*. – 2022. – Т. 26, № 3. – С. 51–63.

113. Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. и др. Барсемская селевая катастрофа на Памире в 2015 году и ее аналоги на Центральном Кавказе // *Геориск*, 2019, т. XIII, № 1, с. 26–36.

114. Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Бобов Р. и др. Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан) // *Междунар. науч. конф. Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии (Санкт-Петербург, 18–22 нояб. 2015 г): сб. докл. СПб., С.-Петерб. гос. ун-т, 2015, с. 261–264.*

115. Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х. и др. Каменные глетчеры – очаги формирования катастрофических селей // *Геориск*, 2020, т. 14, № 2, с. 52–65

116. Komatsu T, Watanabe T (2014) Glacier-related hazards and their assessment in the Tajik Pamir: A Short Review. *Geogr Stud* 88(2): 117-131. <https://doi.org/10.7886/hgs.88.117>

117. Scaini C, Tamaro A, Adilkhan B, et al. (2024a) A new regionally consistent exposure database for Central Asia: population and residential build-

ings. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 24: 929–945. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-929-2024>

118. Scaini C, Tamaro A, Adilkhan B, et al. (2024b) A regional-scale approach to assessing non-residential building, transportation and cropland exposure in Central Asia. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 24: 355–373. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-355-2024>

119. Cenderelli DA, Wohl EE (2003) Flow hydraulics and geomorphic effects of glacial-lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Earth Surf Process Landf* 28(4):385–407. <https://doi.org/10.1002/esp.448>

120. Bajracharya B, Shrestha AB, Rajbhandari L (2007) Glacial lake outburst floods in the Sagarmatha region. *Mt Res Dev* 27(4): 336–344. <https://doi.org/10.1659/mrd.0783>

121. Zhang G, Yao T, Xie H, et al. (2015) An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. *Global and Planetary Change* 131: 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.05.013>

122. Zhou Y, Li Z, Li J, et al. (2018) Glacier mass balance in the Qinghai–Tibet Plateau and its surroundings from the mid-1970s to 2000 based on Hexagon KH-9 and SRTM DEMs. *Remote Sensing of Environment* 210: 96–112. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.020>

123. Bolch T, Kulkarni A, Kääb A, et al. (2012) The State and Fate of Himalayan Glaciers. *Science* 336: 310–314. <https://doi.org/10.1126/science.1215828>

124. Bolch T, Shea JM, Liu S, et al. (2019) Status and change of the cryosphere in the extended Hindu Kush Himalaya region. In: Wester P et al. (eds.), *The Hindu Kush Himalaya assessment: Mountains, climate change, sustainability and people*. Wester P, Mishra A, Mukherji A, Shrestha A. Springer, Cham. pp 209–255. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92288-1_7

125. Atefi MR, Miura H (2022) Detection of flash flood inundated areas using relative difference in NDVI from Sentinel-2 Images: A case study of the august 2020 event in Charikar, Afghanistan. *Remote Sens* 14: 3647. <https://doi.org/10.3390/rs14153647>

126. Otto JC (2019) Proglacial lakes in high mountain environments. In: Heckmann T, Morche D, (eds) *Geomorphology of proglacial systems. Geography of the physical environment*. Springer, Cham 231–247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94184-4_14

127. Chen, G., Zhang, K., Wang, S., Xia, Y., & Chao, L. et al. (2023). iHydroSlide3D v1.0: an advanced hydrological–geotechnical model for hydrological simulation and three-dimensional landslide prediction. *Geosci. Model Dev.*, 16(10), 2915–2937. doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-16-2915-2023>

128. Kirkbride MP, Warren CR (1999) Tasman glacier, New Zealand: 20th-century thinning and predicted calving retreat. *Glob Planet Change* 22(1–4): 11–28. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00021-1)

129. Röhl K (2008) Characteristics and evolution of supraglacial ponds on debris-covered Tasman glacier, New Zealand. *J Glaciol* 54(188): 867-880. <https://doi.org/10.3189/002214308787779861>

130. Pecoraro G, Calvello M Piciullo L (2019) Monitoring strategies for local landslide early warning systems. *Landslides*. 16: 213-231. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1068-z>

131. Фазылов А.Р., Наврузшоев Х.Д., Сафаров М.С., Гулаёзов М.Ш. Превентивные меры снижения риска прорыва приледниковых озёр. Сборник материалов Международной научной конференции «Сохранение ледников и эффективное использование водных ресурсов Центральной Азии», посвященной «2025–международному году сохранения ледников». Дониш. Стр. 83-90. 2024

132. Медеу А. Р. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Основы управления. – Алматы, 2011. Т. 1. – 284 с.

133. S. Park, C. Choi, B. Kim, and J. Kim, “Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 68, pp. 1443–1464, 2013.

134. Волосухин В.А., Анахаев К.Н., Пономарев А.А. Инженерная защита территории олимпийских объектов от селевых потоков / В. А. Волосухин, // Гидротехника. – 2011. – № 3. – С. 76-79. – EDN UJKIKH.

135. Волосухин В.А., Титоренко А.И. Селевые процессы в бассейне реки Мзымта (Западный Кавказ) // ГеоРиск. – 2012. – № 4. – С. 38-43. – EDN PSZPVF.

136. Титоренко, А.И. Применение и методы расчёта гибких противоселевых сооружений / А.И. Титоренко // Вестник Волгоградского гос. архит.-строит. ун-та. Стр-во и архит. – 2012. – Вып. 26 (45). – С. 5–12

137. Пирмамадов У. Селевые потоки вызванные прорывом гляциальных высокогорных озёр на территории Таджикистана. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Тр. Второй конференции, посвященной 100-летию С.М. Флейшмана. 2012, с. 72-73.

138. Зарипов Р.Г., Имомназаров Ф.С., Тагойбеков А.С. Оценка селевых потоков бассейна реки Шураки Капали (левый приток реки Сурхоб, Таджикистан) и разработка мер по снижению риска. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита Труды 6-й конференции (Таджикистан), 2020, с. 342-350.

139. Пирмамадов, У.Р., Бобов Р.А., Раимбеков Ю.Х., Мародасейнов Ф.О., Зикиллобеков И.И., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Кидяева В.М., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Висхаджиева К.С. Риск и последствия прорывов высокогорных озёр Таджикистана. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Чер-

номорец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», - 2020, -С. 1–24.

140. Орловский Н.С., Зонн И.С., Костяной А.Г., Жильцов С.С. Изменение климата и водные ресурсы Центральной Азии // Вестник Дипломатической академии МИД России. Россия и мир. – 2019. – № 1(19). – С. 56-78. – EDN WOTGJC.

141. Наврузшоев, Х. Д. Дистанционный мониторинг прорывоопасных ледниковых озёр бассейна реки Гунт (Таджикистан) / Х.Д. Наврузшоев, А. Р. Фазылов // Вестник Хорогского университета. Естественные науки – 2021. – № 3(19). – С. 129-138.

142. Саидов М.С. Риски стихийных бедствий связанные с дегляциацией (Памир) / А.Р. Фазылов, С.М. Саидов// Материалы Международной научной конференции, посвященной 15-летию со дня образования ЦАИИЗ/ Дистанционные и наземные исследования Земли.– Бишкек,- Б.: МоЮР, - 2019. – 268с. -С. 214-218.

143. Хромова Т.Е., Тюфлин А.С., Качалин А.Б. и др. Уникальные циклические пульсации ледника Медвежий // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 483, № 5. – С. 543-548. – DOI 10.31857/S086956520003306-9. – EDN VQYIPK.

144. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2013. -592с.

145. Быков В.Л., Быков Л.В., Новородская М.В., Пушак О.Н., Шерстнева С.И. Применение данных дистанционного зондирования для информационного обеспечения системы точного земледелия // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2016. – №1(21). – С. 146–153.

146. Сафаров М.С., Фазылов А.Р., Гулаёзов М.Ш., Наврузшоев Х.Д., Мамаджанов Ю.М. Мониторинг и анализ современного состояния природных опасностей в Таджикистане: интеграция БПЛА и данных дистанционного зондирования // Научно-практический журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии национальной академии наук Таджикистана. Том 4, №1., 2024в. С. 151-166.

147. 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: «Ирфон», 2013. – 150 с.

148. Сафаров М.Т., Каюмов А.К. Влияние неблагоприятных, опасных и стихийных гидрометеорологических явлений на основные отрасли экономики в условиях изменения климата: Руководящий документ.- Душанбе, 2013. - 52 с.

149. Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Кидяева В.М., Рудой А.Н., Висхаджиева К.С., Аршинова М.А., Куровская В.А. Батиметрическая съемка озёр Куленкуль (Дузахдара), Варшезкуль, Патхур (Чапдара), Джизев, Хавраздара и моделирование возможных прорывов. Отчет. М.: Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2018. 278 с.

150. Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Кидяева В.М., Лукашов А.А., Висхаджиева К.С., Аршинова М.А., Куровская В.А. Батиметрическая съемка озёр Кофарендара, Пиш, Чарсемдара, Шитхарв и Чапдара и моделирование возможных прорывов. Отчёт. М.: Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2019. 265 с.

151. Шафиев Г.В. Природные угрозы, связанные с прорывоопасными озерами Горного Бадахшана в бассейне реки Шахдара (Таджикистан) // Геориск. 2014. № 1. С. 40–45.

152. Наврузшоев Х.Д., Фазылов А.Р. Дистанционный мониторинг прорывоопасных ледниковых озёр бассейна реки Гунт (Таджикистан). Наука и инновация. Серия геологических и технических наук 2022. №1 с. 41-49

153. Мирзохонова, С.О. (2021). Влияние изменения климата на гидрологический режим бассейна реки Пяндж. (автореф. дисс. ... канд. техн. наук). Дата обращения: 3.09.2019. https://www.imoge.tj/kitobho/Monographiya_Mirzokhonova-S.O..pdf

154. Zhang Q, Kang S, Chen F (2014) Glacier variations in the Fedchenko basin, Tajikistan, 1992–2006: insights from remote-sensing images. Mt Res Dev 34(1): 56-65. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00074.1>

155. Дюргеров м Б. Ледниковый стоки гляциальные стихийно-разрушительные процессы// Инженерная география горных стран. Москва: Изд-во МГУ, 1984. – С.134–159.

156. Забиров Р. Д. Оледенение Памира. Москва: Географгиз, 1955.-372 с.

157. Metrak M, Sulwinski M, Chachulski L, et al. (2015) Creeping Environmental Problems in the Pamir Moun-tains: Landscape Conditions, Climate Change, Wise Use and Threats. In Öztürk M, Hakeem K, Faridah-Hanum I, Efe R (eds) Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12859-7_28

158. Одинаев К.Н. (2023). Гидрометеорологические характеристики бассейна реки Пяндж в условиях изменения климата (автореф. дисс. ... канд. техн. наук). Дата обращения: 3.09.2024. https://phti.tj/wp-content/uploads/2023/10/Diss_Oдинаев.pdf

159. Курбоншо, Ё.К. Климатические особенности Памира / Курбоншо Ё.К., Краудцун Т.М., Мухаббатов Х.М. // Известия АН Республики Таджикистан.-2014. -№3.- С.121-133.

160. Рахимов С.А. (2021). Экологическое состояние ледников ООПТ РТ и меры по их сохранению и защите. Вестник педагогического университета (Естественных наук), 3-4 (11-12), 89-91.

161. Мусоев З., Хакимов С. Современное оледенение и роль ледников в формировании стока рек Таджикистана// Таджикистан и современный мир, № 3 (7) Душанбе, 2005, - С. 50-52.
162. Рахимов С. Н. Влияние изменения климата на водные ресурсы Центральной Азии//Сб. докл. Междунар. конфер. по сокращению бедствий, связанных с водой в Центральной Азии. Душанбе, 2008. - С.66-78.
163. Котляков В.М., Десинов Л.В., Рудаков В.А. Подвижка ледника Бивачного в 2012–2015 гг. Лёд и Снег. 2015;55(2):133-140. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-2-133-140>
164. Каталог ледников СССР. Т.14. Средняя Азия. Выпуск 3. Амударья. Часть 8А. Бассейн р. Муксу (А - система ледника Федченко). Гидрометеиздат, 1980.
165. Базаров Д.Р., Норкулов Б.Э., Жумабаева Г.У., Артикбаева Ф.К., Пулатов С.М. Особенности гидрологических характеристик среднего течения реки Амударья. Аграрная наука. 2019; (6): 30–32. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-329-6-30-3>
166. Муминов А.О. (2020). Геоэкологическая оценка загрязненности поверхностных вод бассейна реки Вахш и влияние водохранилищ на климатические условия прибрежных районов . (автореф. дисс. ... канд. техн. наук). Дата обращения: 3.09.2021. <https://rshu.ru/university/dissertations/files/245>
167. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2013. -592с.
168. Воробьева А.А. Дистанционное зондирование земли-Санкт-Петербург 2012 г.
169. Хабаров Д.А., Адиев Т.С., Попова О.О., Чугунов В.А., Кожевников В.А., 2019. Анализ современных технологий дистанционного зондирования Земли. Московский экономический журнал, № 1, с. 181–190, <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2019-11068>
170. Сафаров, Н.И. Цифровая обработка аэрокосмических снимков местности земной поверхности / Н.И. Сафаров, Т.С. Сибгатуллин, А.И. Гиниятуллин // Наука в XXI веке: инновационный потенциал развития : Сборник статей по материалам II международной научно-практической конференции, Уфа, 07 апреля 2020 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2020. – С. 42-48. – EDN CZZGOD.



Сафаров Мустафо Сулаймонович

Доктор философии (PhD), прошёл постдокторскую подготовку в Северо-Западном институте экологии и ресурсов Китайской академии наук.

В настоящее время занимает должность специального научного ассистента в Синьцзянском институте экологии и географии Китайской академии наук.

Также выполняет функции инженера по беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) в Научно-исследовательском центре экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе).

Научные интересы охватывают дистанционное зондирование Земли, мониторинг ледников и ледниковых озёр с использованием спутниковых и беспилотных (БПЛА) технологий, анализ динамики криосферы, оценку природных рисков (включая прорывы ледниковых озёр и селевые процессы), а также управление водными ресурсами в условиях современного изменения климата. Особое внимание уделяется Памиру и Центральной Азии.

Safarov Mustafo Sulaimonovich

Doctor of Philosophy (PhD), he completed his postdoctoral research at the Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences.

He currently serves as a Special Research Assistant at the Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences.

He also performs the functions of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Engineer at the Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe).

His research interests include remote sensing, satellite and UAV-based monitoring of glaciers and glacial lakes, analysis of cryospheric dynamics, natural hazard assessment (including glacial lake outburst floods and debris flows), as well as water resource management under contemporary climate change. Special attention is given to the Pamir Mountains and Central Asia.



Фазылов Али Рахматджанович

Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Гидротехнические сооружения» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана.

Сфера научных интересов: водные ресурсы, управление и рациональное использование водных ресурсов, гидротехнические сооружения, безопасность гидротехнических сооружений, гидрология, гидроэкологическая безопасность, исследования опасных природных явлений (сели, наводнения и т.д., в том числе гляциологические риски).

Член Научно-технического совета Министерства энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан, Национальной комиссии по ирригации и дренажу Республики Таджикистан, экспертного совета Высшей аттестационной комиссии при Президенте Республики Таджикистан, Международной селевой ассоциации, а также редакционного совета журнала «Вестник Донского ГАУ» Федерального Государственного Бюджетного Образовательного Учреждения «Донской Государственный Аграрный Университет» и научного журнала «Водные ресурсы, энергетика и экология», Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана. Национальный эксперт по вопросам безопасности гидротехнических сооружений.

Автор многочисленных научных публикаций и обладатель ряда патентов на изобретения.

Fazylov Ali Rakhmatzhanovich

Doctor of Technical Sciences, Professor. Head of the Laboratory “Hydraulic Structures” of the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan.

Scientific interests: water resources, management and rational use of water resources, hydraulic structures, safety of hydraulic structures, hydrology, hydroecological safety, research of dangerous natural phenomena (mudflows, floods, etc., including glaciological risks).

Member of the Scientific and Technical Council of the Ministry of Energy and Water Resources of the Republic of Tajikistan, the National Commission on Irrigation and Drainage of the Republic of Tajikistan, the Expert Council of the Higher Attestation Commission under the President of the Republic of Tajikistan, the International Mudflow Association, as well as the editorial board of the journal “Bulletin of Don State Agrarian University” of the Federal State Budgetary Educational Institution “Don State Agrarian University” and the scientific journal “Water Resources, Energy and Ecology”, the Institute of Water Resources of the Republic of Tajikistan. National Expert on Hydraulic Structures Safety.



Кан Шичанг

Профессор, генеральный директор Института горных опасностей и окружающей среды, Китайская академия наук.

Лауреат Национального фонда выдающихся молодых учёных Китая, участник Национальной программы ведущих талантов, член Китайского географического общества. Также удостоен звания «Выдающийся сотрудник» Китайской академии наук.

Основные научные направления включают исследования изменения климата и криосферы, реконструкцию палеоклиматических и природных условий по ледниковым кернам, а также взаимодействие атмосферных загрязнителей с компонентами криосферы. Является главным редактором журнала *Journal of Glaciology and Geocryology*.

Выступал в качестве руководителя (PI) или соруководителя (Co-PI) более чем в 40 научных проектах, а также участвовал и руководил более чем 40 научными экспедициями в высокогорных районах Тибетского нагорья, включая Mount Everest, а также в Антарктике и Арктике.

В настоящее время занимает должности председателя Китайского комитета IUGG/IACS и председателя Китайской ассоциации научных экспедиций.

Kang Shichang

Professor, Director General of the Institute of Mountain Hazards and Environment (IMHE), Chinese Academy of Sciences (CAS).

Recipient of the National Science Fund for Distinguished Young Scholars, member of the National Leading Talent Program, fellow of the Chinese Geographical Society, and honored as an “Outstanding Worker” by the Chinese Academy of Sciences.

His main research areas include climate and cryosphere change, paleoclimate and environmental records from ice cores, and interactions between atmospheric pollutants and the cryosphere. He is Editor-in-Chief of the *Journal of Glaciology and Geocryology*. He has been a PI or co-PI on more than 40 projects and has organized more than 40 field expeditions to the extreme high elevations of the Tibetan Plateau, including Mt. Everest, as well as to Antarctica and the Arctic.

Currently serves as Chair of the IUGG/IACS China Committee and Chair of the China Scientific Expedition Association.



Гулаёзов Маджид Шоназарович

Кандидат географических наук.

Содиректор Научно-исследовательского центра по экологии и окружающей среде Центральной Азии (г. Душанбе).

Также является специальным научным ассистентом в Синьцзянском институте экологии и географии Китайской академии наук. Имеет большой опыт в области гидрологии, гляциологии и исследований изменения климата. Основные области специализации включают географический и гидрологический анализ бассейнов горных рек, мониторинг природных опасностей и устойчивое управление водными ресурсами в Центральной Азии.

Активно участвует в международных и национальных научных инициативах, связанных с мониторингом ледников, оценкой состояния окружающей среды и влиянием изменения климата на водные системы. Является автором и соавтором многочисленных научных статей, отчетов и монографий. Также вносит ключевой вклад в разработку методов морфометрического и гидрологического анализа на основе ГИС и занимается изучением природных опасностей, возникающих после сейсмических событий, включая формирование вызванных землетрясениями оползневых плотин в горных районах и оценку связанных с ними рисков.

Majid Shonazarovich Gulayozov

Candidate of Geographical Sciences.

Co-Director of Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe).

He is also a special research assistant at the Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences. He has extensive experience in hydrology, glaciology, and climate change research. His main areas of expertise include the geographical and hydrological analysis of mountain river basins, natural hazard monitoring, and sustainable water resource management in Central Asia.

Dr. Gulayozov is actively involved in international and national scientific initiatives related to glacier monitoring, environmental assessment, and the impacts of climate change on water systems. He is the author and co-author of numerous scientific articles, reports, and monographs. He is also a key contributor to the development of GIS-based methods for morphometric and hydrological analysis. He is also engaged in the study of natural hazards following seismic events, including the formation of earthquake-induced landslide dams in mountainous areas and the assessment of their associated risks.



Ли Цзюньли

Доктор философии (PhD). Профессор
Старший научный сотрудник Синьцзянского института экологии и географии (XIEG), Китайская академия наук.

Цзюньли Ли получил степень бакалавра в области географических информационных наук и степень доктора философии в области фотограмметрии и дистанционного зондирования в Уханьском университете, Ухань, Китай, в 2002 и 2007 годах соответственно. В настоящее время он также работает над мониторингом и оценкой экологической безопасности с помощью дистанционного зондирования в контексте изменения климата и деятельности человека. Его исследовательские интересы включают извлечение интеллектуальной информации с помощью дистанционного зондирования, оценку использования водных ресурсов и экологический мониторинг окружающей среды в засушливых регионах.

Li Junli

Doctor of Philosophy (PhD). Professor

Senior researcher with the Xinjiang Institute of Ecology and Geography (XIEG), Chinese Academy of Science.

Junli Li received the B.Eng. degree in geographic information science and the Ph.D. degree in photogrammetry and remote sensing from Wuhan University, Wuhan, China, in 2002 and 2007, respectively. He is currently also working on remotely sensed ecological security monitoring and assessment in the context of climate change and human activities. His research interests include remotely sensed intelligent information extraction, evaluation of water resource utilization and ecological environmental monitoring in arid regions.



Шерализода Назриало Шерали

Кандидат геолого-минералогических наук.

Директор Государственного научного учреждения
«Центр изучения ледников Национальной академии
наук Таджикистана»

Специалист в области инженерной геологии, мерз-
лотоведения, гляциологии, грунтоведения, экологии,

Основная область научных интересов: инженерно-
геологическое районирование, исследование совре-
менных геодинамических процессов, оценка рисков природных ката-
строф, а также гляциология и мерзлотоведение.

Участвовал в разработке нормативных и методологических докумен-
тов в сфере охраны водных ресурсов, адаптации к изменениям климата,
оценки воздействия на окружающую среду, а также в области гидроме-
теорологии. Возглавлял и принимал непосредственное участие в полевых
экспедициях по исследованию ледников бассейнов рек Ванч, Зарафшан и
Сарезского озера, а также в реализации международных научных проек-
тов, связанных с мониторингом геодинамических рисков и прогнозировани-
ем природных катастроф, в том числе, связанные с ледниками.

Sheralizoda Nazrialo Sherali

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences.

Director of the State Scientific Institution “Centre for Glacier Research of
the National Academy of Sciences of Tajikistan”.

Specialist in engineering geology, permafrost, glaciology, soil science,
ecology,

Main area of scientific interests: engineering geological zoning, study of
modern geodynamic processes, assessment of natural disaster risks, as well as
glaciology and permafrost.

Participated in the development of normative and methodological docu-
ments in the field of water resources protection, adaptation to climate change,
environmental impact assessment, as well as in the field of hydrometeorology.
He led and directly participated in field expeditions to study glaciers of the
Vanch, Zarafshan and Sarez Lake basins, as well as in the implementation of
international scientific projects related to monitoring of geodynamic risks and
forecasting of natural disasters, including those related to glaciers.



Наврузшоев Хофиз Довутшоевич

Кандидат технических наук.

Научный сотрудник Института исследований горных сообществ Университета Центральной Азии.

Старший научный сотрудник Государственного научного учреждения «Центр изучения ледников Национальной Академии наук Таджикистана»

Специалист в области криосферных наук, изучения изменения климата, многолетней мерзлоты, природных рисков и управления водными ресурсами. Обладает практическим опытом участия в гляциологических полевых экспедициях на ледниках Таджикистана, Казахстана и Швейцарии. Участвовал в реализации международных научно-исследовательских проектов, связанных с многолетним мониторингом масс-баланса ледников, использованием данных дистанционного зондирования и внедрением беспилотных летательных систем (БПЛА) для комплексной оценки и картографирования природных угроз в условиях высокогорных экосистем Таджикистана.

Navruzshoev Hofiz Dovutshoevich

Candidate of Technical Sciences.

Research Fellow at the Mountain Societies Research Institute, University of Central Asia.

Senior Researcher at the State Scientific Institution “Centre for Glacier Research of the National Academy of Sciences of Tajikistan”.

A specialist in cryospheric sciences, climate change research, permafrost studies, natural hazards, and water resource management. Possesses hands-on experience in glaciological field expeditions on glaciers in Tajikistan, Kazakhstan, and Switzerland. Has been involved in the implementation of international scientific research projects focused on long-term glacier mass balance monitoring, the application of remote sensing technologies, and the deployment of unmanned aerial systems (UAS) for the integrated assessment and mapping of natural hazards in the high-mountain environments of Tajikistan.

Мустафо Сафаров, Али Фазылов, Шичанг Канг,
Маджид Гулаёзов, Цзюньли Ли,
Назриало Шерализода, Хофиз Наврузшоев

ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

(Ледники и ледниковые озера Таджикистана)

Mustafo Safarov, Ali Fazylov, Shichang Kang,
Majid Gulayozov, Junli Li,
Nazrialo Sheralizoda, Hofiz Navruzshoev

GLACIOLOGICAL RISKS

(Glaciers and glacial lakes of Tajikistan)

Разрешено к печати 8.05.2026.
Подписано в печать 11.05.2026. Формат 70х100 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Гарнитура Times New Roman Tj.
Усл. печ. л. 9,25. Тираж 100 экз. Заказ 2.

ООО “Садои Калб”, г. Душанбе, ул. Айни 267