

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
Государственное научное учреждение «Центр изучения ледников»

УДК 556.51+551.324 (575.32)

На правах рукописи



Курбониён Хусрав Курбонджон

**ДИНАМИКА БАЛАНСА МАССЫ ЛЕДНИКОВ В
СОВРЕМЕННЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ
НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА ОЗЕРА ХОВАРКУЛЬ (КАРАКУЛЬ)
ВОСТОЧНОГО ПАМИРА**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук по
специальности 2.1. Геология, геодезия, гидрология, строительство,
архитектура (2.1.37. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия)

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Амирзода Ориф Хамид

Душанбе – 2026

Оглавление

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
Введение.....	7
ГЛАВА 1. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ПРИРОДНО- КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОСТОЧНОГО ПАМИРА И ИХ ВКЛАД В ГИДРОЛОГИЮ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ.....	14
1.1. Особенности формирования водных ресурсов в Таджикистане.....	20
1.2. Климатические пояса и природно-климатические условия в Центральной Азии и Таджикистана.....	25
1.3. Современное состояние оледенения Памира.....	29
1.4. Природно-климатические условия и их влияние на динамику горных ледников	34
1.5. Современные методы наземного изучения и дистанционного зондирования горных ледников.....	43
1.6. Обоснование выбора объекта исследований.....	50
Выводы по первой главе.....	51
ГЛАВА 2. ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА.....	52
2.1. Современные технологии и технические средства исследования ледников.....	52
2.2. Гляциологические исследования: выбор направления изучения ледников.....	55
2.3. Методы математического моделирования для расчёта баланса массы ледников.....	61
2.3.1. Гляциологическое моделирование баланса массы ледников с использованием модели SMB.....	63

Выводы по второй главе.....	77
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ КАМЕРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РАСЧЁТА ДИНАМИКИ ЛЕДНИКОВ.....	79
3.1. Исследования современного состояния оледенения бассейна озера Ховаркуль.....	79
3.2. Разработка карты поверхности ледников Октябрьский и Уйсу бассейна озера Ховаркуль.....	90
3.3. Гляциологические исследования и оценка динамики оледенения бассейна реки Сарыгун дистанционным методом.....	94
3.4. Первичные результаты измерения баланса массы ледника №139.....	98
3.5. Многолетний баланс массы ледника №139.....	102
3.6. Моделирование и визуализация результатов расчёта годового баланса ледника №139.....	105
3.6.1. Оценка и визуализация результатов динамики годового баланса ледника №139.....	106
Выводы по третьей главе.....	108
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДНИКОВ БАССЕЙНА ОЗЕРА ХОВАРКУЛЬ.....	109
4.1. Динамические характеристики ледников по результатам дистанционного зондирования.....	109
4.1.1. Динамики зеркальной площади озеро Ховаркуль с 1972 по 2021 гг.....	111
4.1.2. Современное состояние малых ледников бассейна озера Ховаркуль: исследования и оценка.....	113
4.2. Баланс массы ледника.....	116
4.3. Моделирование условий изменения баланса масс ледников по отметкам вертикальных перепадов высот.....	118
Выводы по четвёртой главе.....	124

ВЫВОДЫ.....	125
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	151

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГПП	Гидрографическая партия
ГИС	Геоинформационная система
ГНУ	Государственное научное учреждение
мм в.э.	Миллиметр в водном эквиваленте
ДЗЗ	Дистанционное зондирование Земли
НАНТ	Национальная академия наук Таджикистана
НПК	Научно-практическая конференция
СССР	Союз Советских Социалистических Республик
ЦМР	Цифровые Модели Рельефа
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
DEM	Digital Elevation Model
DHM	Digital Height Model
ELA	Equilibrium line altitude
EPSG	European Petroleum survey group
ETM	Enhanced Thematic Mapper
GCM	Global Climate Model
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
MSS	Multispectral Scanner
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDSI	Normalized Difference Snow Index
NIR	Near InfraRed
OLI	Operational Land Imager
QGIS	Quantum Geographic Information System
RCP	Representative Concentration Pathways
RMS	Root Mean Square
SMB	Simulation Mass Balance
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

SSP	Shared Socioeconomic Pathways
SWIR	Short Wave Infrared
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
UTM	Universal Transverse Mercator

Введение

Актуальность темы (предмета) исследования: Изучение состояния оледенения в современных климатических изменениях является одним из основных задач в области гидрологии и гляциологии. Климатические изменения негативно влияют на уязвимые географические объекты, в том числе на ледники и водные ресурсы Таджикистана. Баланс массы горных ледников является одним из основных индикаторов климатических изменений от которого зависит речной сток региона в летнее время. Исследования местных и зарубежных специалистов показывают сокращение площади ледников на всех континентах, особенно деградации подвержены ледники малых размеров.

Специалистами применяется множество методов изучения ледников, такие как анализ отступа языковой части ледника, сравнительный анализ многолетних метеоданных, анализ изменения площади ледника и другие виды анализа ледников. Однако применение подобных методов при изучении ледников имеет свои недостатки, в том числе и неспособность точно отражать изменение ледников от года к году. На это влияет время реакции ледника на изменения в климате, то есть существует задержка между изменением климата и реакции ледника.

В отличие от этих подходов измерение баланса массы позволяет получить данные о состоянии ледника от года к году, прослеживая ее динамику ежегодно. Исходя из этого применение метода баланса массы ледника, позволяет получать более точную информацию о состоянии ледника особенно в краткосрочном периоде.

Таким образом, измерение баланса массы ледников позволяет, определить состояние ледников сейчас и на этих данных прогнозировать будущее их состояния, что позволит определить долю талой воды в будущем в речных системах горных регионов. Это позволит принимать решения для адаптационных мер к климатическим изменениям и снизит ущерб от её влияния.

Исходя из вышеизложенного, проведения научных исследований в целом способствуют обеспечению развитию различных секторов экономики при планировании, прогнозировании и управления водными ресурсами.

Степень изученности научной темы. Восточный Памир с точки зрения изучения ледников является белым пятном для специалистов и ученых изучающие климатические изменения и их влияние на речные системы, Советскими учеными были проведены рекогносцировочные исследования ледников данной местности, что оставляла больше вопросов, чем ответов. Исследования ледников Восточного Памира современными учёными проводились с помощью дистанционного зондирования без наземных полевых изысканий, что сказывается на точность данных.

Гляциологические исследования, посвящённые оледенению Западного и Восточного Памира, были проведены такими учёными как Котляков В.М. [1], Рототаева О.В. [173], Виноградов О.Н. [87], Осипова Г.Б. [74], и др.

Также следует отметить вклад в изучение криосферы современных учёных таких, как Т. Saks [21], E. Miles [58], E. Pohl [16], M. Barandun [38], M. Hoelzle [11], F. Pellicciotti [13], Коновалов В.Г. [91], Петраков Д.А. [82], Каюмов А. [7].

Измерение динамики баланса массы ледников Восточного Памира гляциологическим методом в прошлом не проводились, что является, целью данной диссертационной работы. Данная диссертационная работа содержит актуальные данные о количестве ледников, изменение их площади, балансе массы ледников и моделирование баланса массы.

Связь исследования с программами (проектами) и научной тематикой. Тема диссертационной работы разработана на основе стратегических документов Республики Таджикистан, в частности «Государственная программа изучения и сохранения ледников Республики Таджикистан на 2010-2030 годы, «Национальная водная стратегия

Республики Таджикистан на период до 2040 года»; а также при выполнении научно-исследовательской работы, проводимой ГНУ «Центра изучения ледников» Национальной академии наук Таджикистана на тему: «Разработка Каталога (атласа) ледников Республики Таджикистан на основе инновационных геоинформационных технологий» на период 2022-2026гг. (НИР): ГР №0123TJ1528.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования - изучение и оценка влияния климатических изменений на баланс массы и динамику ледников в высокогорной местности бассейна озера Ховаркуль на Восточном Памире.

Задачи исследования. Для того, чтобы получить желаемые результаты необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ оледенения бассейна озера Ховаркуль с применением новых технологий за 2018 г.
2. Используя современные технологии, провести оценку динамики оледенения с 1977 по 2018 гг. бассейна озера Ховаркуль.
3. Усовершенствовать методы и технологии расчётов баланса массы ледников бассейна озера Ховаркуль.
4. Смоделировать баланс массы ледников бассейна озера Ховаркуль.

Объект исследования – Ледники и ледниковые системы бассейна озера Ховаркуль Мургабского района Горно Бадахшанской автономной области.

Предмет исследования - совершенствование методов и технологий измерения баланса массы ледников, моделирования и применённых методов дистанционного зондирования ледников бассейна озера Ховаркуль.

Прямой гляциологический метод для измерения баланса массы ледников, основанный на полевых изысканиях и камеральных работах. Моделирование баланса массы ледников с помощью модели "SMB". Использование дистанционного зондирования, которые включают

обработку спутниковых снимков Landsat 1-8, Sentinel 2A, ЦМР Alos Palsar и SRTM, обработка данных происходит в таких программах как ArcGIS, QGIS и других геоинформационных системах.

Научная новизна.

1. Изучено современное состояние оледенения бассейна озера Ховаркуль.
2. Составлены современные карты ледников бассейна озера Ховаркуль.
3. Получены первые данные баланса массы ледников бассейна озера Ховаркуль (на примере ледника №139).
4. Усовершенствована методика мониторинга состояния ледников бассейна озера Ховаркуль.
5. Смоделировано баланс массы ледников бассейна озера Ховаркуль.
6. Разработаны рекомендации по исследованию ледников с применением ДЗЗ, моделированием и прямыми гляциологическими методами с учётом особенностей климатогеографических условий бассейна озера Ховаркуль.

Положения, выносимые на защиту:

1. Проведены измерения таяния ледников с использованием ДЗЗ, бассейна озера Ховаркуль.
2. Обосновано состояния современных ледников и измерение баланса массы ледника №139 в бассейне озера Ховаркуль на Восточном Памире.
3. Получены результаты моделирования баланса массы ледника №139 в бассейне озера Ховаркуль.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Результаты данной диссертационной работы могут быть использованы при:

- мониторинге оледенения и оценке влияния климата на ледники с применением методов дистанционного зондирования;

- расчёте баланса массы ледников в современных климатических условиях Восточного Памира;
- моделирование баланса массы ледников в климатических условиях всего Восточного Памира.
- изучение гляциологического режима ледников бассейнов рек Таджикистана с применением современных средств ДЗЗ;
- методические и технологические основы определения баланса массы ледников и моделирования;

Степень достоверности результатов диссертации основывается на следующих ключевых аспектах: использование методов для исследований, которые существуют и проверены временем, а также их эффективность подтверждена отечественными и зарубежными учёными в процессе получения результатов за многолетний период. Подтверждение достоверность результатов работы обеспечивается комплексным подходом, включающим применение проверенных методов, проведение полевых и камеральных исследований, использование современных технологий ДЗЗ, статистический анализ, сравнение с данными других исследователей и одобренными научным сообществом.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Содержание данной работы отражает следующие пункты паспорта специальности 2.1. Геология, геодезия, гидрология, строительство, архитектура (2.1.37. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия):

3. Проблемы региональной гидрологии подобия и различия водосборных территорий по условиям формирования речного стока, генезиса составляющих стока, физической и схоластической природы колебаний водности рек, пространственно-временной изменчивости региональных и местных водных ресурсов.

4. Особенности гидрологических, гидрохимических и гидробиологических процессов в озерах и водохранилищах, динамические явления в озёрах, водохранилищах и прудах, генезис и трансформация

состояния водных масс, проблемы лимнологического моделировании внутриводоемных явлений, гидроэкологической оптимизации режима водоёмов суши.

12. Разработка методов математического моделирования гидрологических и гидрохимических процессов.

Личный вклад соискателя ученой степени в подготовке диссертации. Данная работа является результатом проведённых исследований автора в «Центре изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана» и состоит в выборе направления исследования и решения поставленных задач, с использованием дистанционного зондирования ледников, полевых работ и их камеральных расчетов а также моделирования ледников бассейна озера Ховаркуль, обработке и анализе полученных данных, разработке рекомендаций, а также внедрения их в научные и исследовательские работы.

Выводы по результатам проведенных научных, - и научно-полевых и экспедиционных исследований были осуществлены научными руководителями.

Апробация и внедрение. Результаты работы были доложены и обсуждены на республиканских и международных научных конференциях: «Летняя школа по академическому письму в рамках Конкурса студенческих исследований по устойчивому управлению природными ресурсами в Центральной Азии и Афганистана» (г. Алматы, 2019), Международная научно-практическая конференция «Современное состояние ледников, оледенение и криосфера в процессе глобального потепления», (г. Душанбе, 2021), «Первая конференция по проекту Памир» (г. Фрибург, Швейцария, 2022), «Ледники Республики Таджикистан: состояние, положение и перспективы изучения» (г. Душанбе, 2022), Международная научная конференция «Вопросы изучения, сохранения ледников и рациональное использование водных ресурсов Центральной

Азии” (г. Душанбе, 2022), Международная конференция «Бакинский молодежный климатический диалог I» (г. Баку, 2024).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 16 научных статьях, в том числе 5 научных статей опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах ВАК при Президенте Республики Таджикистан.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из 151 стр. компьютерного текста, из них 120 стр. основного текста, и состоит из введения, 4 глав, заключения и приложений. В работе содержится 56 рисунков и 14 таблиц. Список использованной литературы состоит из 182 наименований, в том числе 108 на иностранных языках.

ГЛАВА 1. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОСТОЧНОГО ПАМИРА И ИХ ВКЛАД В ГИДРОЛОГИЮ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

«Ледники бассейна озера Ховаркуль остаются малоизученным. Одним из крупных исследований бассейна озера Ховаркуль является аэрофотосъёмка в 1953 году для каталогизации ледников данного бассейна» [1]. Из-за труднодоступности, отдалённости местности, а также бессточного характера озера Ховаркуль, расположенного на высоте 4000 м, ведение сельскохозяйственной деятельности в этом районе невозможно, а постоянные исследования ледников считаются нецелесообразными с экономической точки зрения но исследования показывают что за последние годы уровень озера Ховаркуль поднимается и это может привести к непредсказуемым последствиям. Тем не менее, проведение научных исследований в этом бассейне важно, особенно для моделирования и прогнозирования колебаний ледников в условиях изменения климата.

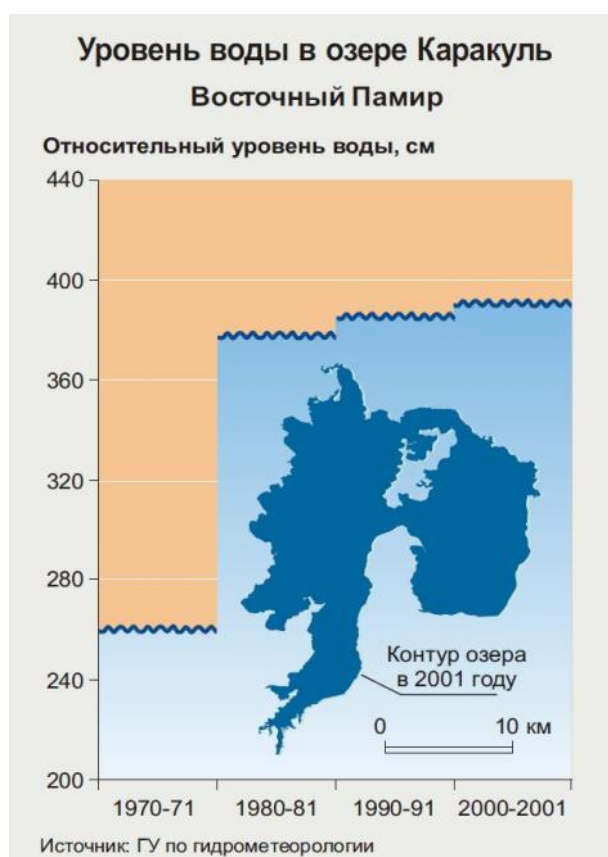


Рисунок 1.1. - Уровень воды в озере Ховаркуль на Восточном Памире [24]

«В Центральной Азии измерения баланса массы ледников проводились на ледниках Батыш Соок, Туюксу, Абрамова, ледник № 354 и других репрезентативных ледниках, например на леднике Богдановича в Иле Алатау в 2008 году, баланс массы составил (-0,987 м за 2007/2008 год), и анализ сокращения площади ледника на 45,9% с 1915 по 2008 гг. со средним темпом деградации 0,5% в год» [2, с.27]. «За 2006-2010 гг. средний баланс массы ледника Туыйксу составил -0,587 м/год, длина уменьшилась на 25,1 м/год, площадь сократилась на 0,0134 км²/год. Эти данные свидетельствуют о продолжающемся сокращении ледника в условиях глобального потепления климата, где главным негативным фактором является повышение летних температур воздуха» [3]. «Анализ данных за 1978-2021 гг. показал сокращение площади ледников северного склона Заилийского Алатау на 18-36%. Среднегодовой баланс массы ледника Центральный Туюксу за 2016-2021 гг. составил -0,63 м водного эквивалента, что соответствует тренду деградации оледенения региона» [4, с.536]. «Наблюдения ледника Туюксу (Заилийский Алатау, Тянь-Шань) с 1950-х по 1990-е показывают: негативный баланс массы, уменьшение площади на 27%, понижение поверхности на 0,67 м/год и сокращение длины на 180 м за 15 лет» [5, с.75-76]. «На основе аэрофотосъёмок и климатических данных в бассейне реки Усек в Джунгарском Алатау авторы определили, что за 34 года (1956-1990) количество ледников уменьшилось на 49,4%, их площадь сократилась на 40,6%, а объём льда - на 41,8%. Средний многолетний ледниковый сток составил 116,1 млн м³/год, но к концу периода значительно сократился из-за уменьшения площади ледников» [6]. «При этом измерение динамики температурного режима поверхности Земли свидетельствуют о ежегодном его увеличении, особенно за последние десятилетия» [7, с.77].



Рисунок 1.2. - Изучение ледников в Центральной Азии

В работе Hagg WJ и др. [8] используются разные методы определения удельного баланса массы ледника Туюксу и их сравнение, при этом баланс массы, определённый гляциологическим методом, за 1958-1998 гг. равен - 16,8 м водного эквивалента. В исследовании Руслана Кенджабаева и др. [9] "Наблюдение и реконструкция баланса массы ледника Батыш Соок" за период с 2011 по 2016 годы средний баланс массы ледника Батыш Соок составил -0,34 м водного эквивалента в год. Marlene Kronenberg и др. [10] провела реконструкцию баланса массы ледника №354 (хребет Акшийрак, Кыргызстан) за период 2003–2012 годов, и кумулятивный баланс массы данного ледника составил -0,40 м водного эквивалента.

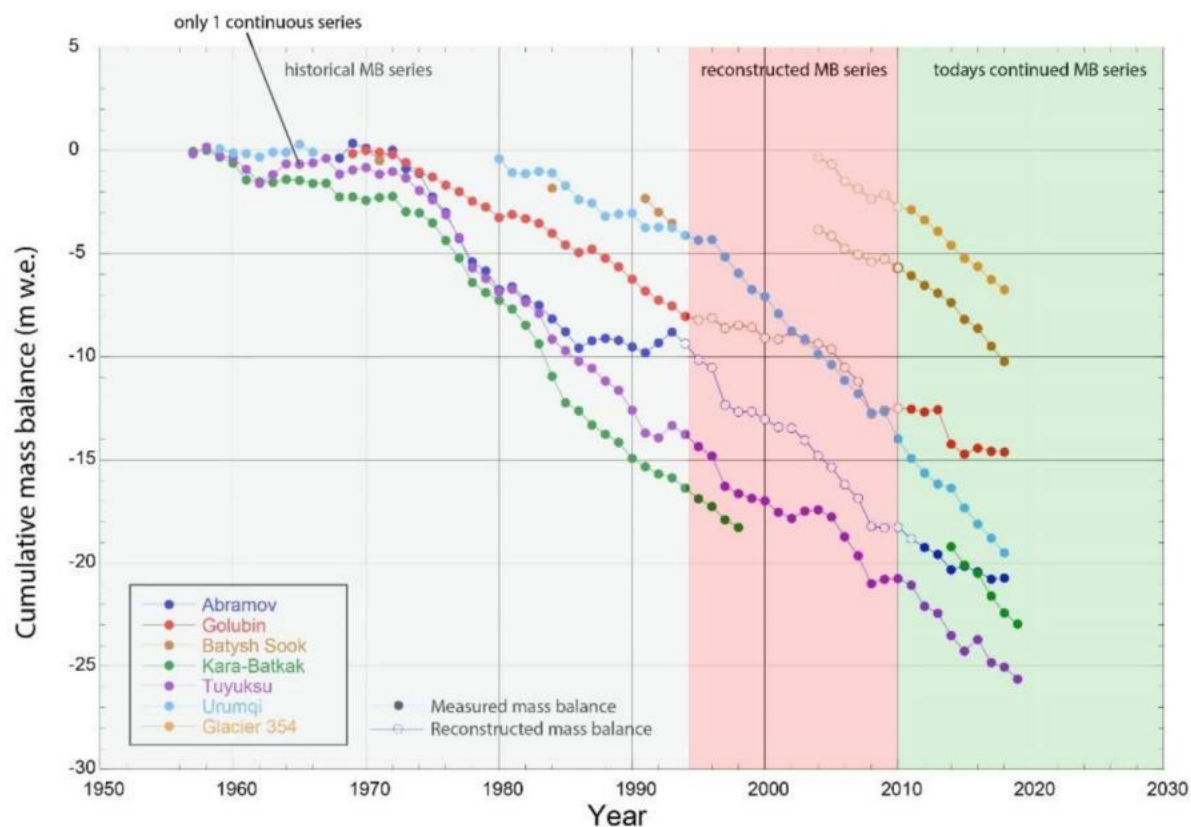


Рисунок 1.3. - Измеренные и реконструированные временные ряды баланса массы для Центральной Азии [38]

«В работе Hoelzle, M. предлагаемая им модель для региона Восточного Памира даёт погрешность ± 150 см, эта величина очень большая и внесение новых данных позволит скорректировать погрешность» [11, с.105].

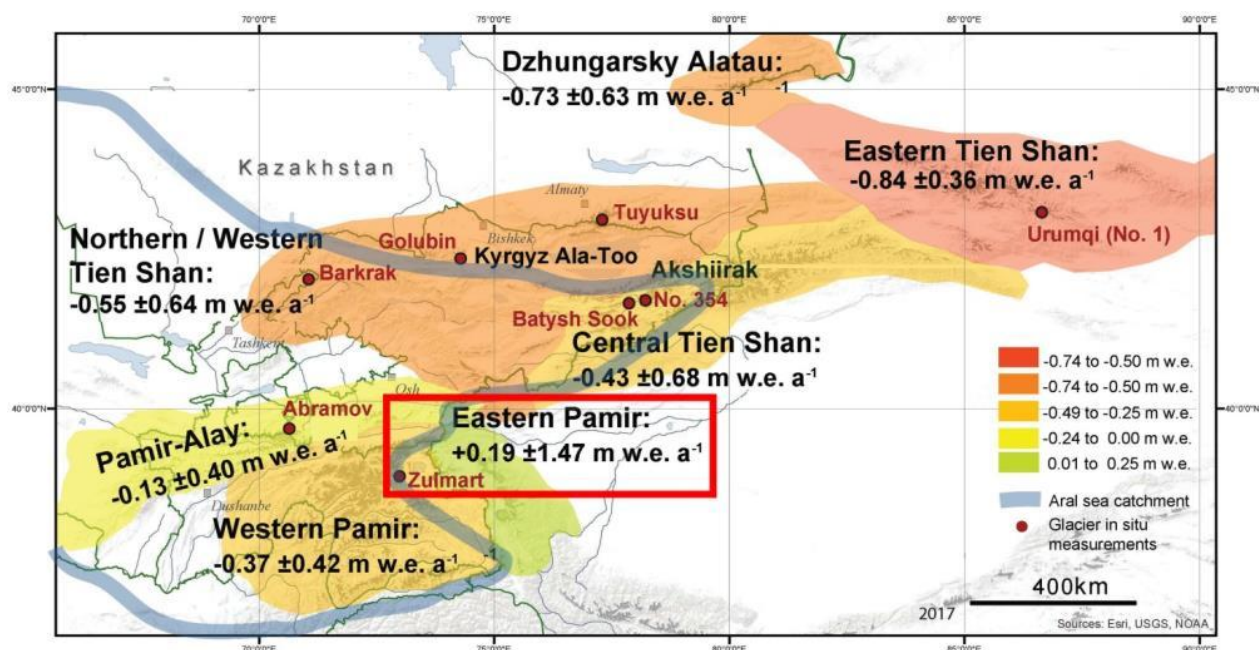


Рисунок 1.4. - Погрешность моделирования [11, с.105]

Различные исследования пытались объяснить наблюдаемую и смоделированную неоднородность реакции криосферы на изменение климата в Центральной Азии, но многие процессы и их последствия остаются необъяснимыми, во многом из-за отсутствия прямых измерений. Существует острая необходимость лучше понять криосферу региона и её взаимодействие с атмосферой и гидросферой. Прогнозы связаны с неопределённостями, связанными с неполными знаниями, например, о климатических и не климатических факторах, моделировании ледникового покрова и понимании будущего ледников.

«Восточный Памир является уникальной площадкой для измерения баланса массы ледников из-за морфологических, метеорологических и других свойств, обусловленных тем, что равнины находятся на высоте около 4000 м. н. у. м., а горные хребты возвышаются более чем на 6000 м. Климатические условия данной местности сурово холодные, и вместе с тем здесь выпадает очень мало атмосферных осадков. Несмотря на это, в бассейне озера Ховаркуль имеется более 400 ледников площадью более 0.1 км² а общая площадь оледенения составляет более 560 км². В бассейне озера Ховаркуль имеются как малые ледники, так и крупные дендритные ледники и одним из таких ледников является ледник Октябрьский с площадью около 60 км²

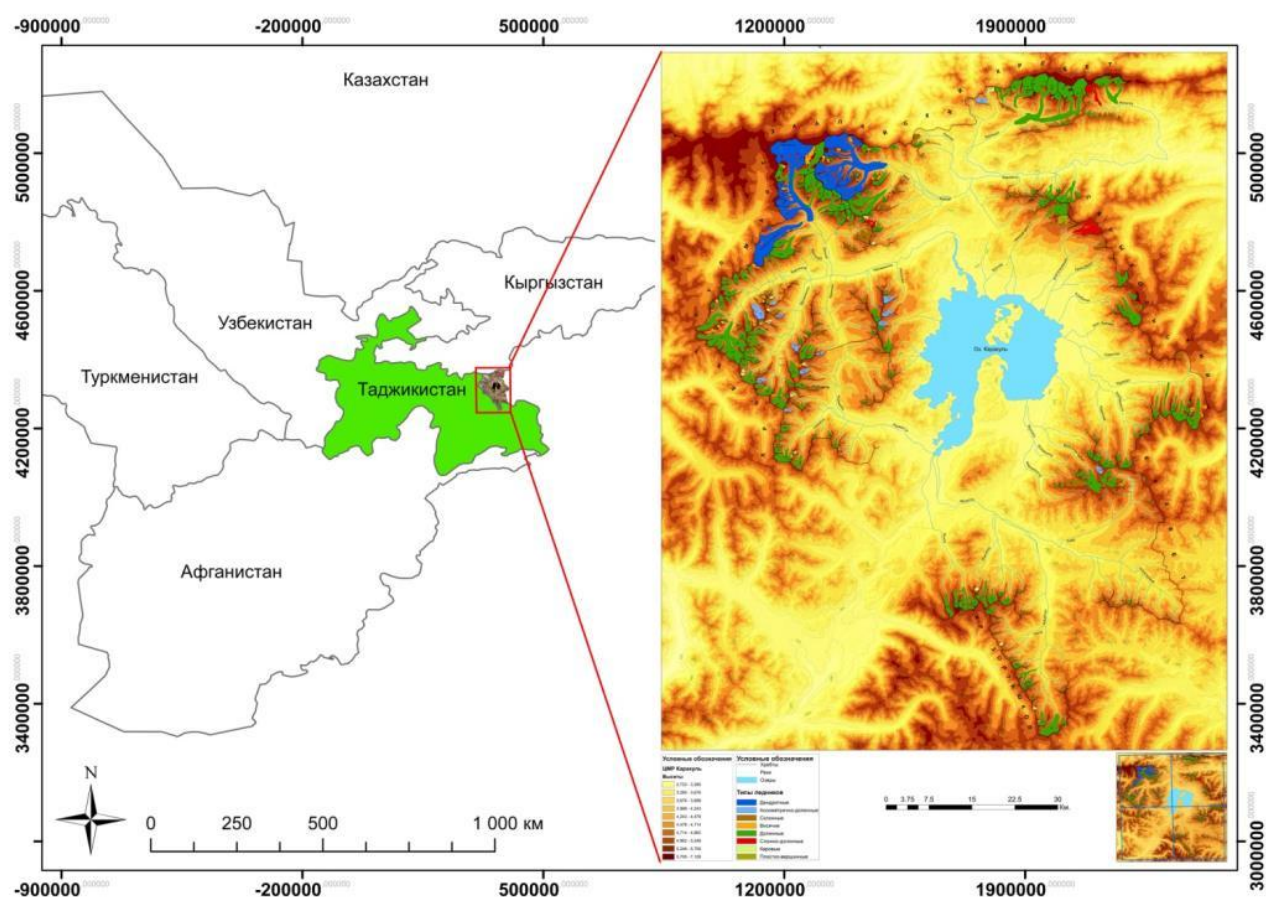


Рисунок 1.5. - Бассейн озера Ховаркуль

«Негативное влияние изменения климата в Центральной Азии подтверждены многими учеными, однако есть необходимость для более глубокого изучения данного фактора, так как это негативно влияет на криосферу и тем самым на жизнь миллионов людей. Центральная Азия известна своими разнообразными криосферными, топографическими и климатическими условиями и это приводит к сложному режиму стока и геологическим опасностям. Ледники являются природными водонапорными башнями, которые обеспечивают водой в засушливые летние сезоны всю Центральную Азию. Ледники являются не только источниками пресной воды, но и источником опасностей и при интенсивном таянии могут привести к селевым потокам и другими чрезвычайными ситуациями. Не смотря на то, что прошлое, нынешнее и будущее состояние ледников тесно связано с водным балансом в Центральной Азии ее будущее состояние остаётся не до конца известным и важным фактором для этого остаётся реакция ледников на изменения

климата, на которую влияет разнообразное пространство временные закономерности» [11,13].

«Центральная Азия сталкивается с уникальными проблемами, усугубляемыми тем, что многие горные общины используют натуральное сельское хозяйство» [14].

«Эти сообщества особенно уязвимы к колебаниям водоснабжения, что усиливает повышенную уязвимость стран к природным и антропогенным опасностям» [15]. «С ростом населения и расширением водного сектора важность надёжного водоснабжения возрастает, с одновременным ростом дефицита воды» [16], а также проблемы осложняются ограниченными водными ресурсами [14].

В работе [17] показано, что в Таджикистане ожидается рост дефицита воды для орошения, поскольку после 2040 г. запасы воды в ледниках будут постепенно истощаться из-за их деградации в условиях потепления климата.

Прогнозы связаны с неопределенностями из-за неполных данных, например, о факторах моделирования ледникового покрова и понимания будущего ледников. Климатические сценарии предсказывают устойчивое потепление, что усугубит водный дефицит в будущем. Улучшение данных будущего воздействия на климат является приоритетом, учитывая расхождения в прошлых наборах климатических данных по всей Центральной Азии. Субрегиональные оценки климатических переменных имеют решающее значение для более точных исследований воздействия.

1.1. Особенности формирования водных ресурсов в Таджикистане

Социально-экономическое развитие Центральной Азии сильно зависит от водных ресурсов. Страны Центральной Азии связаны общими водными ресурсами, имеющими трансграничный характер. В горах берут начало более 6000 рек, в том числе реки Амударья и Сырдарья. В основном они питаются за счёт таяния снегов и ледников (70–80%) с горных хребтов Памира, Гиндукуша и Тянь-Шаня [18, 19, 20, 21, 22].

Общий среднегодовой сток – 120 км³, из которых 116 км³ приходится на Амударью и Сырдарью. Амударья берёт начало в Таджикистане (62,9 км³/год), Сырдарья – в Кыргызстане (27,4 км³/год) [19, 23]. Остальные страны сильно зависят от стран верхнего течения.



Рисунок 1.6. - Водные ресурсы Центральной Азии (www.cawater-info.net)

«Талая ледниковая вода существенно регулирует динамику речного стока. В среднем таяние ледников составляет около 6% для Сырдарьи и 20% для Амударьи ежегодно» [24]. «В сезон таяния этот вклад может в 1,5–3 раза превышать среднегодовой приток» [21]. «Таяние ледников обеспечивает надёжное водоснабжение».

«Ожидается, что потепление в Центральной Азии превысит среднемировой уровень, при этом к 2100 году температура повысится в среднем на 5-6°С» [25]. Лёд и таяние снегов являются основными водными ресурсами густонаселённых низменностей Центральной Азии и играют решающую роль для горных сообществ [26, 27, 28]. Накопление снега действует как резервуар для воды, особенно в зимние месяцы, и

контролирует сток весной и в начале лета. Ледники и вечная мерзлота выделяют большую часть талой воды в период с июля по сентябрь. Изменения снега, ледников и вечной мерзлоты, вызванные изменением климата, оказывают глубокое воздействие на водные ресурсы. Для лучшего понимания реакции климата необходим долгосрочный мониторинг компонентов криосферы. «Это также поможет лучше количественно оценить связанные с этим изменения во вкладе стока талой воды» [29]. По мнению Манкина [30] к середине столетия регион достигнет пика потребности в воде из-за увеличения ледникового стока, который значительно снизится после второй половины столетия. «В настоящее время ежегодный вклад талых ледниковых вод Тянь-Шаня в верхний сток Сырдарьи составляет 10%. Вклад талых ледниковых вод в Амударью составляет около 40% в год. Однако в засушливые летние месяцы вклад талой воды ледников может резко увеличиться до 96% для Амударьи и до 42% для Сырдарьи» [26]. По прогнозам, к 2050 году поверхностный сток на Амударье увеличится на 25% в летние месяцы из-за увеличения таяния ледников, а затем снизится до 28% до конца столетия. Модели прогнозируют аналогичное увеличение стока в Сырдарье в июле и августе. Будущее сокращение количества твёрдых осадков, в первую очередь, повлияет на весенний и ранний летний сток.

«Как экстремальные наводнения, так и экстремальные засухи будут увеличиваться, равно как и общий дефицит воды. Изменения сезонности снежного покрова, приводящие к более раннему таянию, могут привести к увеличению весеннего и летнего стока в малоснежные годы или в засушливые годы» [31]. «Это может спровоцировать ледниковые наводнения, селевые потоки и оползни, которые могут нанести ущерб близлежащим населённым пунктам. Поскольку вечная мерзлота тает в ответ на повышение температуры, она возвращается в климатическую систему, выделяя захваченный метан или углекислый газ. Результатом является усиление парникового эффекта» [32]. «Потенциальной угрозой

для региона является нерегулируемое использование воды, в основном для сельскохозяйственного орошения. Кроме того, вода является основным источником электроэнергии, вырабатываемой гидроэлектростанциями» [27]. Бесперебойное снабжение населения электроэнергией зависит от уровня водоёма. Однако из-за изменения климата ёмкость водохранилища с каждым годом уменьшается. [33, 34].

Республика Таджикистан обладает богатыми водными ресурсами и занимает ключевое положение в Центральной Азии. Основу водных ресурсов Таджикистана составляют ледники. При общей площади оледенения примерно 9 000 км², что покрывает 5% территории страны. Общий объём льда в ледниках страны составляет около 800 км³.

«По территории страны протекает около 947 рек, общая длина которых превышает 28500 км, но наиболее значительную роль играют Сырдарья, Пяндж, Вахш, Мургоб, Кафирниган, Сурхоб, Оксу, Зеравшан и др. Здесь насчитывается более 1300 озёр (одно из крупнейших - Сарез). Озера Таджикистана содержат более 46,3 км³ воды, из них 20 км³ пресной. В стране имеется 10 водохранилищ (Нурекское, Кайракумское и др.) общим объёмом 15353 км³. Основными пользователями воды в Таджикистане являются питьевое водоснабжение и водоотведение, гидроэнергетика, орошаемое земледелие, промышленность и рыболовство. Таджикистан фактически использует лишь 17-20% водных ресурсов, образующихся на его территории. 84% воды в Таджикистане используется в основном для сельского хозяйства, 8,5% потребления приходится на питьевую воду и коммунальное хозяйство, 4,5% на промышленность и 3% - на другие пользователи. Ежегодно Таджикистан производит около 64 км³ воды, что составляет около 55% от общего объёма воды в бассейне Аральского моря. Ледники и подземные источники воды обеспечивают около 25-50% годового стока (в зависимости от наличия ледника). Эти ледники удерживают массу воды в 845 км³, что в семь раз превышает общий годовой сток бассейна Аральского моря» [35, 28, 36].

«Озеро Ховаркуль - крупнейшее из озёр на территории Республики Таджикистан, с площадью зеркала 380 км², глубиной до 238 м. и объёмом более 26 км³. Оно расположено в плоской горной котловине, на высоте 3914 м. н. у. м., в северной части Памира, к югу от Заалайского хребта. В него впадают несколько рек, основные из которых – Караджилга, Карарт, Акджилга, Музкол. Границами рассматриваемого района являются крупные горные хребты, высотой до 5500-6000 м. Озеро Ховаркуль бессточное, вода в нем горько-солёная» [1].

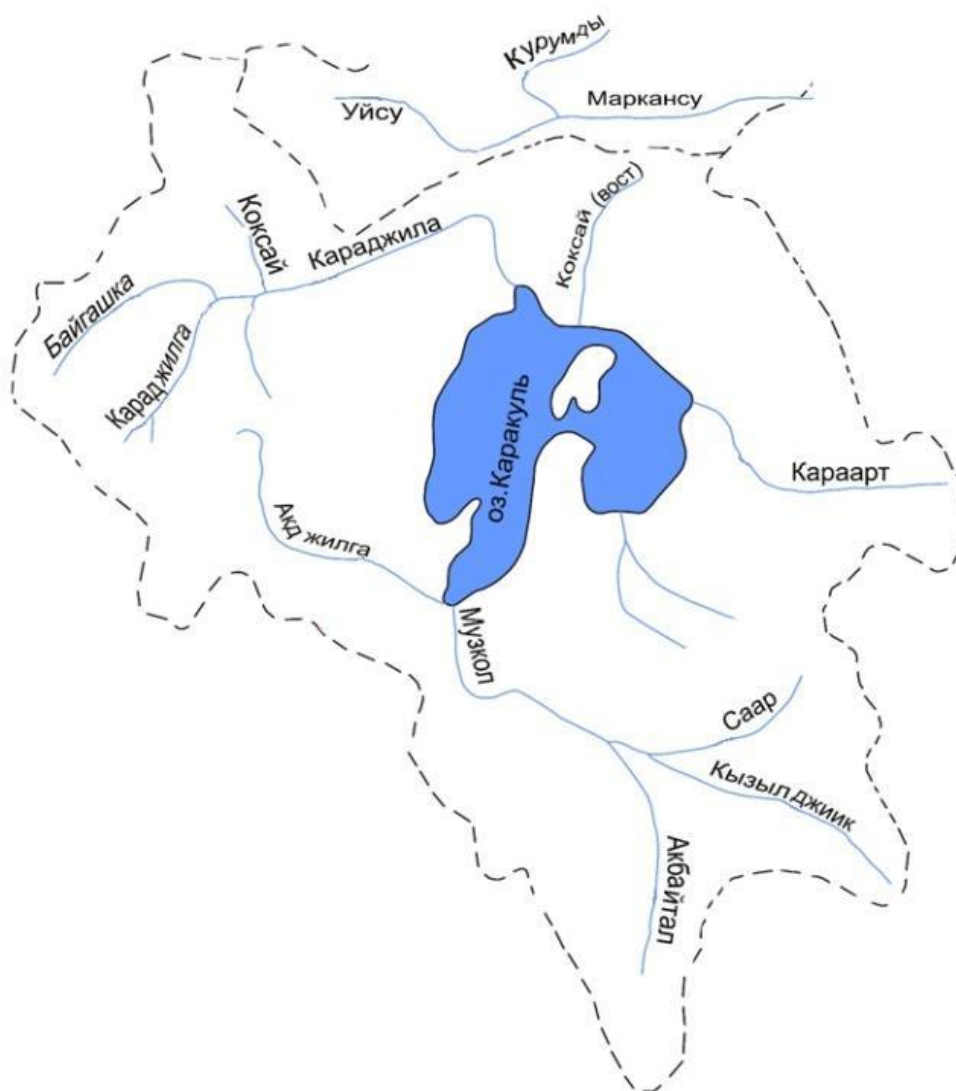


Рисунок 1.7. - Схема крупных рек бассейна озера Ховаркуль (Каракуль)

1.2. Климатические пояса и природно-климатические условия в Центральной Азии и Таджикистана

«Центральная Азия характеризуется засушливым или полузасушливым климатом с жарким и сухим летом, и холодной зимой, иногда с сильными снегопадами» [37]. «Почти 80 миллионов человек в пяти странах Центральной Азии зависят от воды, берущей начало в регионе, где на высоких хребтах находится более 25 000 ледников» [38]. «Ледники вносят значительный вклад в сток Амударьи и Сырдарьи и являются индикаторами климатических изменений» [39]. «Горы чувствительны к потеплению из-за запасов ресурсов в виде ледников и снега» [40]. По данным AR6, ледники исчезнут на 70% в Центральной и Западной Азии к концу XXI века.

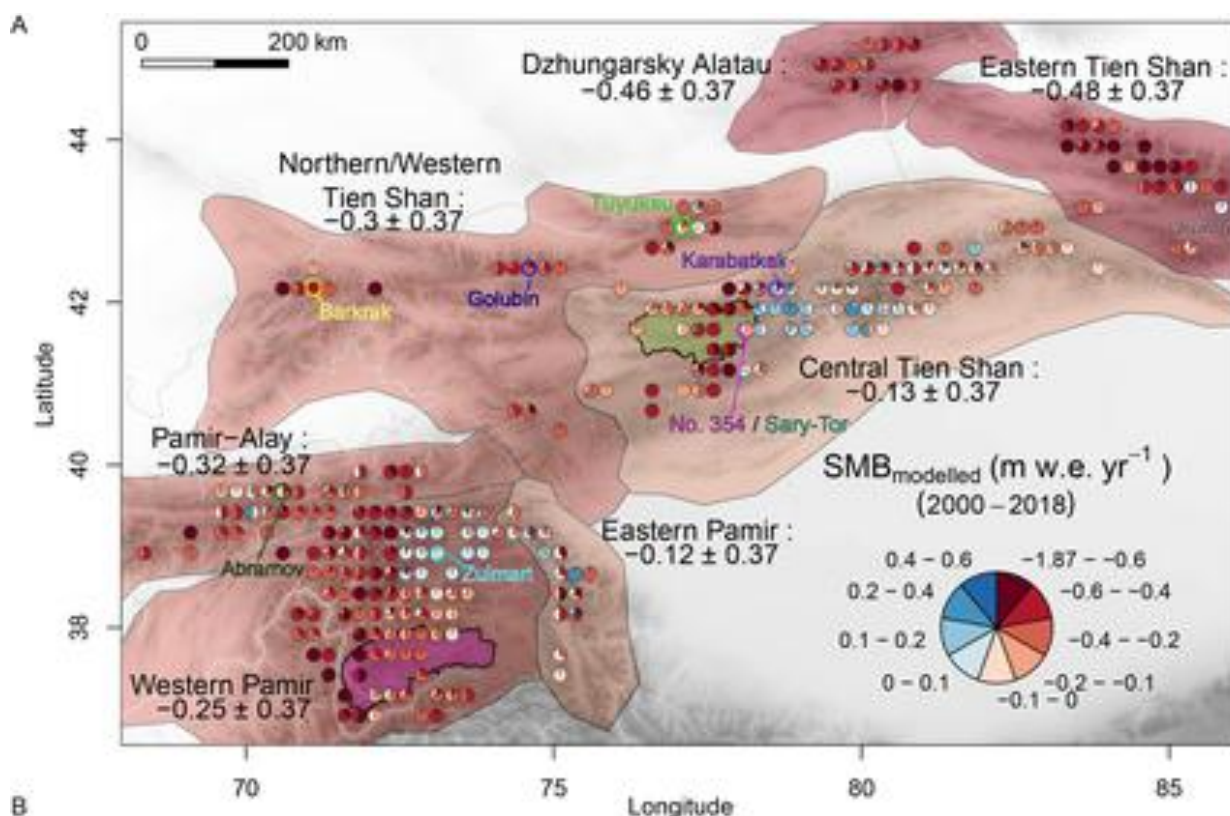


Рисунок 1.8. - Неоднородная реакция ледников Тянь-Шаня и Памира [59]

Горы Центральной Азии имеют решающее значение для снабжения пресной водой из-за крупных ледников в регионе. Исторически мониторинг баланса массы ледников начался в середине 1950-х годов во времена СССР [41, 42], но почти прекратился в начале 1990-х годов.

Усилия по восстановлению мониторинга ледников начались в 2010 году [43], что способствовало региональным оценкам.

«Оценка эффективности глобальной климатической модели при моделировании характеристик температуры и осадков над Центральной Азией показывают тренд потепления и уменьшение осадков к концу 2070-2100 годов» [29, 44]. Сценарии изменения климата предсказывают более засушливые летние и более влажные холодные сезоны. Прогнозировалось будущее увеличение осадков в Центральной Азии на 2011-2100 гг. по СМIP5 [45]. «Dike, V. N. предположил, что атмосферные потоки водяного пара и поверхностное испарение могут быть механизмами увеличения осадков и по результатам SSP в GCM СМIP было спрогнозировано уменьшение осадков на юге региона, а на севере региона увеличение атмосферных осадков. [46].

Исследования Huss и Hock (2018) показывают, что изменение климата будет оказывать большое влияние на гидрологический режим в бассейнах которые, питаются от ледников. Полученные данные прогнозируют, что потеря массы ледников приведёт к значительному увеличению стока, как зимой, так и летом по всему миру и это связана с ускоренным таянием ледников под влиянием изменения климата. Исследования Kaser et al. (2010) также подтверждают, что ледники будут вносить значительный вклад в обеспечение водой особенно в засушливые регионы, однако такой вклад будет временным и будет уменьшаться с уменьшением площади ледников.

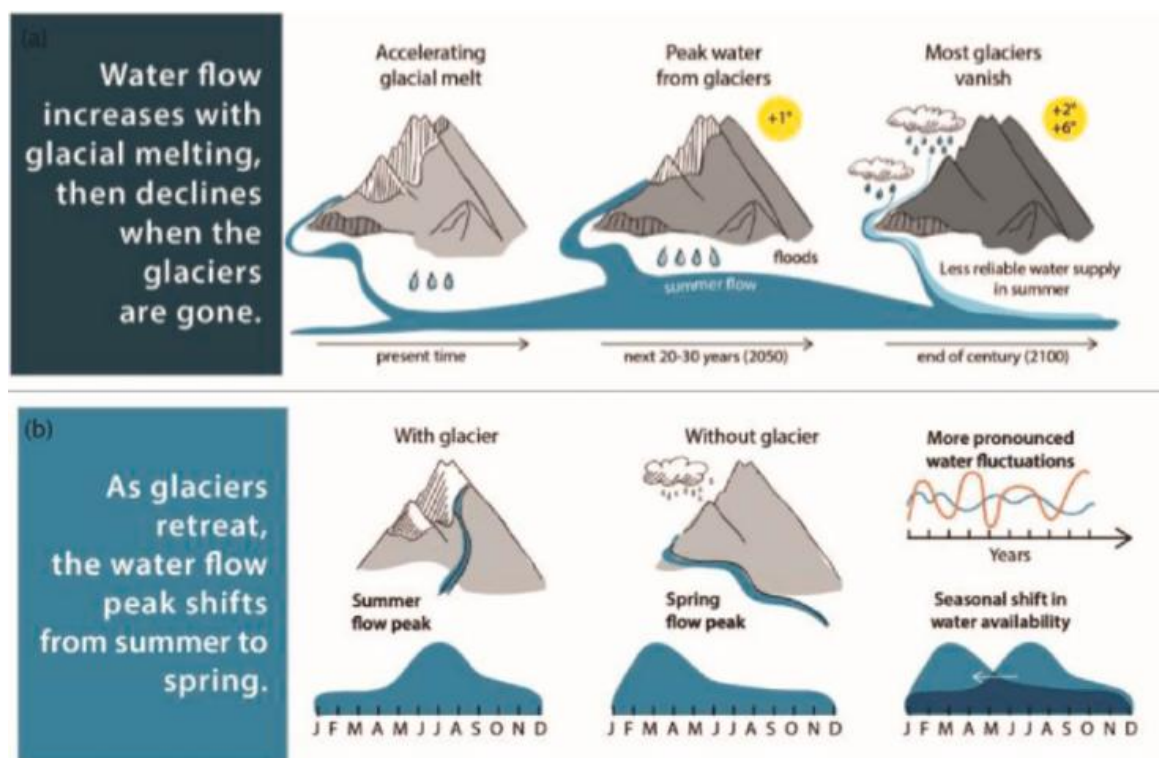


Рисунок 1.9. - Схематическое изображение ожидаемых изменений в стоке при условиях продолжающегося изменения климата. (а) Влияние общий объём талой воды. (б) Сезоны с доступом воды [38]

При увеличении стока могут появиться ещё и риски прорыва ледниковых озёр, и возникновение селевых потоков

Bolch et al. (2011) выявили наличие потенциально опасных гляциальных озёр в северном Тянь-Шане, которые могут привести к прорывам и возникновению селевых потоков. «Erokhin et al. (2018) изучили случай прорыва озера Тезтор в Кыргызстане, который вызвал селевые потоки, подчеркивая, что такие события могут быть спровоцированы нестационарными гляциальными озерами» [47].

С другой стороны, ожидается, что в засушливые летние месяцы сток будет уменьшаться к концу столетия. Kure et al. (2013) прогнозируют, что в снежно-ледниковых бассейнах Таджикистана сток будет уменьшаться из-за сокращения площади ледников и снежного покрова. Nagg et al. (2007, 2013) также моделировали, что сток в ледниковых бассейнах Центральной Азии будет снижаться по мере сокращения ледников.

«Принимая во внимание эти прогнозируемые изменения стока,

вызванные потерей ледников, необходимо разработать эффективные стратегии управления водными ресурсами и мониторинга гляциальных систем для минимизации негативных последствий. Комплексный подход к управлению и мониторингу позволит адаптироваться к новым гидрологическим условиям в ледниковых бассейнах» [48, 49].

«По прогнозам, к 2050 году среднегодовая температура увеличится на 2°C, особенно в период с декабря по август. Температура постоянно повышалась со средней скоростью 0,2–0,25 °C/десятилетие в западной части Таджикистана» [50]. «В середине века (2041-2070 гг.) произойдет заметное повышение температуры (межмодельный диапазон от +1,1 до +2,8°C при RCP8.5), а в отдалённой перспективе (2071-2099 гг.) температура значительно повысится (межмодельный диапазон от +4,8 до +6,6°C при RCP8.5). Прогнозируемый сигнал изменения климата в отношении осадков слабый, модели дают противоречивые прогнозы. В западной части страны ожидается уменьшение осадков, в восточной – увеличение на +10% (+5 мм или +10 мм в год)» [51]. «Будущее потепление климата приведёт к таянию снегов и частым наводнениям» [40]. «Уже сейчас наблюдается сокращение площади оледенения Таджикистана, который покрывал 6% территории Таджикистана, сократилась до 5%, а объём льда уменьшился на 30%» [7]. «По прогнозам среднегодовой речной сток увеличится до 2060 г., но с 2080 г. уменьшится из-за исчезновения небольших ледников» [52]. «В итоге будет наблюдаться засуха, которая приведёт к нехватке водных ресурсов, та в свою очередь приведёт к увеличению концентрации патогенных микроорганизмов и росту инфекций. Повышение температурного режима приведёт к увеличению спроса на пресную воду, что привлечёт за собой истощение грунтовых вод. Вышеуказанные проявления приведут к частым стихийным бедствиям, например оползням, наводнениям, засухе и эпидемиям» [53, 54]. «Стихийные бедствия на территории Таджикистана являются частыми явлениями, например в 1990 годах было зарегистрировано около 50000

оползней, а 85% территории Таджикистана является потенциально селеопасным» [55].

«Восточный Памир характеризуется как место, где холодное лето и суровая малоснежная зима, здесь отсутствуют безморозные периоды, а среднегодовая температура низкая и составляет (5-7°C мороза). Это всё дополняется сильным ветром, резкими колебаниями температуры и малым количеством осадков (70-120 мм в год) и это всё создаёт засушливые условия для местности» [1, 56].

Исходя из вышеуказанного изложения, появляется необходимость для создания эффективной стратегии для управления водными ресурсами в связи с увеличением стока до середины века и её уменьшения к концу века, а также необходимо принимать меры для уменьшения рисков при уменьшении объёма льда в ледниках, так как глобальное потепление и повышение температуры, особенно в горах Памира и Тянь-Шаня подчёркивает необходимость проведения качественных адаптационных мер при изменении гидрологического режима.

1.3. Современное состояние оледенения Памира

«Все ледники, независимо от их типа, расположения и размеров, постоянно движутся под силой своей тяжести, и тем самым формируется характерный ландшафт. Ледники постоянно адаптируются под изменение климата, но каждый ледник делает это по-разному, например большим ледникам необходимо больше времени для адаптации и это иногда занимает сотни лет, а маленькие ледники быстро реагируют на изменения климата. В гляциологии это называется время реакции ледника на изменения климата» [38, 57, 58, 59].

«Основным источником пресной воды в бассейне Аральского моря являются ледники и снежный покров. Из-за неоднородности климатической среды и чувствительности гор Памира являются крупным центром современного оледенения с уникальной временной и пространственной изменчивостью» [16, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 66]. «Криосфера

Таджикистана представляет собой уникальную горную водонапорную башню, которая является очень уязвимым к глобальному потеплению, при этом Таджикистан использует лишь до 20% собственных ресурсов пресной воды, но вклад в обеспечение стран низовья, таких как Узбекистан и Туркменистан очень значителен» [13, 24]. «В регионе Центральной Азии сток рек от снегов и осадков составляет 70%, а от таяния ледников и вечной мерзлоты 30%, но таяние ледников приходится на вегетационный период, когда больше всего ощущается нехватка воды и тем самым является источником пресной воды в самый необходимый период» [20, 60].

«Первые исследования на Памире были проведены в конце XIX и в начале XX веков, когда исследователи из России и Европы проводили исследования в высокогорных районах Центральной Азии» [67]. «Для каталогизации ледников Памира в 1946 году была произведена аэрофотосъемка ледников, а в 1971 году были сделаны вертолетные облёты для визуального осмотра и дешифрирования аэрофотоснимков» [1]. «С 1990-х годов, проведение гляциологических исследований на территории Памира сильно сократилось, это было связано с дороговизной проведения работ и труднодоступностью ледников» [7]. «Исследования ледников на Памире возобновились относительно недавно, но расширяются и методики исследований, а также количество репрезентативных ледников, на которых возобновились постоянные наблюдения» [11, 38, 69].

«Ледники Таджикистана сосредоточены на Памире, где самым крупным ледником является ледник Федченко, исследования показывают, что несмотря на то, что данный ледник является одним из крупнейших ледников мира, даже он претерпел значительную потерю мощности с 1928 года. Темпы сокращения площади с 2000 по 2016 год увеличились в 1,8 раза по сравнению с 1928-2000 гг., даже высокие аккумуляционные бассейны истончались со скоростью от -0,2 до -0,4 м/год в 2009-2016 гг.

Несмотря на это, состояние ледника Федченко остаётся удовлетворительным, и экстремальная деградация ледника не наблюдается» [70, 71, 72, 73].

Режимы ледников и их чувствительность весьма неоднородны [24, 74], что приводит к разным темпам отступления [59, 75]. Неоднородная реакция ледников усложняет понимание современных взаимодействий ледников и климата [76].

Барандун и др. [59] предложили субрегионы со схожим балансом массы. Майлз и др. [58] обнаружили, что только 41% ледников накапливали массу на площади менее 20%, и только $60\% \pm 10\%$ региональной абляции компенсировалось накоплением. Авторы пришли к выводу, что без наблюдений на месте понимание изменения криосферы не может быть улучшено [62].

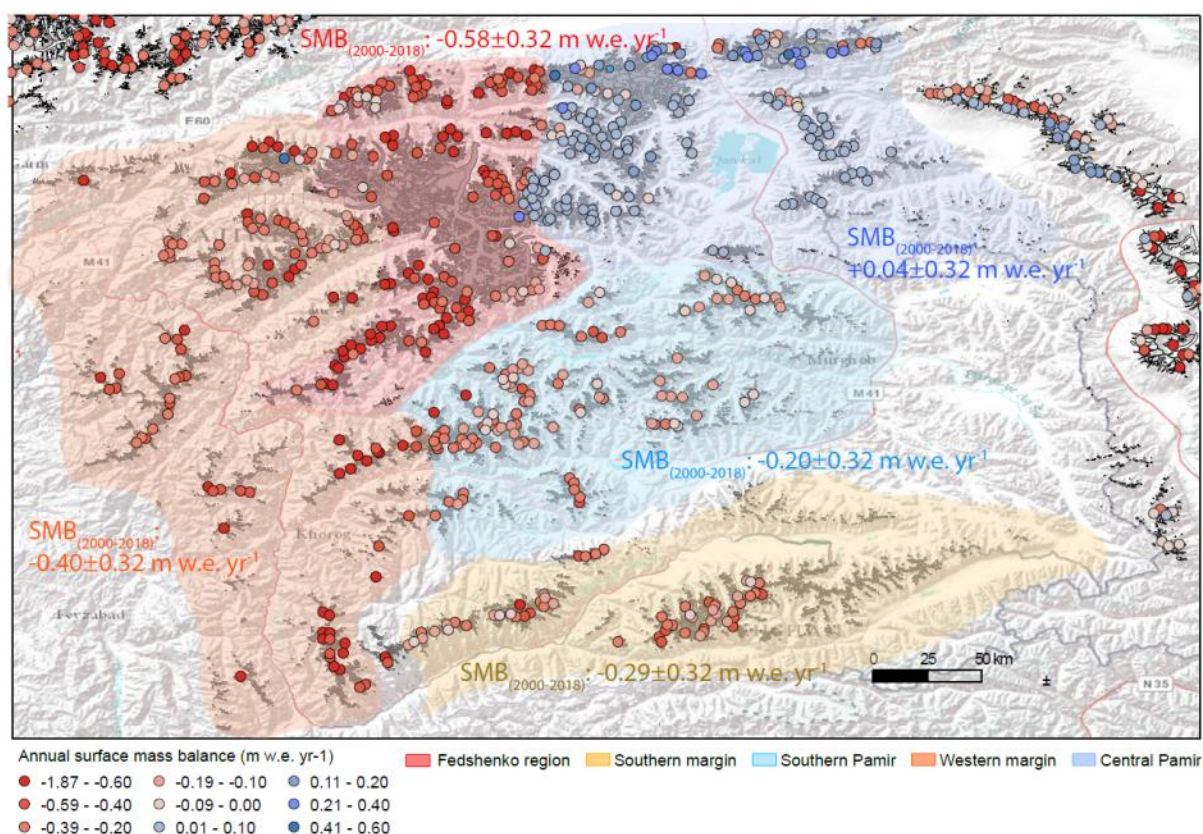


Рисунок 1.10. - Годовой баланс поверхностной массы для каждого ледника площадью более 2 км² на Памире. Субрегионы со схожим балансом массы были предложены в работе Barandun et al., в которой подчеркивается сильный контраст в режиме ледников, реакции и чувствительности климата [59]

«Наблюдения, сосредоточенные на изменениях площади ледников и потери площади на различных водосборах показывают, что в течение 20 века ледник Саукдара отступил на 2 км., в некоторых бассейнах площадь ледников за 50 лет сократилась на 25-30%, ледники Гиссар-Алая отступают неоднородно» [24, 77].

Измерения баланса массы в Таджикистане возобновились лишь в последние годы. Мониторинг ведётся для ледников Якарчи, ГГП, №383, Зулмарта и №457. Мониторинг в бассейне озера Ховаркуль улучшит понимание изменений на Восточном Памире. Устойчивость и расширение сети мониторинга должны иметь наивысший приоритет для более точного понимания происходящих процессов на ледниках.

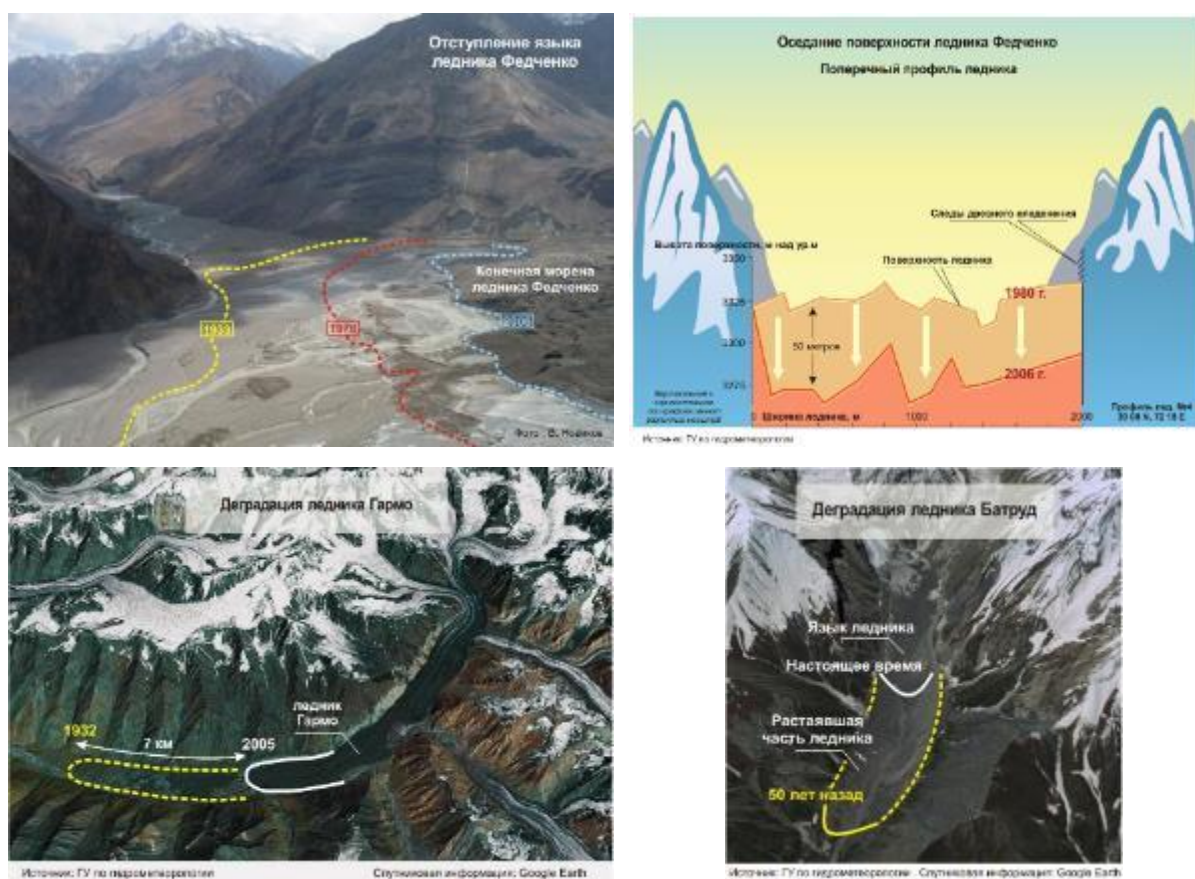


Рисунок 1.11. - Вверху слева) Отступление ледника Ванджях 1933-2006 гг., вверху справа) Оседание поверхности ледника Ванджях 1980-2006 гг., внизу слева) Отступление ледника Гармо и внизу справа) Отступление ледника Батруд [24].

В ледниках бассейна озер Ховаркуль наблюдается чрезвычайно высокое положение фирновой линии в среднем 5200 м и максимальное

5600 м. Дело в том, что западный, основной воздушный поток, теряет большую часть своей влаги над горными цепями Западного Памира. Последним высоким барьером на пути этого потока влаги перед проникновением в район является меридиональный хребет Зулумарт, на склонах которого, вероятно, выпадает наибольшее количество осадков в этой области.

В результате высокого расположения фирновой линии в районе, где хребты поднимаются выше 5000 м, ледники находятся в относительно узком высотном поясе гор. Средний вертикальный диапазон оледенения составляет 480 м, и, несмотря на большие абсолютные высоты, развитие оледенения ограничено чрезвычайно сухим климатом [1]. «В бассейне озера Ховаркуль и реки Маркансу находится 436 ледников, каждый из которых имеет размеры более 0,1 км² и занимает общую площадь 566,2 км². Помимо этого, 196 ледников меньше 0,1 км² занимают общую площадь всего 8,8 км² на состояние 2018 года» [1-А].

«Ледники в бассейнах озера Ховаркуль и реки Маркансу имеют различные размеры. Тем не менее, существует общая закономерность для всех участков рассматриваемой территории: 60-70% всех ледников составляют мелкие ледники площадью до 0,5 км², а более 80% составляют ледники площадью менее 1 км². В районе всего семь крупных ледников с площадью более 10 км², но, несмотря на их небольшую численность, они составляют около 40% общей площади оледенения, которая составляет 210,3 км²» [1-А].

«Очень показательно, что в центральном районе, где ледники располагаются на склонах коротких хребтов, ориентированных самым различным образом, 80% ледников, занимающих 87% площади оледенения района, «выбрали» северные румбы. Лишь 13 ледников здесь обращены на восток и запад, а ледники с экспозициями южных направлений вообще отсутствуют. На западном склоне Сарыкольского хребта западной экспозиции принадлежит лишь 17,4% площади оледенения, в то время как

северным румбам - более 76%. В бассейне р. Музкол на северных склонах находится более 97% площади ледников. На рассматриваемой территории не так много морфологических типов ледников, как в горах Западного Памира» [1-А].

«В каждом из семи районов простые долинные и склоновые ледники составляют более 70% всех ледников. Почти 97% площади оледенения составляют все виды долинных ледников, включая крупные сложные ледники. Мелкие висячие, каровые и ледники плоских вершин составляют менее 3% общей площади» [1-А]. Морена очень редко встречается на ледниках Восточного Памира: всего 3,3% общей площади ледников этого региона находится под моренным покровом. Ледники Восточного Памира в основном отличаются стабильностью. Сравнение материалов 1946 и 1971 годов показало, что большинство ледников сохранили свои размеры и форму в течение последних 25 лет. В бассейне озера Ховаркуль только концы крупных ледников претерпели значительные изменения. Таким образом, язык ледника Володарского (№ 243-245) значительно уменьшился. Различные части конца ледника отступили неравномерно (на 100-200 м), потому что центральная, узкая часть языка, закрытая срединной мореной, более стабильна по сравнению с краями. По мере стаивания морена закрыла часть открытой поверхности ледника. Язык крупного долинного ледника № 254, который заканчивается рядом с концом ледника Володарского, также уменьшился. Край льда отступил на 100-150 м, в то время как открытая часть была уменьшена не менее, чем на 500 м. У современного конца ледника образовалось озеро, при этом берега озера частично покрыты льдом [1].

1.4. Природно-климатические условия и их влияние на динамику горных ледников

Из-за нехватки данных о балансе массы и моделирования ледников в Таджикистане ниже приведены результаты работ по измерению баланса массы и динамики оледенения ледников в других регионах, где

проводились исследования.

Баланс массы ледников и его моделирование. Исследования динамики и баланса массы ледников в различных горных регионах мира играют важную роль в понимании процессов, происходящих в криосфере под влиянием изменения климата. Основным фактором, определяющим таяние ледников, является радиационный баланс поверхности, а турбулентный теплообмен вносит значительно меньший вклад [78]. Динамика внешнего массообмена ледников тесно связана с тенденциями климатических изменений региона, что позволяет использовать данные гляциологического мониторинга для решения задач климатического мониторинга [79].

Анализ реконструкции динамики баланса массы льда и данных инструментальных балансовых измерений по 125 ледникам Северного полушария выявил метакронность в балансовой динамике девяти ледниковых районов в XX в. Продолжительность действия групп циркуляции является причиной метакронности в динамике баланса массы льда ледниковых районов [79]. Для мониторинга и прогноза состояния горных ледников и расчёта ледникового стока необходимо учитывать особенности теплообмена заморенных участков. Описана математическая модель баланса массы горного ледника с участками, покрытыми моренным чехлом [81].

Согласно оценкам, к концу XXI века произойдет значительное сокращение объёма и площади небольших ледников в различных регионах, таких как Памир и Тянь-Шань [82, 83, 84]. Применение методов геоинформационного картографирования и математического моделирования позволяет количественно оценить долю лавинного питания в зимнем балансе массы ледников без проведения детальных снегомерных наблюдений в зонах лавинной аккумуляции [83]. Существует обратная связь между долей лавинного питания и фоновой снежностью зимы: чем меньше снежность, тем большую роль приобретают лавины как компонент

прихода вещества на ледник [82].

Из проведённых исследований следует, что наблюдается деградация современного оледенения в различных регионах мира, что согласуется с изменениями климата. Этот процесс обусловлен как естественными причинами, так и антропогенными факторами.

По данным [85], деградация современного горного оледенения связана с усилением межширотного теплообмена, обусловленным уменьшением угла наклона оси вращения Земли и соответствующим усилением меридионального градиента инсоляции (инсоляционной контрастности).

Результаты моделирования [86] показывают, что основным фактором, определяющим таяние ледника Альдегонда (Западный Шпицберген), является радиационный баланс поверхности ледника, а турбулентный теплообмен вносит в таяние на порядок меньший вклад. Физико-математическая модель AMelt [79] хорошо воспроизводит прямые измерения таяния и уменьшения поверхности ледников Сары-Тор и №354 во Внутреннем Тянь-Шане. Согласно исследованию [87], в условиях реализации экстремального климатического сценария RCP8.5 к концу XXI века на Эльбрусе ожидается существенное отступление снеговой линии, сокращение площади аккумуляции и усиливающаяся деградация оледенения. Авторы [88] отмечают, что учёт бронирующей роли моренного чехла необходим для корректных расчётов ледникового стока, особенно в регионах с широким распространением данного явления.

По результатам моделирования [17] с 2004 по 2015 гг. в регионе Тянь-Шаня только один год имел положительный баланс массы ледников, а кумулятивный баланс за этот период составил -5,8 м водного эквивалента. Работа [89] посвящена оценке ледникового и суммарного стока с ледников бассейна р. Пскем (Средняя Азия) на основе анализа зависимостей этих характеристик от максимальной высоты снеговой границы также в исследовании [90] зафиксировано уменьшение площади оледенения

Камчатки на 10,6% с середины XX по начало XXI века в результате повышения летних температур воздуха и сокращения количества твёрдых осадков.

Исследование ледников дистанционным методом. В обзоре литературы рассматриваются различные аспекты изучения ледников и оледенения с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Приводятся сведения об изменении ледников в различных регионах, таких как бассейны рек Фастагдон и Искадон на Центральном Кавказе [93], бассейн ледника Зеравшанский в Средней Азии [22], хребет Черский и горы Сунтар-Хаята в Северо-Восточной Азии [92]. Отмечается, что ледники являются индикаторами изменения климата, и наблюдаемое потепление приводит к их деградации и уменьшению размеров [93, 94, 95].

Для изучения ледников широко используются данные дистанционного зондирования Земли со спутников Landsat. Эти данные позволяют определять такие характеристики ледников, как площадь, спектральное альbedo, динамика моренного покрова и пульсационных подвижек. Различные комбинации спектральных каналов космических снимков Landsat 8 применяются для анализа состояния растительного покрова, водных объектов, лесных массивов, почв и других природных объектов [91, 92, 95].

Сравнение современных данных дистанционного зондирования с архивными данными, такими как Каталог ледников СССР, даёт возможность количественно оценить изменения площадей ледников за определенный период времени. В бассейнах рек Фастагдон и Искадон на Центральном Кавказе количество ледников увеличилось с 7 в 1966 году до 15 в 2018 году, но их общая площадь уменьшилась с 4,04 км² до 3,357 км² за тот же период. В горах Сунтар-Хаята и хребте Черского площадь ледников сократилась на 19,3% и 28% соответственно с момента составления Каталога ледников СССР [93, 95].

В бассейне ледника Зеравшанский в Средней Азии по состоянию на

2017 год находилось 72 ледника общей площадью 134,67 км², а темпы деградации оледенения за период 1980-2017 гг. были почти в два раза ниже, чем за период 1957-1980 гг. (0,24% в год и 0,42% в год соответственно) [94].

Обзор литературы посвящён изучению изменений ледников в различных горных регионах России с использованием данных дистанционного зондирования Земли и сравнения с более ранними каталогами ледников. Рассматриваются изменения площади и объёма ледников Горного Алтая с середины XX века до 2008 года, при этом ледники потеряли 172,4 км² площади (27,4%), а суммарное сокращение объёма составило 8,9 км³. Для ледников Восточного Саяна составлен новый каталог по состоянию на 2000 год с использованием снимков Landsat и данных SRTM, где площадь ледников сократилась на 59±22% с середины XIX века [96, 97].

Для гор Бырранга на Таймыре проведено сравнение площадей ледников по космическим снимкам Landsat 2003 года и Каталогу ледников СССР 1967 года, показавшее сокращение площади ледников примерно на 17% за этот период [98]. В горах Кузнецкого Алатау малые присклоновые ледники сократились на 70-90%, тогда как крупные каровые и карово-присклоновые ледники отступили незначительно, а с 2005 года условия для их существования стали более благоприятными [99].

Сарана В.А. в своей работе [100] рассматривает вопрос о разграничении между многолетними снежниками и ледниками в арктических и субарктических регионах России. Он предлагает расширенное определение "малого ледника" как малоподвижного фирново-ледяного тела ниже снеговой границы, занимающего одну форму рельефа и существующего благодаря благоприятному сочетанию орографических и климатических факторов. Малые ледники разделяются на остаточные и в настоящее время большинство из них находится на стадии деградации, хотя степень деградации невелика.

Малые ледники и многолетние снежники играют важную роль в изучении изменений геосистем и климата. Чёткое разделение этих объектов необходимо для правильной оценки гляциальной обстановки и прогнозов. Критерий продолжительности непрерывного существования может быть использован для различения малых ледников и многолетних снежников. Малые ледники существуют в Кузнецком Алатау непрерывно в течение как минимум нескольких столетий, в то время как многолетние снежники могут полностью исчезать за один неблагоприятный год [101].

Современное континентальное оледенение Земли состоит из около 198 тысяч отдельных ледников общей площадью около 726 800 км². Регулярный мониторинг динамики ледников необходим, особенно для репрезентативных региональных выборок в крупных речных бассейнах. Возможности и методы определения линии равновесия объёмов аккумуляции и абляции (ELA), составляющих годовой баланс массы и альбедо с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) служат основой для автоматизированного мониторинга основных параметров оледенения. Многоспектральные изображения высокогорных территорий со спутников LANDSAT 7 ETM+, TERRA и других являются в настоящее время единственным источником регулярной информации о глобальных и региональных изменениях размеров оледенения. Тематическое дешифрирование этих изображений и обработка результатов с помощью ГИС-технологий позволяют обеспечить приемлемую точность оценок многолетней эволюции оледенения.

Освоение возможностей космических аппаратов и средств обработки ДЗЗ связано с решением теоретических и прикладных проблем гляциологии, таких как переход от удельных значений составляющих водного баланса к объёмным при региональном определении осадков, испарения, стока и водных ресурсов оледенения с учётом пространственно-временной изменчивости, а также завершение сплошной каталогизации оледенения Земли и его регулярный мониторинг [105].

Дистанционные методы, такие как профильное георадарное зондирование для определения толщины льда и формы ложа ледника, совместно с данными ДЗЗ, позволяют более точно измерять объём ледников, чем по специальным моделям [106].

Ледники являются важным источником пресной воды для Центральной Азии, высвобождая воду летом, когда осадков мало, а потребность в воде высока. Изменения массы ледников могут быть напрямую связаны с климатом и стоком, в отличие от изменений только площади. В долине Ала-Арча в Киргизском хребте на Северном Тянь-Шане ледник площадью ~ 40 км² потерял $18,3 \pm 5,0\%$ площади с 1964 по 2010 год с непрерывным сокращением во все исследуемые периоды. Баланс массы этого ледника составил $-0,45 \pm 0,27$ м водного эквивалента в год за период 1964-1999 гг. и $-0,42 \pm 0,66$ м водного эквивалента в год за 1999-2012 гг.. Общий объём льда в этой долине оценивается в $1,56 \pm 0,47$ км³ льда в 2000 году, и весь лёд может быть потерян к 2100 году при сохранении такой же потери массы [107].

Для своевременной оценки состояния горного оледенения и прогнозирования опасных гляциальных процессов разработана методика автоматизированного дешифрирования ледников по общедоступным и регулярно обновляемым данным ДЗЗ. Принцип методики заключается в выделении границ чистого и замороженного льда. Границы чистого льда выделяются на основе метода соотношения каналов. Выделение замороженного льда основано на выявлении качественных свойств ледников, таких как движение и форма в плане. Достоверность границ ледников, полученных с помощью автоматизированного дешифрирования, оценивалась путём сравнения с опубликованными каталогами ледников для исследуемой территории. Установлено, что результаты автоматизированного дешифрирования сопоставимы с каталогами как на качественном уровне (общие очертания границ, положение фронта ледника), так и на количественном (схожие значения площадей и

погрешностей). Точность дешифрирования заморенных участков выше, чем при визуальном дешифрировании, поскольку отсутствует субъективная оценка при интерпретации.

Преимуществом методов ДЗЗ является выявление основного свойства ледника – движения. Такая методика актуальна и востребована для определения границ ледников и мониторинга их состояния с целью предупреждения опасных гляциальных процессов.

Регулярный мониторинг динамики необходим, если не для всей генеральной совокупности, то, по крайней мере, для репрезентативных региональных выборок ледников в наиболее крупных речных бассейнах. Возможности и методы определения линии равновесия, объёмов аккумуляции и абляции, составляющих годовой баланс массы и альбедо служат реальной основой для автоматизированного мониторинга ряда основных параметров оледенения. Многоспектральные изображения высокогорных территорий, получаемые со спутников LANDSAT 7 ETM+, TERRA и других, являются в настоящее время единственным источником регулярной информации о глобальных и региональных изменениях размеров оледенения [108].

Профильно-площадная методика спутникового зондирования островных ледников Российского Заполярья, позволившая получить количественные и качественные оценки изменений объёма, режима и баланса массы ледников. Результаты оформлены в виде серии среднемасштабных тематических карт. Проведённые исследования позволили установить существование растущих ледников на фоне общего отрицательного характера изменений объёма, режима и баланса массы ледников Российского Заполярья. Для ледяных шапок накопление льда приурочено к вершинам, в то время как понижение поверхности приурочено к минимальным высотам [109].

Подходы дешифрирования ледников юго-западного Гиссаро-Алая, расположенных в пределах территории Узбекистана, на основе

использования разновременных космических снимков Landsat. Для идентификации ледников были использованы автоматический метод управляемой классификации, полуавтоматический метод отношения каналов и визуально-ручной метод оконтуривания ледников. Автоматизированные методы позволяют быстро выявить тенденцию изменения площади оледенения, но для анализа поведения каждого ледника необходимо использовать визуально-ручной метод идентификации границ на спутниковых данных высокого разрешения [110].

Приведённые исследования демонстрируют масштабную деградацию ледников в различных регионах. Ледник Алибек на Западном Кавказе с середины XIX века сократился в длину на 650 м, по площади на 0,67 км², а высота его конца повысилась на 110 м. На горном массиве Мунку-Сардык (Восточный Саян) ледник Радде за 120 лет потерял 0,31 км² площади и уменьшился в длину с 1 до 0,4 км, а его объём сократился в 3 раза. На массиве Мунку-Сардык и хребте Карлыктаг (Восточный Тянь-Шань) ледники сократились, но с разной скоростью, при этом отмечались аномальные увеличения в 2013 и 2021 годах [102, 111]. Составление баз данных ледников, таких как на плато Путорана, важно для отслеживания их динамики, которая показывает общую тенденцию сокращения [112]. После катастрофы 2002 года язык ледника Колка (Кавказ) за 2014-2017 гг. продвинулся вниз по долине на 50-70 м, а его объём увеличился на $7,4 \pm 1$ млн. куб. м [113]. На архипелаге Новая Земля среднегодовая скорость отступления ледников в 2001-2015 гг. удвоилась по сравнению с 1959-2001 годами, а в 2016 году из-за аномальной жары ледники потеряли площади в 3 раза больше среднегодовой нормы [114]. Таким образом, приведённые примеры свидетельствуют о значительном сокращении ледников в различных регионах Мира за последние десятилетия и столетия.

Геодезические наблюдения и применение дистанционного зондирования для изучения динамики ледников в различных горных

регионах Мира позволяет получать точные данные об изменениях площади и объёма ледников в связи с изменением климата. Комплексное использование наземных и спутниковых методов обеспечивает баланс между точностью, производительностью и безопасностью при исследовании ледников [115]. Применение беспилотных авиационных систем и геоинформационных технологий перспективно для изучения динамических характеристик ледников [116]. Данные дистанционного зондирования и профльно-площадная методика позволяют картографировать и количественно оценивать изменения оледенения [117]. На примере ледника Алибек показана корреляция между повышением температуры и уменьшением площади ледника, а также эффективность индекса NDSI для интерпретации космоснимков [102]. Наблюдаются значительные сокращения площадей и объёмов ледников на Северо-Востоке России в последние десятилетия, особенно на Дальнем Востоке, вследствие роста температур [107,118]. Изменение теплоприхода, отражаемое среднелетней температурой, оказывает наибольшее влияние на динамику ледников, что подтверждается данными по леднику Томич [119].

Систематическое наблюдение ледников с использованием комбинации наземных и спутниковых методов необходимо для прогнозирования будущих изменений оледенения и связанных с ними гидрологических процессов.

1.5 Современные методы наземного изучения и дистанционного зондирования горных ледников

Основные методы изучения горных ледников включают: геодезическую съёмку для измерения изменений объёма и площади ледника, бурение льда для анализа его структуры и состава, измерение скорости движения ледника с помощью GPS-датчиков, спутниковую съёмку для мониторинга изменений площади ледника, аэрофотосъёмку для создания детальных карт поверхности, лидарное сканирование для построения трёхмерных моделей рельефа, радиолокационное

зондирование для определения толщины льда, сейсмическое профилирование для изучения внутренней структуры ледника, измерение баланса массы ледника (накопление и таяние), анализ ледникового стока и химического состава талых вод, анализ ледниковых кернов для изучения палеоклимата, создание математических моделей динамики ледников, прогнозирование будущих изменений на основе климатических сценариев.

Полевые исследования

Основным и самым важным в исследовании ледников являются полевые (экспедиционные) наблюдения, это позволяет получать наиболее точные данные о текущем состоянии ледников, способствующие более глубоко вникнуть в процессы, происходящие на ледниках. Полевые исследования позволяют определить толщину ледника, динамику его таяния и поверхностное движение, что даёт возможность более точно определить его нынешнее состояние и спрогнозировать.

Одним из важных параметров ледника является его толщина, используя в будущем изменения полевых исследованиях георадары, можно определить толщину ледника и его внутреннюю структуру, а для определения поверхностного рельефа и границ ледников можно использовать различные GPS устройства и в совокупности эти данные дадут характеристику и свойства ледника, эти данные позволяют более качественно проводить другие наземные исследования, например для проведения измерения баланса массы ледников [120, 121].

Одним из методов исследования ледников, который показывает межгодовую изменчивость, это измерение баланса массы ледника. Для этого измерения необходимо определить накопление снега в зоне аккумуляции, путём копания шурфа и измерения его плотности, а также с помощью абляционных реек определяется его таяние. После получения данных о накоплении снега и абляции ледника рассчитывается баланс массы. Для получения наилучших результатов прогнозирования будущих изменений баланса массы ледника в контексте изменения климата

используются именно данные наземных полевых работ [122, 123].

Движение ледника является одной из важных характеристик ледника, для её изучения также применяются методы дистанционного зондирования. При изучении оптических и многоспектральных спутниковых снимков возможно определить скорость и направление движения ледника. Можно также использовать наземные маркеры для изучения движения ледника, при комплексном использовании этих данных можно получить наиболее точную информацию о скорости движения и её направлении, что позволит улучшить оценку баланса массы [124, 125, 126]. Применяя вышеуказанные методы, можно получить всестороннее представление о состоянии ледников, что для понимания реакции ледников на изменения климата очень важно.

Дистанционное зондирование земли

На сегодняшний день одним из важных методов, применяемых в изучении ледников, является дистанционное зондирование, так как этот метод позволяет за короткий период проанализировать многолетние изменения в ледниках используя разновременные спутниковые снимки, а также проводит мониторинг в труднодоступных высокогорных местностях.

Используя спутниковые снимки высокого разрешения, например Sentinel-2 с разрешением до 10 метров, можно проводить оцифровку контуров ледников, а также проследить за динамикой языковой части ледника при отступлении или пульсации. Одним из основных преимуществ использования данного метода является исследования ледников в труднодоступных местах, где традиционные методы исследования недоступны особенно на крупных ледниках, например ледник Таджикистан, Медвежий, Октябрьский и других подобных ледниках.

Используя спутниковые снимки разных годов, даёт возможность проводить измерение динамики площади ледников без наземных

изысканий что значительно упрощают работу и уменьшают затраты позволяя проводить измерение динамики ледников, даже в труднодоступных высокогорных районах оледенения. Исследования ледников с применением спутниковых снимков не ограничивается горными ледниками, подобные методы применяются и для исследования ледниковых щитов в Арктике и Антарктиде.

Использование методов дистанционного зондирования с применением спутниковых снимков позволяет расширять границы понимания происходящих процессов на ледниках и проводит параллели с изменением климата для лучшего понимания будущего состояния водных ресурсов. [127, 128]

Другим методом ДЗЗ является применение радиолокационных и лидарных технологий, которые являются важными в изучении структуры ледника, определение внутреннего строения ледника, ложа на которой располагается ледника являются важными для прогнозирования поведения ледников. Радиолокационные технологии которые позволяют определить толщину и подземный рельеф ледников позволяет с высокой точностью определить объём ледника, такой метод конечно же трудно применить ко всем существующим ледникам однако этот метод позволяет скорректировать многочисленные модели и формулы которые предназначены для определения объёма ледников в больших ледниковых бассейнах, такие уточнённые данные позволяют наиболее точно оценить запасы пресной воды в ледниках [129].

Интегрирование различных методов ДЗЗ в исследования ледников позволяет получить комплексные параметры ледников, которые необходимы для фундаментальных исследований ледников [130].

Моделирование ледников

В условиях изменения климата моделирование играет ключевую роль в прогнозировании поведения ледников, так как это необходимо для понимания будущего состояния ледников. Это понимание необходимо для

проведения адаптационных мер, так как ледники играют очень важную роль в регионах, где в вегетационный период сток рек зависит от ледников. В моделировании ледников учитываются такие важные параметры как температура воздуха, осадки, топография местности и физические свойства ледника. В зависимости от климатических сценариев возможно спрогнозировать поведение динамики и эволюции ледников [131, 132]. Другой очень важный фактор, который требует моделирования это движение ледника, то есть процессы, при которых происходит деформация и течение ледника. Эти процессы основаны на физических законах, которые описывают поведение ледника под воздействием гравитации и других сил, которые влияют на эти процессы. Данные модели являются также важными, так как помогают в понимании реагирования ледника на изменяющийся климат и как эти ледники влияют на окружающую среду [133, 134].

Одним из важных аспектов при моделировании является определение количества воды высвобождающейся при таянии ледников, проведение подобных моделирований очень важно для определения доли талой ледниковой воды в речном стоке и вклада таяния ледников в повышение уровня мирового океана. Для этого применяются модели баланса массы ледников, которые учитывают накопление снега и таяние льда. Так как в современном мире набирает популярность использование моделирования в управлении речными системами, модели становятся более сложными и точными. Современные модели учитывают региональные особенности и прогнозируют для отдельных ледниковых систем, что очень удобно для разнообразных горных систем, где расположены ледники. Это очень важно, так как в различных регионах вклад талой ледниковой воды в речных системах осуществляется по-разному. Очень важным аспектом в моделировании является понимание неопределенности, современные исследователи также работают над её улучшением. Для этого необходимо проанализировать множество различных неопределенностей и определить

их влияние на прогнозы. Этот подход помогает увеличить точность и качество моделей при прогнозировании изменения ледников [131, 135, 136].

Химические и изотопные исследования

Одним из важных направлений для изучения климата в прошлом являются химические и изотопные исследования ледяных кернов с ледников, эти исследования также важны для определения антропогенного воздействия на окружающую среду и ледники. Изучая ледяные керны, можно проводить реконструкцию климата в прошлом и определить историю накопления снега в ледниках. Такие учёные, как Dansgaard [137] провели исследования и заложили основу для использования стабильных изотопов в снежных и ледовых кернах как индикаторов климатических изменений.

Проведение изотопного анализа позволяет, изучить ледяные керны и определить в них тысячелетнюю историю климата, соотношение стабильных изотопов кислорода и водорода во льду дают возможность определить температуру влажность и источник атмосферной влаги в прошлом. Этот метод широко применяется в исследования ледников, по всему миру начиная с ледниковых щитов в Гренландии и Антарктиды, заканчивая в горных ледниковых системах Памира и Тянь-Шаня [137, 138].

При изучении химического состава ледников, открывается возможность изучения воздушных потоков и перемещение загрязняющих веществ по всему миру. Так как на ледниках оседают частицы пыли, при их изучении можно определить влияние антропогенных воздействий на загрязнение воздуха. Результаты подобных исследований показывают, что динамика изменения тяжёлых металлов и других, загрязняющих веществ не всегда рукотворна человеком. Встречаются моменты, в которых доказано что загрязнение воздуха также может быть природным. Подобные исследования важны для понимания и оценки воздействия

человека на природу и для лучшего понимания будущего. Подобные исследования проводились в Гренландии, которые позволили определить как антропогенные, так и природные источники загрязняющих веществ.

Палеогляциологический метод исследований

Палеогляциология даёт нам возможность изучить тысячелетнюю историю древнего оледенения и ее динамику. Каменные валуны скатываются с вершин гор на ледник и при движении ледника накапливаются у боковых сторон и фронтальной части ледника, создавая тем самым моренное отложение. За многие тысячелетия было несколько этапов потепления и похолодания климата и это можно увидеть на древних и современных моренных отложениях, границы которых четко разделены. Именно эти отложения и рассказывают о прошлом ледника и являются объектами для исследований истории ледников [141, 142].

Палеогляциология позволяет нам датировать моренные отложения и тот что факт что обычно имеются моренные отложения разных временных периодов, это позволяет определить время накопления каждой из морен. Тем самым можно получаем хронологию динамики ледника с датами от моренных отложений за многие тысячелетия. В палеогляциологии имеются разные методы проведения исследований и основными из них являются радиоуглеродное датирование, который позволяет определить органические материалы возрастом до 50000 лет, и анализ космогенных изотопов позволяющий определить возраст горных пород, которые подвергались многолетними космическими излучениями.

Из за реакции ледников на изменение климата, проведение палеогляциологических исследований позволяет, получить исторические данные о динамике ледников с относительно точным времени их отступления а также привязать эти данные к климатическим изменениям, что позволить проводить реконструкцию тысячелетней истории климата на земле [141-144].

Информация о прошлом ледников очень важна для понимания

будущего состояния ледников, так как динамика ледников имеет тысячелетнюю историю и полегляциологические методы исследований позволяют проводить параллели между динамикой ледников и изменением климата. Это способствует принятию стратегических решений для будущего пользования водных ресурсов, что является основным фактором исследования ледников.

В данной работе были использованы методы дистанционного зондирования, которые позволили определить состояния оледенения бассейна озера Ховаркуль и определить изменение площади оледенения. Для определения межгодового состояния ледников были использованы гляциологические методы для измерения баланса массы и её моделирования.

1.6. Обоснование выбора объекта исследований

Анализ имеющихся источников свидетельствует, что Восточный Памир на данный момент остаётся белым пятном в гляциологии, так как на данной территории фундаментальные исследования ледников не проводились. Проведение измерения баланса массы ледников на данной территории открывает мировому научному сообществу понимание о климатических процессах, которые происходят на высокогорных территориях. Восточный Памир уникален по своему географическому положению и климатическому характеру, несмотря на то, что на данной территории выпадает очень мало атмосферных осадков, здесь расположены большие ледники длиной более 15 километров. В совокупности все эти факты привлекают внимание мировых учёных к процессам, происходящим в криосфере данной территории.

Учитывая вышеуказанную ситуацию, было принято решение проводить на Восточном Памире в бассейне озера Ховаркуль фундаментальные исследования, в том числе и измерение баланса массы ледника №139 (Восточный Зулмарт) для определения динамики ледника в условиях изменяющегося климата. Особенности выбора данного ледника

закljučаются в том что, не каждый ледник по своим характеристикам и доступности подходит для постоянных наблюдений, а ледник №139 был выбран из-за своей уникальной характеристики и удобному расположению. На данном леднике с 2018 года проводятся ежегодные измерения баланса массы и другие исследования для лучшего понимания климатических процессов, происходящих на данной территории.

Выводы по первой главе

1. Таджикистан и горы Памира являются уникальной территорией, где формируется основной сток реки Амударьи и этот факт говорит о том, что проведение фундаментальных исследований криосферы на данной территории является не только приоритетом для Таджикистана, но и для всего региона Центральной Азии.

2. Мировые данные показывают ускоренную тенденцию таяния ледников по всему миру за последние десятилетия, ситуация усугубляется резким демографическим ростом и эти факты указывают на кризис в водном секторе в ближайшем будущем, если не будут приняты соответствующие меры.

3. Применение различных методов при изучении криосферы дают нам возможность понимания климатических процессов для своевременного прогнозирования будущего состояния оледенения. Это в свою очередь способствует проведению правильных адаптационных мер по сокращению негативного влияния изменения климата.

4. В результате изучения литературы установлено, что на ледниках Восточного Памира за последние 50 лет фундаментальные исследования не проводились. А измерение баланса массы ледников не проводилось вовсе. Поэтому изучение и исследование данной темы считается актуальным.

ГЛАВА 2. ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА

2.1. Современные технологии и технические средства исследования ледников

ГИС представляет собой компьютерную систему для сбора, хранения, анализа и визуализации пространственных данных [145]. Геоинформационная система (ГИС) состоит из аппаратного и программного обеспечения, она предоставляет географические данные и методы их обработки, географические данные в ГИС предоставляются в векторном и растровом формате. Векторные данные отображают информацию в виде точек, линий и полигонов, а растровые данные представляют собой ячейки с числовыми значениями [146-148].

Сбор данных для работы в ГИС может быть осуществлён различными способами такими как, Дистанционное зондирование, оцифрованные бумажные карты, GPS устройствами и многими другими смежными методами. Специальные пространственные структуры базы данных позволяют хранить полученные данные с устройств и их обработать. Анализ данных в ГИС осуществляется пространственными операциями, например такими как, буферизация данных, наложение слоёв и анализ схожести. А также ГИС предоставляет возможность сетевого анализа например, поиск оптимальных маршрутов или распределение ресурсов [149-151].

Визуализация данных в ГИС осуществляется путём создания карт, использующих методы тематической картографии [152]. ГИС широко применяются в различных областях, включая землепользование и планирование, экологический мониторинг, управление стихийными бедствиями, транспортную логистику и многие другие. [153]

2.1.1. Область применения дистанционного зондирования земли при исследовании ледников

Расшифровка ледников проводилась путём анализа спутниковых снимков (Landsat 2-5-7-8, загруженных с портала earthexplorer.usgs.gov) [154]. Идентификация ледников с использованием дистанционного зондирования имеет свои особенности, и для изучения ледников бассейна озера Ховаркуль это было учтено. При идентификации ледников данного бассейна были выбраны спутниковые снимки конца августа и начала сентября, так как в это время ледники данного бассейна полностью освобождены от сезонного снежного покрова (таблица 2.1). А также были учтены облачность на спутниковых снимках, которые препятствуют идентификации ледников и максимальная облачность для каждого спутникового снимка не превышала 10% [95, 98, 155].

Перед тем как приступить к оцифровке ледников, было проанализировано множество спутниковых снимков для определения спутниковых снимков наилучшего качества. Выбранные спутниковые снимки были обработаны в ArcGIS, и с помощью функции `composite bands` были объединены SWIR, NIR, RED каналы для лучшей визуализации ледниковых объектов на спутниковых снимках. Автоматический метод состоял из нескольких этапов, которые включали в себя, классификацию наземных объектов с помощью соответствующей функции в которой были определены ледники и остальные объекты на поверхности, всем объектам на спутниковом снимке было присвоено одно значение а ледникам соответственно другое значение и тем самым была получена изображение где в растровом формате были отображены все ледники. Далее с помощью функции `raster to polygon` растровый снимок был преобразован в векторный с контурами ледников. Был проведен комплексный анализ всех данных для минимизации ошибок и повышение точности при идентификации и определении контуров ледников.

Таблица 2.1. - Спутниковые снимки, использованные в работе

Тип спутника	Дата съёмки	Комбинация каналов
Landsat 02 MSS	1977.09.28	SWIR-NIR-RED
Landsat 05 MSS/TM	1994.09.01	SWIR-NIR-RED
Landsat 05 MSS/TM	1998.09.12	SWIR-NIR-RED
Landsat 07 ETM+	2008.07.29	SWIR-NIR-RED
Landsat 08 OLI/TIRS	2018.09.03	SWIR-NIR-RED
Sentinel-2	2015-2018	SWIR-NIR-RED
SRTM	2000	
ALOS PALSAR	2006-2011	

Для улучшения качества результатов при исследовании ледников было применено полуавтоматический метод идентификации этот метод включает в себя автоматическую расшифровку ледников с использованием инструментов на основе обучение и далее для улучшения точности контуров ледников в ручным экспертным методом были исправлены такие недочеты которые встречаются в автоматической идентификации ледников как, затенённые области, сезонный снежный покров а также поверхностная марена. Исследования показывают, что подобный комплексный метод повышает достоверность и является наиболее практичным в использовании [106, 156, 157].

Несмотря на широкое применение автоматического метода определения контуров ледников с использованием спутниковых снимков, данный метод обладает также недостатками, которые требует решений. Основными недостатками при автоматической идентификации ледников является затененные области, где под тенью, может находиться ледник а автоматический метод не позволяет определить такие участки как ледник, а также другой проблемой при автоматической идентификации ледников является сезонный снежный покров, при исследовании ледников данной территории были определены некоторые года с сезонным снежным

покровом который из за относительно холодного лета за летний период полностью не растаял, и в исследовании спутниковые снимки данных периодов были исключены. Исходя из вышеперечисленного оптимальным вариантом для идентификации ледников является полуавтоматический метод с доработкой данных ручным экспертным методом, что позволяет скорректировать области с затенением и сезонным снежным покровом получить наиболее точные данные о ледниках в сложных горных условий Восточного Памира.

Для определения высот использовались радарные снимки ALOS 2007 года, полученные с электронного ресурса «<https://search.asf.alaska.edu>» [158]. Радарная съёмка проводилась в L-диапазоне с пространственным разрешением от 7 м. до 100 м. в зависимости от режима съёмки. С использованием функции создания класса линейных объектов изолиний из растровой поверхности в программе ArcGIS 10.5 были построены гипсометрические линии высот [118].

2.2. Гляциологические исследования: выбор направления изучения ледников

Гляциологические исследования - это важная область науки, изучающая ледники и их взаимодействие с окружающей средой [161].

В зависимости от целей исследования и существующих возможностей, которые имеются для проведения научных работ, по изучения ледников определяется метод, который будет применяться для достижения поставленных задач. Если планируется проведение исследований по определению динамики ледников, деформации движение и факторы, влияющие на это применяется метод дистанционного зондирования с анализом климатических изменений, однако если планируется измерение баланса массы ледников, определение процессов аккумуляции и абляции ледников, а также их влияние на общий объём ледника то необходимо проводить гляциологические исследования и лучшим вариантом является проведения наземных работ непосредственно

на леднике. Также при проведении наземных работ важным считается проведение гидрологических исследования ледникового стока что является важным компонентом для корреляции данных с гляциологическим методом измерения баланса массы ледника.

Для достижения наилучших результатов в области изучения ледников применяется комплексные исследования с применением наземных исследований, а также использование дистанционного зондирования и применение различных гидрологических и гляциологических моделей, которые дают возможность, получить базу знаний, которые можно использовать для принятия решений по устойчивому развитию. Выбор конкретного направления зависит от научных интересов, доступных ресурсов и специфики региона исследования [168]. Многие современные гляциологические исследования носят междисциплинарный характер, объединяя различные области знаний [169].

Баланс массы ледников - взаимодействие оледенения и климата

Исследование выполнялось в соответствии с широко используемой методикой, проверенной годами практики мировых исследователей [170]. Перед началом проведения работ по измерению баланса массы ледника появилась необходимость получить первоначальные данные о леднике, который позволил бы определить характеристики ледника для лучшего понимания объекта исследования. Для этого с использованием спутникового снимка Sentinel-2A 2019 года и программы ArcGIS была построена схема ледника, определена его площадь, с использованием радарного снимка SRTM были добавлены изолинии, а также создана трехмерная модель ледника №139 для лучшего понимания рельефа поверхности ледника. Создание трехмерной модели ледника является одним из важных подходов для изучения баланса массы ледника, так как при определении баланса массы и динамики ледника важную роль играет топография ледника, склоны питающие ледник лавинным питанием, склоны расчленение притоков ледника которые также влияет на скорость ледника

и трехмерная модель позволяет детально изучить структуру ледника и повысить знания о леднике при определении баланса массы.

Трёхмерная модель ледника обогащает исследование географических объектов, обеспечивая более глубокое понимание и возможность проведения детального анализа его характеристик и изменений.

Исследования ледника проводились с использованием прямых гляциологических измерений, позволяющих измерить только количественный, поверхностный баланс массы [170, 7-A]. Обычный метод определения баланса массы включает измерение аккумуляции и абляции на поверхности ледника с учётом горизонта таяния предыдущего года. Толщину и плотность снега и фирна в зоне аккумуляции обычно исследуют в шурфах, а абляцию ледника определяют с помощью реек, исходя из предположения, что плотность льда составляет около 900 кг м^{-3} . Важно проводить измерения в репрезентативных точках, особенно на ледниках с большими труднодоступными участками.

Процесс исследований включал два этапа: проведение полевых изысканий (рисунок 2.1) и камеральную работу по подсчёту баланса массы ледника. Полевые исследования включали выполнение следующих работ.

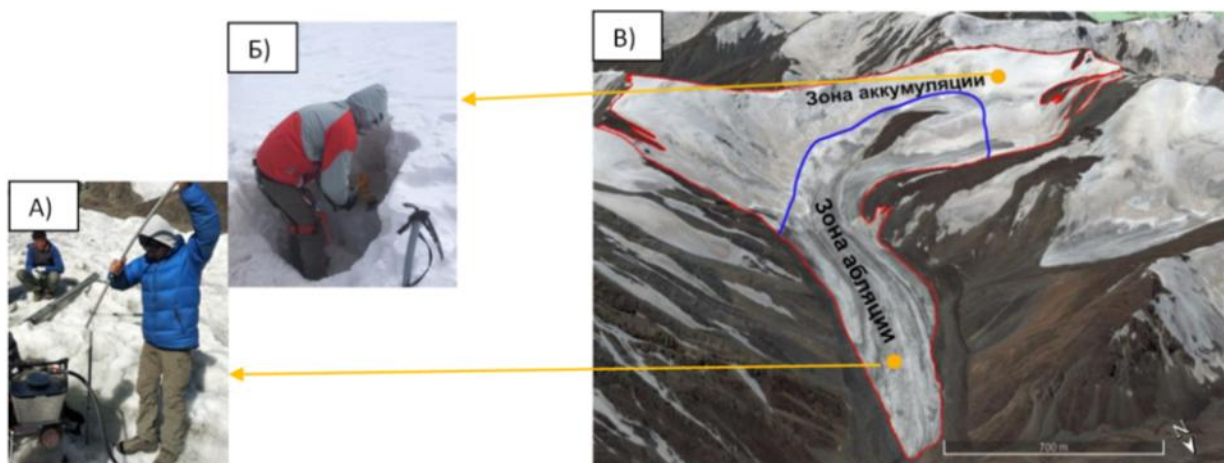


Рисунок 2.1. - Основные методы полевых работ: А) Рейка в зоне абляции; Б) Шурф в зоне аккумуляции; В) Зоны абляции и аккумуляции ледника (снимок Google Earth)

Работы в зоне абляции

В 2018 году на заранее определённых точках, идентифицированных удалённо, было размещено 7 реек на глубину 4 и 6 метров для измерения абляции (рисунок 2.1 А). Рейки для оценки потери массы в зоне абляции ледника были установлены с использованием паробура (рисунок 2.2 А) на дату 05.08.2018 года. В 2019 году 5 августа были получены данные с реек (рисунок 2.4. А, Б), и затем были переустановлены новые рейки.

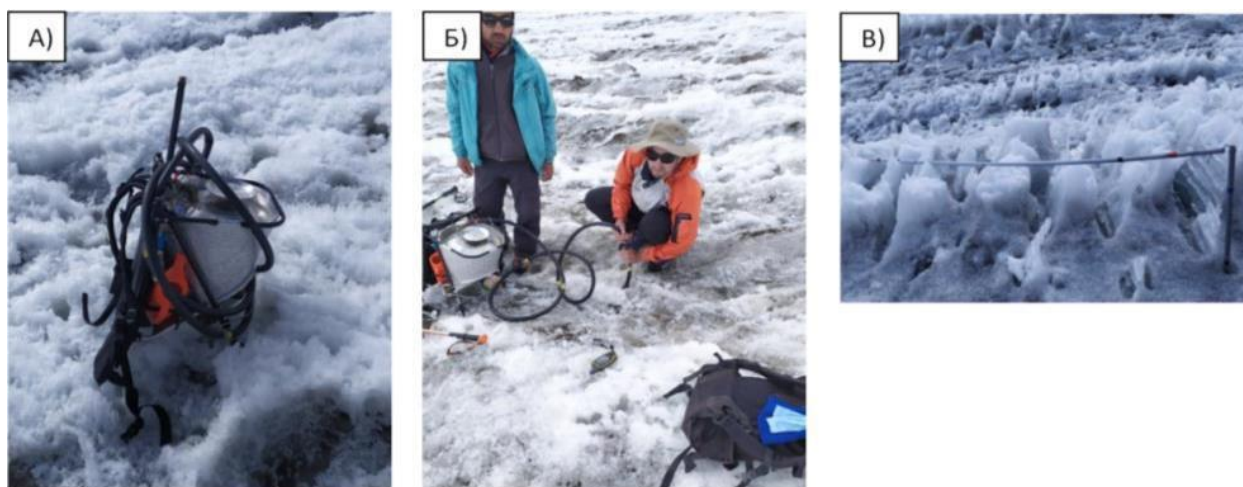


Рисунок 2.2. - Проведение полевых работ в зоне абляции: А) Паробур; Б) Установка реек; В) Рейка 2018 года

Работы в зоне аккумуляции

Результаты работ в зоне аккумуляции дали возможность получить информацию о плотности и высоте снежного накопления (рисунок 2.3).

Предполагаемая зона работ была определена на основе данных дистанционного зондирования и полевых изысканий, на данном леднике был выкопан один шурф. После выбора места проведения изысканий 05.08.2018 года на высоте 5315 проводилось раскапывание шурфа до прошлогоднего снега (который более плотный и постепенно превращается в фирн). Затем измерялась высота, которая составила 93 см и плотность снега (плотность определялась с использованием снегомера ВС-43). Снег брался вдоль шурфа в цилиндре и взвешивался для определения объёма и

веса снега для последующего расчёта плотности (рисунок 2.3 Б) в соответствии с методиками Ostrem, и Jackson [171, 172].

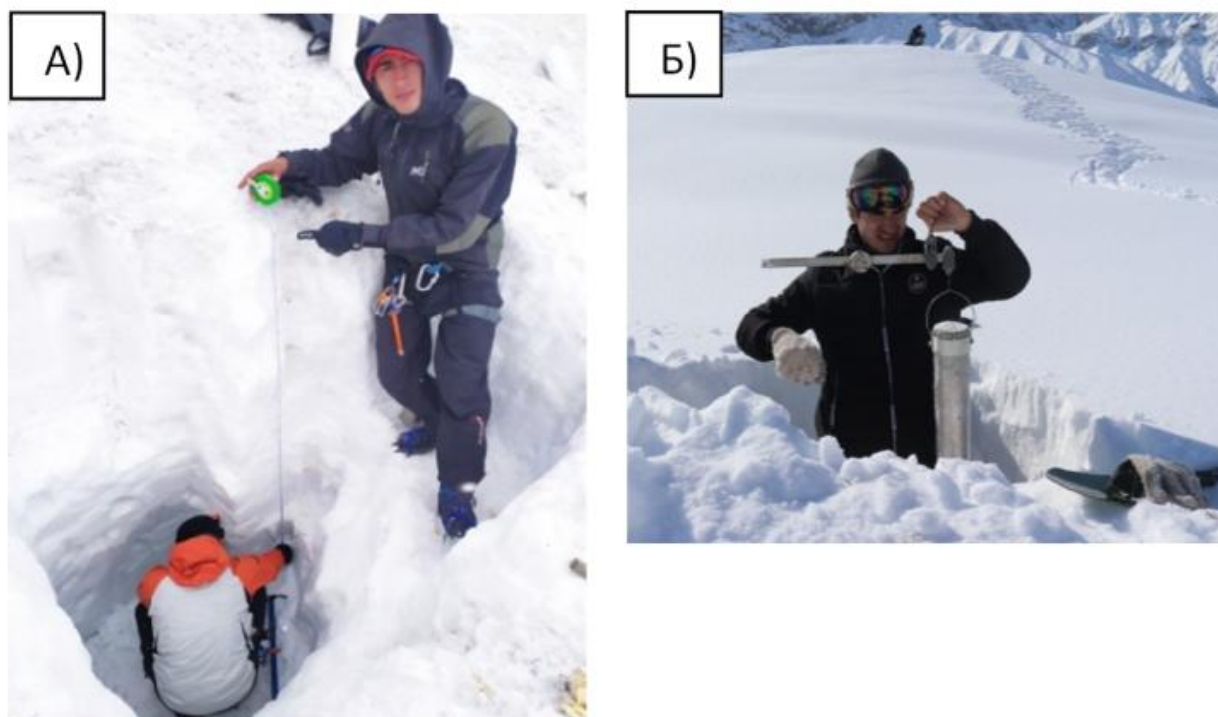


Рисунок 2.3. - Основные понятия полевых работ в зоне аккумуляции: А) Шурф в зоне аккумуляции; Б) Использование снегомера

Использование метода контурных линий для расчёта годового баланса массы ледника

«Для расчёта баланса массы ледника было выявлено среднее значение баланса массы для каждой области и определена их площадь (рисунок 2.4 Б,В). Затем полученные значения баланса были умножены на соответствующие значения площади полей (рисунок 2.4 Г, Д). Сумма результатов была поделена на общую площадь ледника» [7-А].

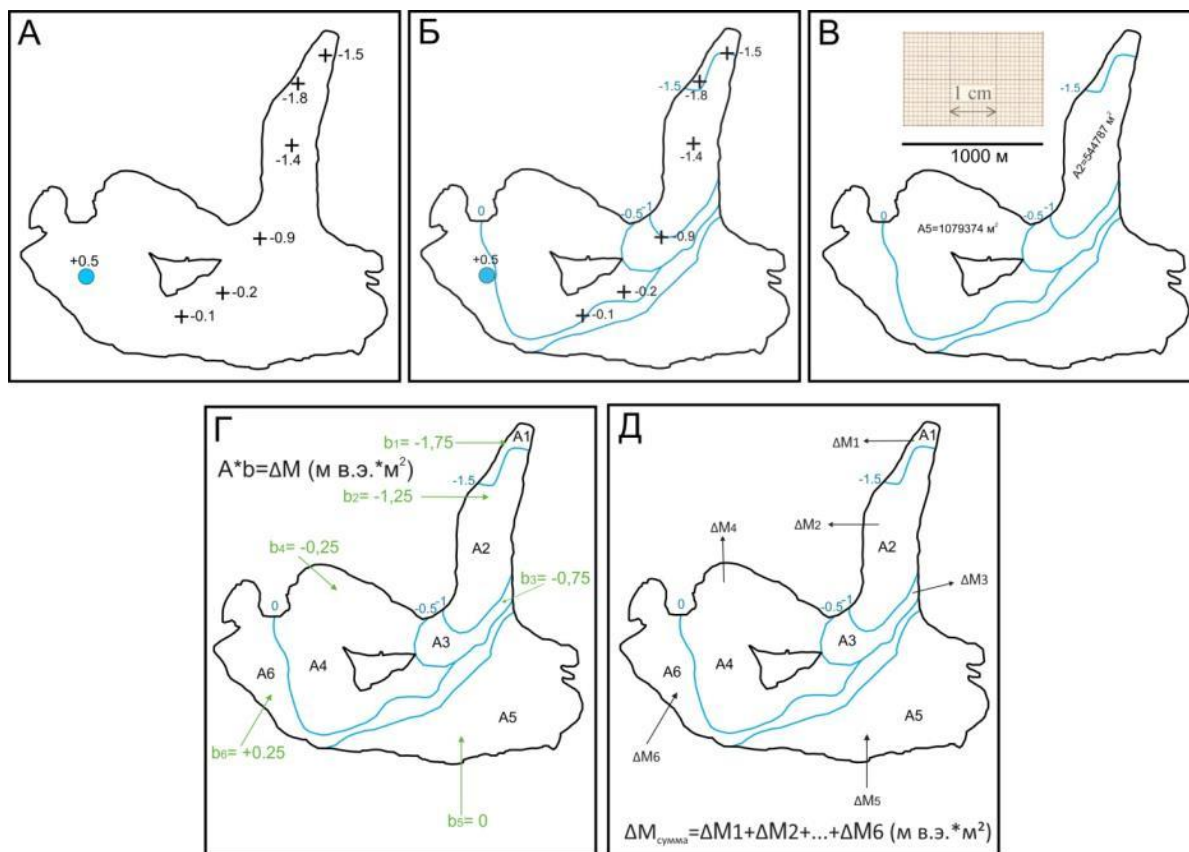


Рисунок 2.4. - Метод контурной линии – схематическое суммирование: А) Включение точечных измерений на карту; Б) Линии между точек; В) Вычисление площади каждого поля; Г) Определение среднего баланса массы для каждой области; Д) Вычисление баланса массы для каждого поля [7-А].

На основе полученных данных была построена подробная карта ледника с линиями равного баланса массы.

«На данном леднике с 2018 года было проведено шесть экспедиций. Каждый год устанавливались новые абляционные рейки, а также проводилось раскапывание шурфов в зоне аккумуляции. Полученные данные подвергались расчётам и последующей обработке в программе ArcGIS» [2-А].

Для анализа баланса массы применялись два метода: профильный метод и метод изолиний.

Профильный метод основан на изменении локальных значений баланса массы в зависимости от высоты. Метод изолиний баланса массы заключается в интегрировании по всей площади ледника.

«Используя профильный метод мы анализировали баланс массы для

каждого 100-метрового интервала высот, каждый из которых имел свою площадь. Для области абляции определяли площадь между изолиниями как линейную регрессию, соответствующую всем ежегодным измерениям» [2-А].

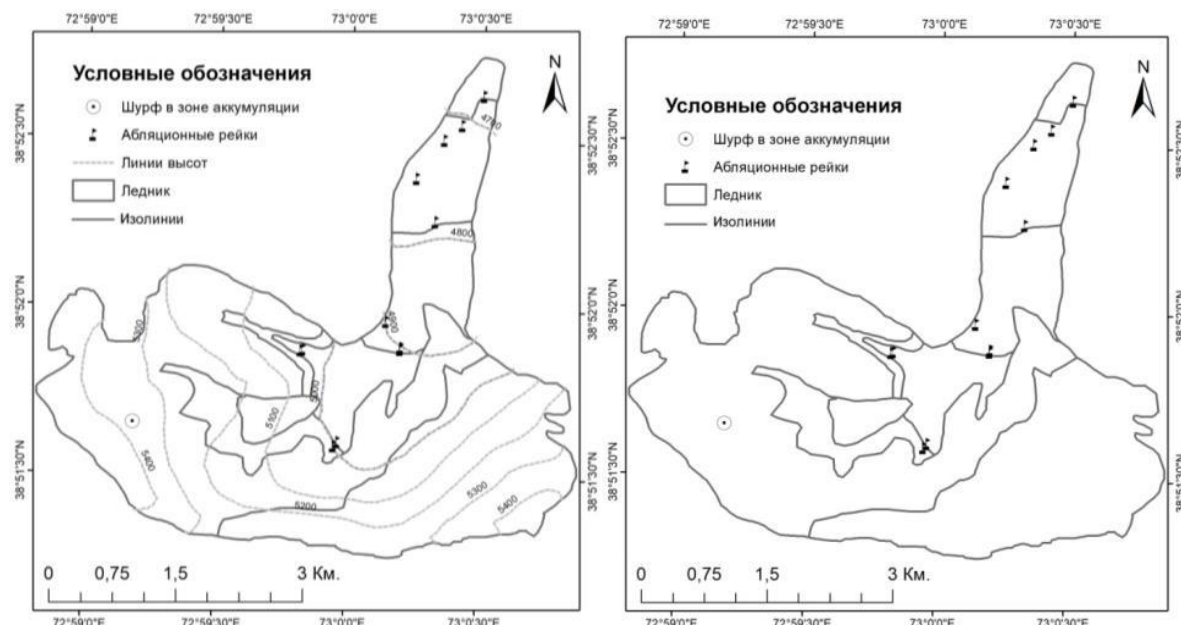


Рисунок 2.5. - Профильный метод (слева) и метод изолиний (справа) [2-А]

Для метода изолиний мы применяем равномерный интервал с шагом в 0,5 м водного эквивалента. Изолинии рисуются вручную на поверхности ледника в программе ArcGIS, а баланс массы вычисляется путём интерполяции между этими линиями [173, 174]. После этого шаблон интерполяции внимательно проверяется, и для каждой отдельной области определяется средний баланс массы [9, 175, 2-А].

2.3. Методы математического моделирования для расчёта баланса массы ледников

Рост населения и развитие экономики напрямую влияет на водопотребление и прогнозирование водных ресурсов играет важную роль для будущего. Интенсивное таяние ледников является острой проблемой для многих стран мира.

Будущее изменение климата в региональных масштабах не всегда совпадают с глобальными изменениями. Сложно прогнозировать региональное изменение климата, когда сами глобальные климатические

изменения основаны на тех или иных климатических сценариях и являются достаточно спорными. Однако страны, которые находятся в горных и предгорных регионах и социально экономические инфраструктуры, сильно зависят от использования водных ресурсов, нуждаются в научно обоснованных долгосрочных планированиях водопотребления. Для этого необходим также правильный прогноз ледникового стока, данный прогноз напрямую связан с прогнозированием изменения баланса массы ледников, который дополняется вероятным региональным климатическим изменением.

Одной из главных проблем в экстроспективных расчётах прогнозирования является отсутствие или недостаток прямых наблюдений, которые связаны с труднодоступностью и дороговизне проведения исследований [177]. Прогноз эволюции оледенения необходим для стратегического планирования и оценки риска возникновения опасных природных явлений [178].

Надёжные прогностические оценки изменения оледенения невозможны без использования методов математического моделирования [179]. Для корректного прогнозирования эволюции ледников требуется детальная информация об отклике оледенения на современные и прошлые изменения климата [10]. Такую информацию могут дать как прямые наблюдения за балансом массы, так и моделирование массообмена ледника. Математическое моделирование компонентов баланса массы ледников применяется для решения широкого круга задач [180]. Статистическое моделирование и реконструкция сезонных объёмов речного стока и составляющих годового баланса массы ледников могут быть использованы при проектировании ГЭС, обосновании строительства водохранилищ, многолетнего регулирования стока, совершенствовании методов сверхдолгосрочных гидрологических и гляциологических прогнозов, а также для развития информационной и научно-методической базы региональных гидролого-гляциологических исследований [181].

2.3.1. Гляциологическое моделирование баланса массы ледников с использованием модели SMB

На леднике №139 (Восточный Зулмарт) измерения баланса массы ледника начались в 2018 году, на протяжении шести лет на данном леднике проводятся непрерывные наблюдения за балансом массы и эти данные позволяют нам проводить моделирование и реконструкцию баланса массы данного ледника. Для моделирования мы используем как метеорологические данные, так и данные, полученные путём проведения экспедиционных работ.

При моделировании мы использовали модель SMB, которая является продуктом Швейцарского университета во Фрейбурге, а разработчиком этой модели является Энрико Матте.

Для моделирования баланса массы были использованы такие данные как таяние ледника в зоне абляции, которые были получены путём установки в зоне абляции абляционных реек, и накопление снега в зоне аккумуляции путём проведения измерений в шурфе, выкопанном в зоне аккумуляции. Также для моделирования мы использовали метеоданные, которые были получены с общедоступного сайта [gr5](#) [182], где можно получить многолетние метеоданные.

Другие данные, которые необходимы для моделирования, модель формирует автоматически, используя имеющиеся у себя модули.

Данная модель имеет около 70 модулей, которые отвечают за сбор анализа и вывод данных и, тем самым, уменьшая риски ошибок, которые может допустить человек. Необходимо заметить, что данная модель имеет функцию, которая определяет степень таяния ледника под моренным чехлом, что делает моделирование и на ледниках, покрытыми маренами, возможным.

Методы и инструменты

Данная модель требует инсталляции нескольких программ для корректной работы модели и подготовки входных файлов для моделирования, а также настройки модельных параметров.

1. Инсталляция необходимых программ

2. Подготовка вводных файлов модели

3. Настройка модельных параметров

4. Запуск модели.

1. Инсталляция

Необходимо установить программы в следующем порядке: установка программы R, затем RStudio и установить пакеты для R, которые используются моделью. Для установки программ и пакетов, вам потребуется подключение к Интернету и не менее 2 ГБ свободного места на диске.

- Необходимо загрузить и установить программу R, для той операционной системы, которая установлена на компьютере.

После загрузки откройте программу установки и следуйте инструкциям до завершения установки

- Загрузите и установите RStudio. Загрузите установщик, соответствующий вашей операционной системе. Снова откройте установщик и продолжайте, пока RStudio не будет установлен.

- Для установки необходимых пакетов R необходимо использовать программу `install_packages.R`. Откройте файл `install_packages.R` в RStudio и нажмите кнопку Source (рисунок 2.6), чтобы запустить программу.

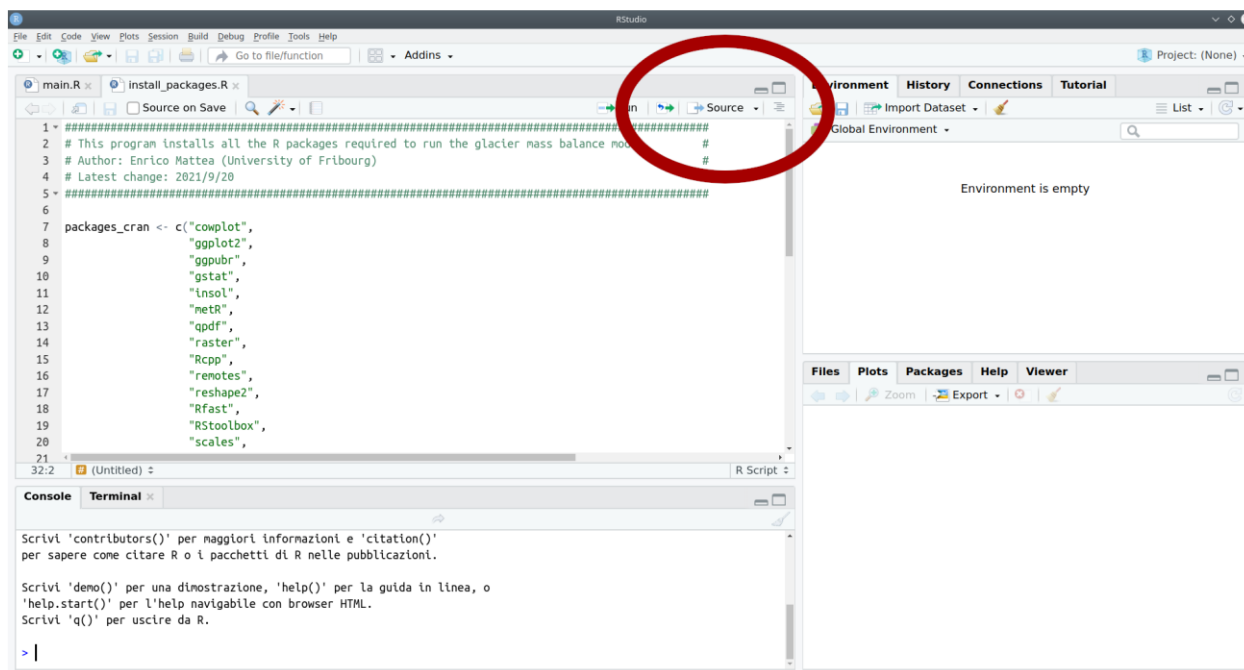


Рисунок 2.6. - Кнопка Source в RStudio

- Программа загрузит и установит несколько пакетов автоматически. Через некоторое время откроется новое окно для установки «Rtools»: необходимо нажать «Next» и «Install», чтобы продолжить.

- Когда `install_packages.R` завершится (All packages installed successfully!), необходимо закрыть RStudio.

2. Входные файлы

Для модели баланса массы необходимо предоставить некоторые входные данные. Важно поместить входные данные в нужное место: все входные данные должны быть внутри папки модели в папке с именем `input`. В этой папке необходимо создать подпапку с названием ледника: `input\zulmart`. В названии ледника не должно быть пробелов.

Подготовка входных данных для модели:

- текстовый файл с ежедневными метеорологическими данными;
- текстовый файл с измерениями баланса массы;
- контур ледника в векторном формате (шейп-файл);
- сетка высот (называемая «ДНМ»: полный прямоугольник, покрывающий область ледника);
- сетка типа поверхность (лед, фирн, снег);

- 365 файлов суточной солнечной радиации.

Необходимо подготовить три файла с входными данными, файл с метеорологическими данными и файл с данными о балансе массы, а также необходимо подготовить файл с контуром ледника или ледников по необходимости если планируется провести моделирование нескольких ледников. Для подготовки еще трех файлов необходимо воспользоваться встроенной программой `make_input.r`, данная программа автоматически создаст отметки высот, тип поверхности и радиационную сетку.

Метеорологические данные

Метеорологические данные записываются в текстовый файл и состоит из пяти колонок; год (`year`), день года (1-365) (`day of year (1-365)`), час (`hour`), температура (`temperature`), осадки (`precipitation`) (рисунок 2.7). Для определения назначения файла, файлу было присвоено название `weather_zulmart.dat` и данный файл необходимо поместить в папку `input\zulmart\weather\`. Данная модель работает с суточным разрешением температуры и общее суточное количество осадков, в миллиметрах включая твердые и жидкие осадки «`temperature, precipitation`». Колонка «`hour`» время в данном файле имеет постоянное значение 12 ежедневно. В файле с метеорологическими данными может быть текст с комментариями для объяснения содержимого файла, в модели имеется возможность игнорировать данные строки для корректной ее работы.

```

1 Yakarcha daily weather (virtual elevation 4000 m),
2 from ERA5 reanalysis (temperature corrected with lapse rate of -6.5 °C / km, precipitation untouched.
3 ERA original cell elevation: 2620.8 m
4 year doy hour t2m mean precip
5 2018 1 12 -17.7185480651166 0
6 2018 2 12 -14.6076480374782 0
7 2018 3 12 -11.8609889460022 1.39179517586388
8 2018 4 12 -14.7327949901437 4.10392266821068
9 2018 5 12 -17.4879757612759 2.5714413503746
10 2018 6 12 -17.9348769901036 0.0203597889974231
11 2018 7 12 -17.43855001927 3.51552476618514
12 2018 8 12 -17.8744948028253 2.10866334646316
13 2018 9 12 -17.952224695118 0.197489953275004
14 2018 10 12 -17.7166002526239 0.27282117256547
15 2018 11 12 -17.6719831727096 2.55230314871702

```

Рисунок 2.7. - Первые строки метеорологического файла

Примечание: в метео-файле должны быть данные за каждый день, который моделируется, иначе модель откажется от него. Модель всегда

включает в себя весь гидрологический год (с 1 октября по 30 сентября). Модель также включает весь измеренный период на рейках.

Измерения баланса массы

Измерения баланса массы записываются в простой текстовый файл с 8 колонками: имя точки (без пробелов), дата начала, дата окончания, координата X, координата Y, высота, измеренное изменение на рейке, измеренная плотность (рисунок 2.8). Мы называем этот файл mb_zulmart.dat и помещаем его в новую папку: input \zulmart \massbalance \. Мы моделируем 2019 год, поэтому «дата начала» - лето 2018г., «дата окончания» - лето 2019г. Формат - «день.месяц.год», например 14.8.2019 для 14 августа 2019 г.

Обратите внимание, что на рисунке 2.8 некоторые измерения (zm8) имеют специальную дату начала NA: это используется для летних шурфов снега и зондирование снега, где «дата начала» обычно неизвестна (измеренное изменение в этом случае определяется от поверхности в конце предыдущего сезона таяния).

Таким образом, для всех измерений с датой начала NA модель автоматически устанавливает дату начала в конце предыдущего сезона таяния.

Координаты X и Y должны быть в метрах (UTM: для Zulmart мы используем зону UTM 43N, которая также называется EPSG: 32643). Измерение указывается в сантиметрах, > 0 для аккумуляции и < 0 для абляции. Плотность выражается в г.см³ (вода = 1, лед = 0,9). измерения уже даны в сантиметрах водного эквивалента (см в.э.), поэтому мы используем плотность = 1.

1	zm1	16.07.2018	15.07.2019	327239.096	4305060.654	4669	-150.3	1
2	zm2	16.07.2018	15.07.2019	327115.271	4304887.087	4707	-141.3	1
3	zm3	16.07.2018	15.07.2019	327017.904	4304821.470	4718	-177.3	1
4	zm4	16.07.2018	15.07.2019	326967.104	4304329.344	4793	-143.1	1
5	zm5	16.07.2018	15.07.2019	326710.458	4303572.635	4960	-99.0	1
6	zm6	16.07.2018	15.07.2019	326404.070	4303129.721	5000	-18.9	1
7	zm7	16.07.2018	15.07.2019	326073.869	4302937.633	5100	-9.0	1
8	zm8	NA	15.07.2019	325299.167	4303266.247	5351	46.0	1

Рисунок 2.8. - Файл с измерениями баланса массы

Контур ледника

Контур ледника представляет собой полигон, ограничивающий поверхность ледника (рисунок 2.9). Чтобы создать контуры шейп-файла, мы рисуем его вручную поверх спутникового изображения ледника, спутник Sentinel-2. Скачиваем изображение с портала EarthExplorer. Чтобы нарисовать контур, мы используем программу QGIS или ArcGIS, или любую другую программу, которая имеет похожие функции.



Рисунок 2.9. - Ледник Зулмарт в портале EarthExplorer.

- В левой колонке выбираем Data range → Sentinel → Sentinel-2, затем нажимаем Results.
- В левой колонке отображается список изображений на многих страницах. Мы выбираем тот, который нам необходим.
- Распаковываем zip-файл и открываем спутниковый снимок в QGIS.
- В QGIS мы переходим к леднику и нажимаем Layer → Create Layer

→ New Shapefile Layer, тип геометрии Polygon, имя файла outline_ягдьфке_2019.shp, система координат EPSG: 32643.

- Затем мы вручную обрисовываем контур ледника: нажимаем Toggle Editing и Add Polygon Feature, затем рисуем полигон по контуру ледника.

- Далее, мы снова нажимаем Toggle Editing и сохраняем изменения.

Шейп-файл состоит из 5 отдельных файлов, которые заканчиваются на .shp, .shx, .dbf, .prj и .cpg. Мы держим их наготове, так как будем использовать их в следующих шагах.

ЦМР

Топография ледника определяется файлом DEM. Мы загружаем этот файл из EarthExplorer: процедура такая же, как и для изображения Sentinel-2 (см. Выше), но файл находится в папке Data Sets → NASA LPDAAC collections → ASTER collections → Aster Global DEM V3 (не забудьте удалить предыдущие наборы данных (Sentinel → Sentinel-2) перед тем, как нажать Results). Скачиваем формат GeoTIFF и распаковываем archive.zip. одним из важных файлов является STGTMV003_N38E068_dem.tif этот файл остаётся на своём месте и будет использован позже.

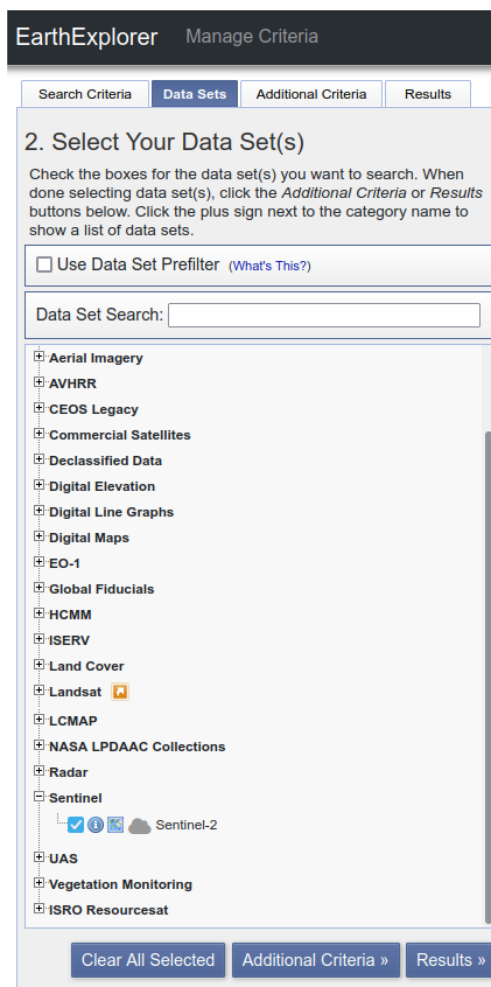


Рисунок 2.10. - Портал EarthExplorer, выбор источника данных Sentinel-2

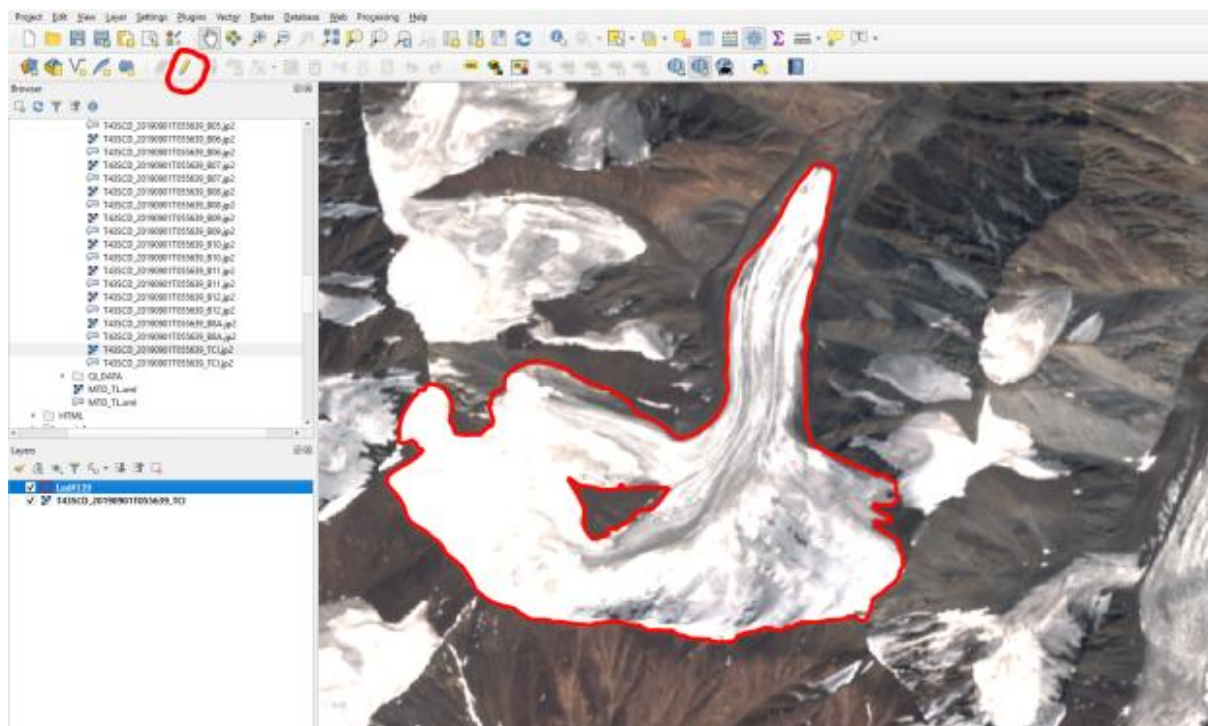


Рисунок 2.11. - Контур ледника №139, подложка спутниковый снимок Sentinel-2, Программа обработки QGIS

Программа make_input.R

Для подготовки входных файлов необходимо использовать встроенную в модель программу make_input.R, программное обеспечение в ходе своей работы автоматически преобразовывает систему координат всех файлов в тот который необходим для корректной работы программы.

Для начала работы с программой необходимо открыть файл make_input.R который находится в файле utils с помощью программы RStudio.

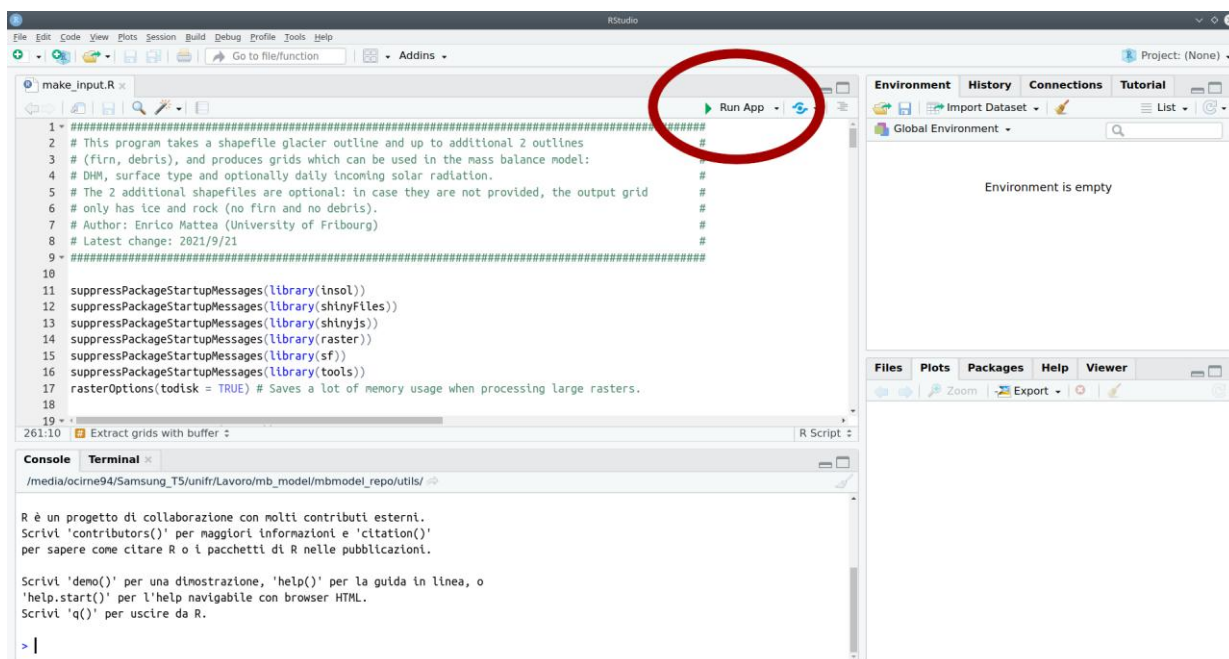


Рисунок 2.12. - Кнопка Run App в RStudio

В открывшемся окне необходимо запустить команду Run App (рисунок 2.12) который открывает окно Mass balance model assistant, в этом окне заполняются такие данные как, название ледника (Тоже самое что и название папки в которой сохраняются все данные), вводится дата моделирования который в нашем случае устанавливается 2019 год. Для загрузки высотных характеристик ледника (файл DEM) необходимо открыть кнопку Choose one or more input DEM files и загрузить созданный ранее файл. Если файл DEM состоит из нескольких частей, то программа автоматически объединяет эти файлы в один файл перед обработкой.

- Мы нажимаем кнопку Choose input glacier shapefile и выбираем шейп-файл контура, который мы создали ранее: outline_zulmart_2019.shp.
- Остальные кнопки не трогаем, в текстовом поле выбираем размер поля 100 м по контуру.
- Оставляем пустым grid cell size, он вычисляется автоматически. Мы также можем задать конкретный размер ячейки, написав значение (в метрах).
- Выбираем Compute daily potential solar radiation (Вычислить суточную потенциальную солнечную радиацию).
- Наконец, нажимаем кнопку RUN! (рисунок 2.13).

The screenshot shows a web browser window with the URL `http://127.0.0.1:3705`. The interface includes a 'Publish' button in the top right corner. The main form contains the following elements:

- Choose glacier name:** A text input field containing 'zulmart'.
- Choose model year:** A text input field containing '2020'.
- Choose one or more input DEM files:** A button.
- Choose input glacier shapefile:** A button.
- Choose input firn shapefile (optional):** A button.
- Choose input debris shapefile (optional):** A button.
- Choose reference grid file (optional):** A button.
- Choose margin size around the outline, in meters:** A text input field containing '100'.
- Choose grid cell size in meters (leave blank for automatic cell size):** An empty text input field.
- Compute daily potential solar radiation (SLOW!)**: A checkbox that is checked.
- Status messages:**
 - Glacier name selected.
 - Model year selected.
 - Input DEM file(s) selected.
 - Input outline file selected.
 - Input firn shapefile (optional) not yet selected.
 - Input debris shapefile (optional) not yet selected.
 - Input reference grid file (optional) not yet selected.
- RUN!**: A button with a mouse cursor icon over it.

Рисунок 2.13. - Окно make_input.R после выбора данных готово для нажатия на RUN!

- Программа теперь работает, это может занять несколько минут. Вы можете следить за прогрессом в окне RStudio.
- Когда программа завершится (уведомление Processing finished (Обработка завершена)), внутри папки utils \ появится новая папка с именем zulmart \. Она содержит папки dhm \, outline \, radiation\ и surftype\.
- Мы перемещаем все это (всю папку utils \zulmart \) в папку input \ zulmart \.
- В конце входная папка выглядит как рисунок 2.14: в input \ zulmart \ есть 6 папок (dhm \, massbalance\, outline \, радиация \, surftype \ и weather \).
- Папка outline \ содержит шейп-файл, папка радиация\ содержит 365 радиационных расчётов (первая называется dir00124.tif), а остальные папки содержат только по 1 файлу.



Рисунок 2.14. - Папка input\zulmart\ после подготовки всех входных данных

Параметры модели

Параметры модели задаются в файле set_params.R в папке модели. Мы открываем этот файл в RStudio и устанавливаем параметры, как показано в таблице 2.2. Есть много других параметров, которые можно установить, но в этом первом моделировании мы устанавливаем только самые важные из

них. При изменении параметров важно сохранить тот же формат: кавычки (""") и запятые (,) должны оставаться прежними или модель не будет работать.

Таблица 2.2. - Параметры модели, которые мы изменяем

Parameter name (Имя) параметра)	Value (Значение)	Explanation (Пояснение)
name_glacier	"zulmart"	Имя ледника, это то же, что и папка в input \
filename weather	"weather_zulmart.dat"	Имя метео файла, которое мы установили
file weather nskip	4	Количество строк, которые нужно пропустить в метео-файле, есть 4 строки, которые не являются данными
grids_crs	32643	EPSG код системы координат, 32643 - зона UTM 43N
filename massbalance annual	"mb_zulmart.dat"	Имя файла с годовыми измерениями баланса массы, который мы установили
filename massbalance winter	""	Имя файла с зимними измерениями баланса массы. У нас этого нет, поэтому мы оставляем его пустым (""")
weather aws elevation	4000	Высота метеоданных. В файле Зулмарт указана высота 4000 м
first _ year	2019	Первый год, который мы хотим смоделировать: 2019
last_year	2019	Последний год, который мы хотим смоделировать, мы хотим сделать только один год, так что это снова 2019

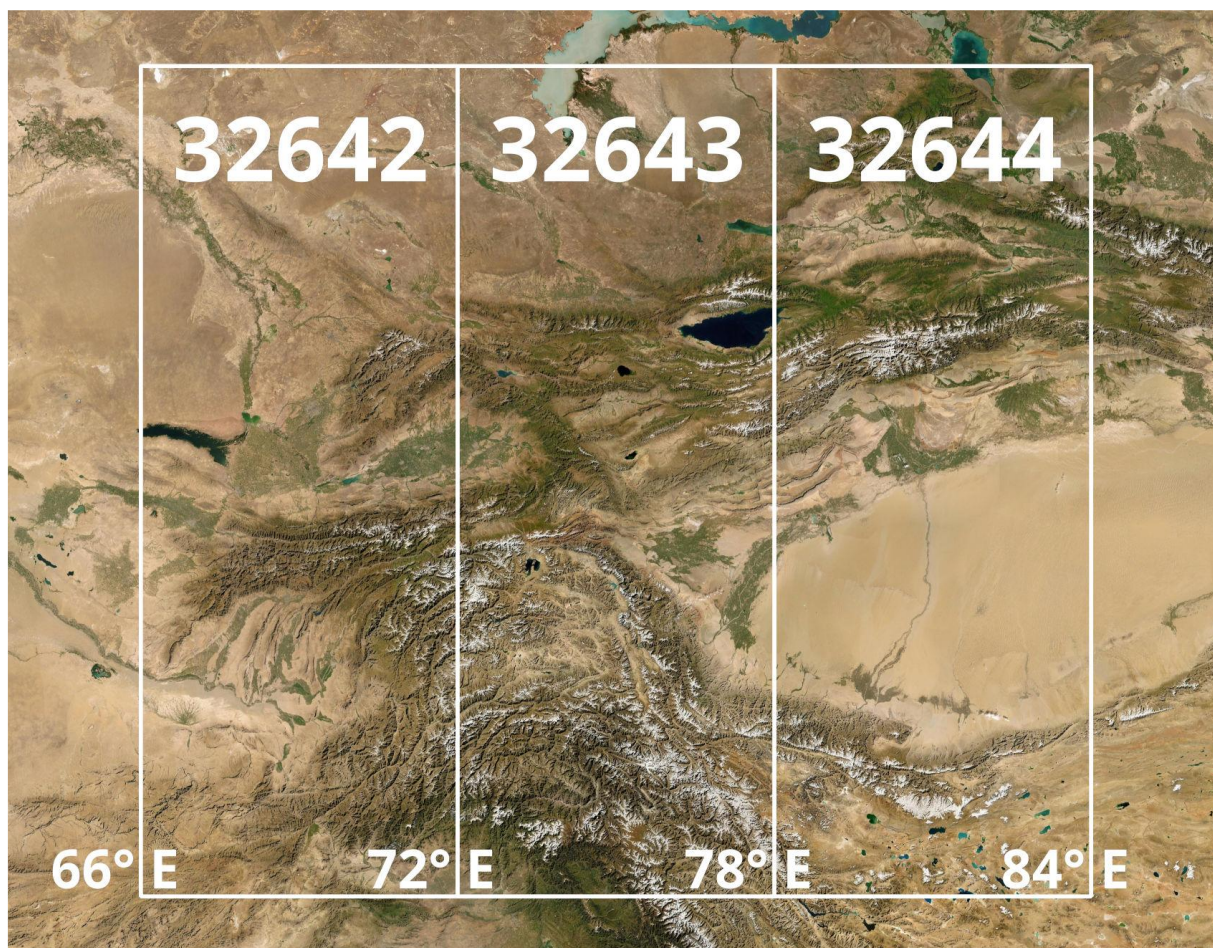


Рисунок 2.15 - коды EPSG зон UTM в Центральной Азии с соответствующими
долготными границами

Запуск модели

После установки параметров мы можем запустить модель очень просто: мы просто открываем в RStudio файл `main.R` и нажимаем на `Source` (рисунок 2.6). Пока модель работает, мы можем видеть прогресс в консоли RStudio (рисунок 2.16). В консоли модель покажет в реальном времени результат симуляции, а также любые сообщения об ошибках. Все сообщения также записываются в `log file` (в `logs\`).

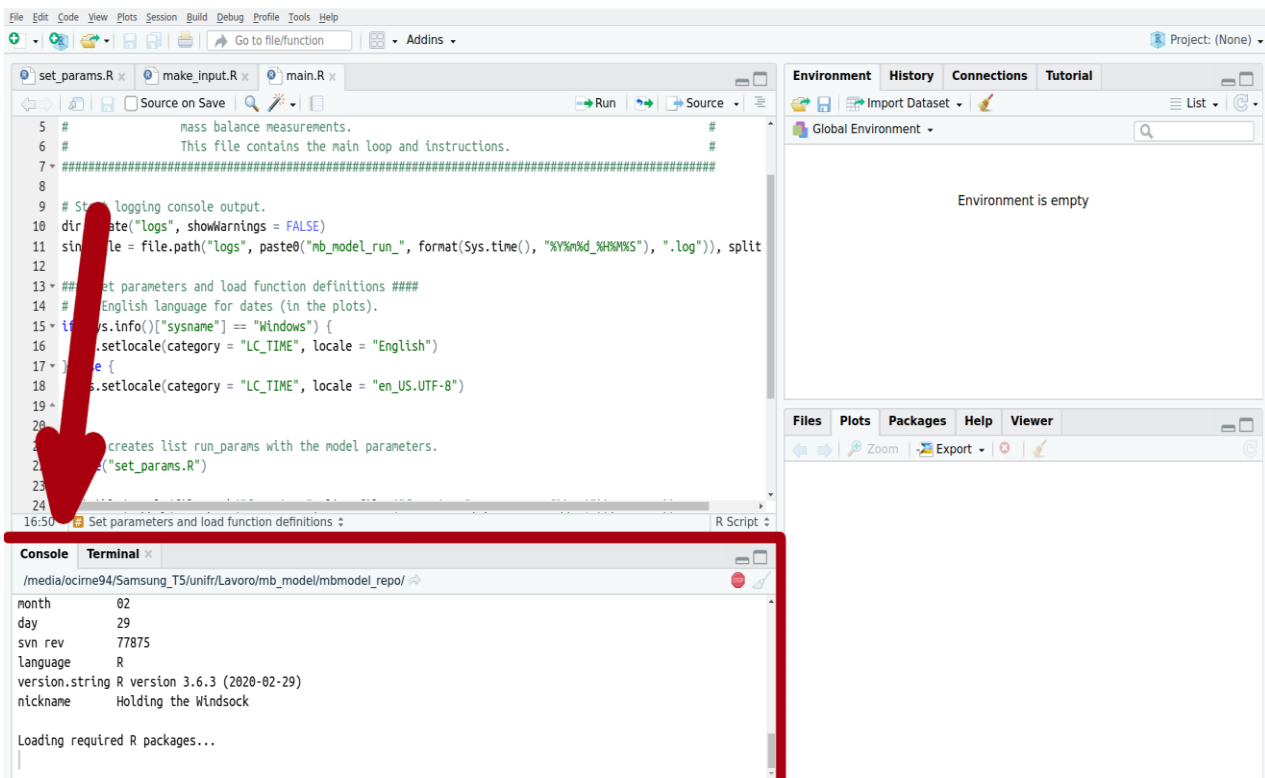


Рисунок 2.16. - RStudio console с информационными сообщениями, написанными моделью

Выходные файлы

model output записывается в папку с именем output\zulmart\.

Следующие подробные результаты представлены в файле massbalance_2020.pdf, в output\zulmart\Annual_results\:

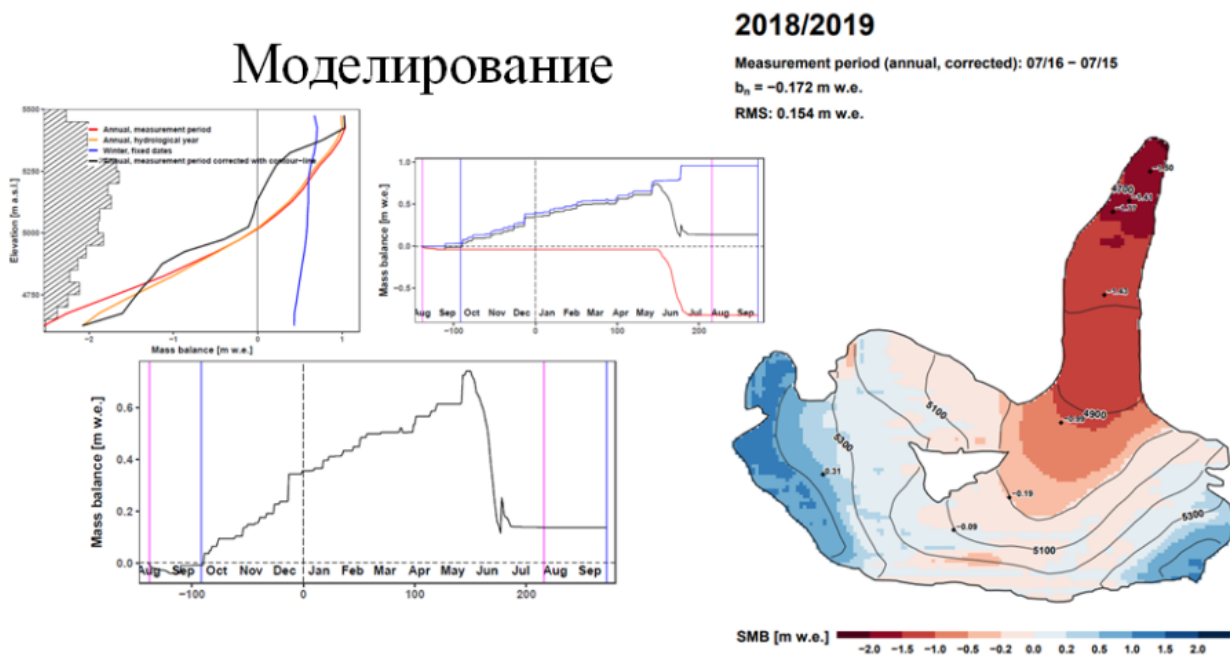


Рисунок 2.17. - Результаты моделирования

- Карта баланса массы за гидрологический год.
- Карта баланса массы за период измерений.
- Карта баланса массы за годовой период измерений с локальной коррекцией результата модели на основе долей (метод контурных линий). Это называется "Период измерения (годовой, скорректированный)".
- Карта баланса массы за зимний период.
- Метеорологические ряды (температура и осадки).
- Суточные временные ряды кумулятивного баланса массы по всему леднику, также с отдельными компонентами таяния и накопления.
- Ежедневные объёмы талых вод и осадков, которые можно сравнить с измерениями стока.
- Высотные профили баланса масс, также в сравнении с измерениями рейки
- Ежедневный временной ряд баланса массы на рейках.

Карты баланса массы также записываются в отдельные файлы GeoTiff (пример: mb_annual_hydro_2020.tif), которые можно использовать в QGIS или ArcGIS.

Остальные значения, включая суточное и общее таяние, накопление, баланс массы и rainfall, записываются в текстовые файлы CSV (пример: mb_daily_series_glacier_2020.csv).

Модель также превращает сводку результатов в два обзорных файла: output \zulmart_overview.pdf и output \zulmart_overview_areaplot.pdf.

Выводы по второй главе

1. Исследование основано на анализе спутниковых снимков Landsat (2-5-7-8) и Sentinel-2 за период 1977-2018 гг. Идентификация ледников проводилась полуавтоматическим методом с последующей ручной коррекцией. Для оценки динамики оледенения использовались снимки конца августа - начала сентября, когда ледники максимально свободны от сезонного снега. Учитывались факторы облачности для минимизации погрешностей.

2. Гляциологический баланс массы ледника №139 включала полевые работы и камеральную обработку данных. Использовались спутниковые снимки Sentinel-2A, программа ArcGIS для построения схемы ледника, а также прямые гляциологические измерения для определения баланса массы.

3. Для моделирования баланса массы ледников использовалась модель SMB, разработанная Швейцарским университетом во Фрейбурге. Модель учитывает различные параметры, включая метеоданные, градиенты температуры и осадков, солнечную радиацию и географические характеристики ледника.

ГЛАВА 3. ИСЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ КАМЕРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РАСЧЁТА ДИНАМИКИ ЛЕДНИКОВ

3.1. Исследования современного состояния оледенения бассейна озера Ховаркуль

Для общего понимания состояния оледенения бассейна озера Ховаркуль была произведена оцифровка всех ледников. Нумерация ледников производилась в соответствии с нумерацией каталога ледников СССР. После оцифровки ледников были определены морфометрические и другие свойства ледников и составлены таблицы с данными о ледниках бассейна озера Ховаркуль.

На картах (рисунок 3.1 и 3.2) представлена ледниковая система бассейна озера Ховаркуль. На карте (рисунок 3.2) мы видим общее расположение основных ледников и их типов, отмеченных разными цветами. Самый крупный ледник, обозначенный голубым цветом, долинного типа, простирается с северо-запада на юго-восток вдоль главной долины. К нему присоединяются несколько боковых притоков, обозначенных зелёными и оранжевыми цветами, каровых и висячих ледников соответственно. На юге мы видим отдельное скопление ледников, обозначенное жёлтыми и красными цветами, что указывает на их меньшие размеры и более пересечённый рельеф поверхности, это каровые и висячие ледники в более высоких горных цирках.

На карте (рисунок 3.1) показана площадь оледенения, сгруппированная по величине. Крупные ледники обозначены синим и зелёным цветом, светло-зелёным цветом показаны наименьшие ледники.

Обе карты демонстрируют сложную и разветвленную ледниковую систему в горном регионе, с преобладанием крупных долинных ледников в главных долинах и множеством более мелких присоединяющихся ледников различных типов на склонах и в боковых цирках. Стоит отметить, что озеро Ховаркуль в центральной части карты, является водоёмом, в котором скапливаются талые воды ледников.

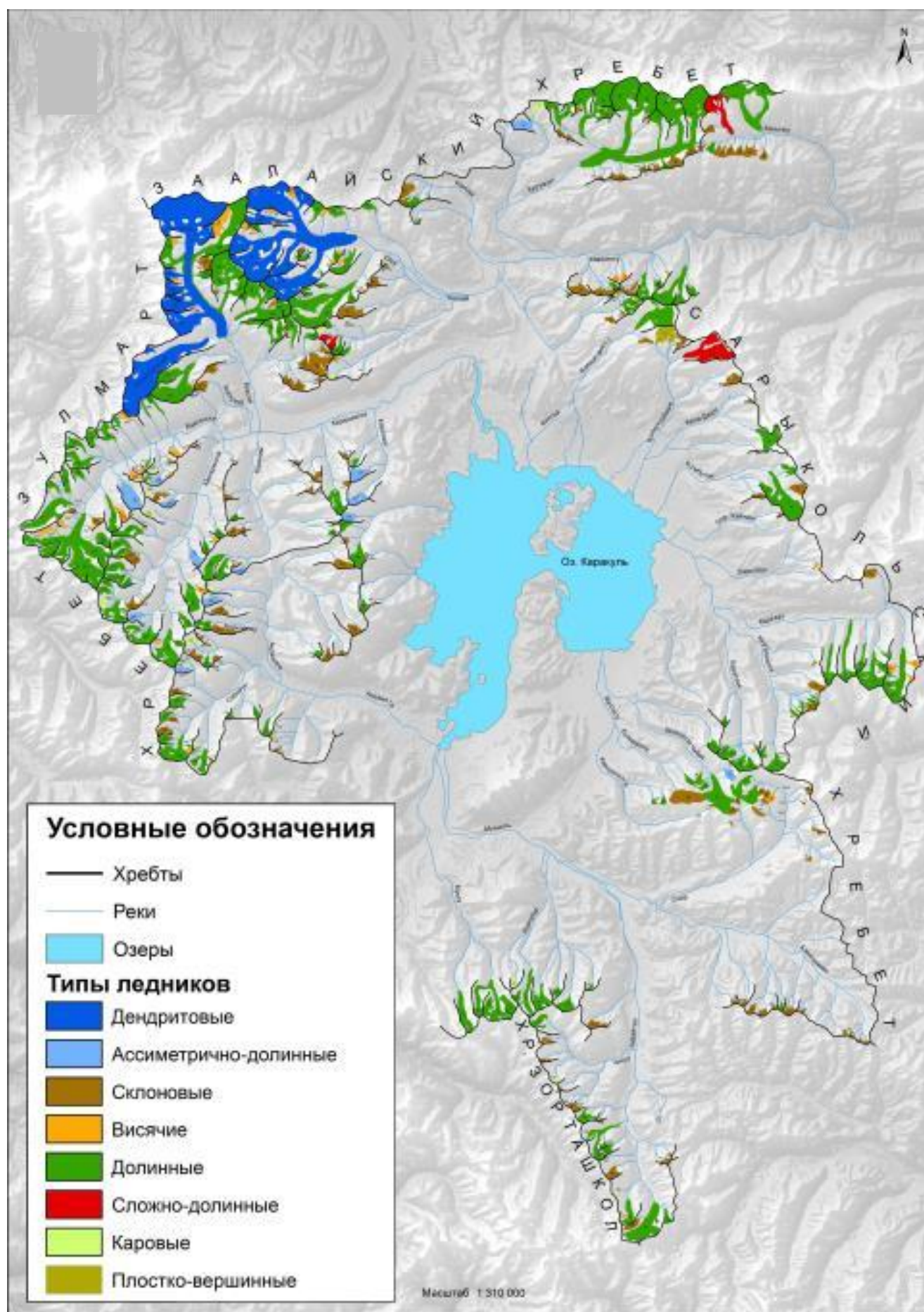


Рисунок 3.2. - Общий вид ледников бассейна озера Ховаркуль по типам

Количество ледников по бассейнам рек

В таблице 3.1 приведено распределение количества ледников по различным речным бассейнам в исследуемом районе. Всего учтено 432 ледника, причём наибольшее количество ледников находится в бассейнах рек Коксой, Кокчукурбаши, Арпа-Дады и Кумбулак (16 ледников) на северном участке Сарыкольского хребта, а также в бассейнах рек Караджилга (38 ледников) и Байгашка (41 ледник) [1-А].

Таблица 3.1. - Количество ледников по бассейнам рек

Реки	Количество ледников, шт.
Северный участок Сарыкольского хребта; бассейны рек Коксой, Кокчукурбаши, Арпа-Дады и Кумбулак	16
бассейны рек Зор. Куянды и Сарыташ	2
бассейн реки Караарт	32
бассейны рек Музтесу и Саар	25
бассейн реки Кызылджиик	13
бассейн реки Акбайтал	25
бассейн реки Кокчукур	12
бассейны рек Акджилга и Безымянная I	44
бассейны рек Безымянная II, Караташ и Карачим	24
Бассейн верховья реки Караджилга	38
бассейн реки Байгашка	41
бассейн реки Коксай	42
Бассейны нижних правых притоков реки Маркансу	23
Бассейны правых притоков реки Коксой и реки Коксой	14
бассейн реки Уйсу	41
бассейн реки Курумды	30
бассейн реки Кынычсу	10
Всего	432

Примечание: без учёта разделившихся ледников.

Распределение ледников по величине их площади

Таблица 3.2 показывает распределение ледников по площади. Наибольшее количество ледников (177, или 40,6%) имеет площадь от 0,1 до 0,5 км². Ледников с площадью более 10 км² всего 7 (1,6% от общего количества), но они занимают 20,2% от общей площади оледенения района.

Таблица 3.2. - Распределение ледников по величине их площади

Площадь ледника, км ²	Количество ледников		Площадь	
	Данной градации	% общего количеств	км ²	% общей площади оледенения
0—0,1	24	5,5	1,6	0,3
0,1—0,5	177	40,6	44,4	7,8
0,5—1,0	97	22,2	68	12
1,0—3,0	93	21,3	148,8	26,3
3,0—10	38	8,7	189,1	33,4
10—Выше	7	1,6	114,3	20,2
Итого	436	100	566,2	100

Примечание: С учётом площадей разделившихся ледников.

Распределение ледников различных морфологических типов

Таблица 3.3 представляет распределение ледников по их морфологическим типам. Наиболее распространёнными типами являются долинные (139 ледников, 29,4% площади оледенения) и склоновые ледники (129 ледников, 12,2% площади оледенения) [1-А].

Таблица 3.3. - Распределение ледников различных морфологических типов

Тип ледника	Число ледников		Площадь	
	Данного типа	% общего количества	км ²	% общей площади
Долинный	139	32,4	165,9	29,4
Асимметрично долинный	14	3,3	16,6	2,9
Висячий	53	12,3	11,1	2
Висячий долинный	3	0,7	1,2	0,2

Продолжение таблицы 3.3

Висячий долинный, часть сложно долинный	5	1,2	4,7	0,8
Долины, часть дендритный	9	2,1	91,7	16,2
Долины, часть сложно долинный	43	10	155,8	27,6
Каровый	17	4	4,1	0,7
Карово долинный	3	0,7	1,8	0,3
Плосковершинный	1	0,2	2,9	0,5
Склонный	129	30	69	12,2
Склонный, часть дендритный	4	0,9	7,9	1,4
Склонный, часть сложно долинный	3	0,7	1,9	0,3
Сложно долинный	3	0,7	12,4	2,2
Сложно долинный, часть дендритный	1	0,2	17,2	3
Итого	427	100	564,2	100

Примечание: Новые ледники в таблицу не включены.

Распределение ледников по экспозициям

Данная таблица (таблица 3.4) показывает распределение ледников по экспозициям (ориентации склонов). Наибольшее количество ледников ориентировано на север (125 ледников, 22,4% площади оледенения) и северо-восток (79 ледников, 17,5% площади оледенения). Это связано с более благоприятными условиями для сохранения льда на склонах северных румбов.

Таблица 3.4. - Распределение ледников по экспозициям

Экспозиция	Количество ледников		Площадь	
	данной экспозиции	% числа ледников района	км ²	% площади оледенения района
В	36	8,4	35,5	6,3
З	19	4,4	20	3,5
С	125	29,2	126,3	22,4

Продолжение таблицы 3.4

СВ	79	18,5	99	17,5
СЗ	76	17,8	53,3	9,4
Ю	21	4,9	39,7	7
ЮВ	32	7,5	48,6	8,6
ЮЗ	7	1,6	16,7	2,9
В, ЮВ	3	0,7	5	0,9
В, ЮЗ	1	0,2	1,9	0,3
С, В	1	0,2	1,9	0,3
С, З	1	0,2	0,5	0,09
С, СВ	4	0,9	11,8	2,1
С, СЗ	1	0,2	0,7	0,1
СВ, В	3	0,7	24,2	4,3
СВ, С	2	0,5	3,6	0,6
СЗ, С	1	0,2	3,9	0,7
СЗ, Ю	1	0,2	0,7	0,1
СЗ, ЮЗ	1	0,2	1,3	0,2
Ю, ЮВ	3	0,7	36,7	6,5
Ю, ЮЗ	1	0,2	1,4	0,2
ЮВ, ЮЗ	2	0,5	3,8	0,7
З, ЮЗ	1	0,2	1,4	0,2
СЗ, З	1	0,2	0,7	0,1
Ю, З	2	0,5	22,5	4
ЮВ, Ю	2	0,5	2,2	0,4
ЮЗ, Ю	1	0,2	1,2	0,2
Итого	427	100	564,5	100

Распределение ледников по экспозициям на разных хребтах

Эта таблица (таблица 3.5) детализирует распределение ледников по экспозициям для основных хребтов исследуемого района. Например, на Сарыкольском хребте преобладают ледники северных, северо-западных и северо-восточных экспозиций.

Таблица 3.5. - Распределение ледников по экспозициям на разных хребтах (в числителе - число ледников, в знаменателе - площадь, км²)

Хребет	Число ледников	Площадь ледников, км ²	Экспозиция							
			С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Сарыкольский хр.	88	86,3	32	13	2	2	1	1	11	26
			32,2	7,9	0,8	1,3	0,2	2,9	17,2	23,8
Хр. Зорташкол	37	38	29	3	1					4
			32,9	1,8	1,3					2
Центральный район	66	46	23	21	11				2	9
			21,7	13,4	6,8				0,4	3,7
Верховья р. Караджилг	77	84,8	13	21	7	16	2	1		17
			22,8	26,2	6,6	9,3	2	0,4		17,5
Бассейн р. Коксай	41	124,9	4	5	9	6	4	5	5	3
			3,1	28,66	15,8	9,3	39,8	16,2	7,6	4,4
Бассейн реки р. Маркансу (западная часть)	51	85,8	8	15	4	6	10			8
			6,2	47,1	6,1	18,5	5,9			2
Бассейн реки р.	63	96,8	24	4	3	4	10	3	3	12
			17,8	0,9	1,9	13,6	52,3	2,9	1,7	5,7
Весь район оледенения	423	562,6	133	82	37	34	27	10	21	79
			136,8	126	39,3	52	100,2	22,4	26,9	59,1

Примечание: Новые ледники в данной таблице не учтены. Ледники, которые разделились на две части, в данной таблице считается как один ледник.

Распределение площади оледенения по высоте

Таблица 3.6 показывает распределение площади оледенения по высотным зонам. Наибольшая площадь оледенения (28,4%) приходится на

высоты 4400-4600 м над уровнем моря, а в целом основная часть ледников расположена в диапазоне высот 4200-5000 м.

Таблица 3.6. - Распределение площади оледенения по высоте

Высотная зона, м.	Площадь	
	км ²	% общей площади оледенения района
4200—4400	120,2	21,3
4400—4600	160,4	28,4
4600—4800	148,8	26,3
4800—5000	95,8	16,9
5000—5200	28	4,9
5200—5400	5,2	0,9
5400—5600	1,7	0,3
5600—5800	4,9	0,9
Итого	565	100

Высотные характеристики ледников по основным районам бассейна

В таблице 3.7 приведены средние, минимальные и максимальные высоты концов ледников, высших точек ледников для основных районов исследуемой территории. Эти данные важны для анализа высотного распределения оледенения.

Таблица 3.7. - Высотные характеристики ледников по основным районам бассейна м. над ур. м.

Район оледенения	Высота					
	концов ледников			высшей точки ледников		
	средняя	мини-мальная	макси-мальная	средняя	мини-мальная	макси-мальная
Сарыкольский хр.	4826	4242	5410	5453	5056	5850
Хр. Зорташкол	4990	4689	5292	5571	5047	6095
Центральный район	4973	4614	5333	5342	5088	5597
Верховья р. Караджилга	4895	4487	5304	5349	4946	5752
Бассейн р. Коксай	4813	4376	5251	5940	5153	6728
Бассейн реки р. Маркансу (западная часть)	4884	4373	5395	5674	4777	6572

Бассейн реки р. Маркансу (восточная часть)	4934	4215	5653	5557	5060	6054
Итого	4902	4428	5376	5555	5018	6092

Крупнейшие ледники района

В таблице 3.8 перечислены крупнейшие по площади ледники исследуемого района, их типы, площади и расположение по речным бассейнам. Самым крупным является ледник №276 (Западный Октябрьский) площадью 18,08 км² в бассейне реки Маркансу.

Таблица 3.8. - Крупнейшие ледники района

Бассейн озера Ховаркуль			
Название и номер ледника	Бассейн реки (номер района)	Тип ледника	Площадь, км ²
1	Хр. Зорташкол	долинный	5,467
5	Хр. Зорташкол	сложно долинный	7,114
10	Хр. Зорташкол	долинный, часть сложно долинный	5,247
52(Буз-Чубек)	Хр. Зорташкол	долинный	5,108
94(Ак-Байтал)	Хр. Ак-Байтал	долинный	5,642
243 (Володарского)	Хр. Зулмарт	долинный, часть сложно долинный	8,823
244 (Володарского)	Хр. Зулмарт	долинный, часть сложно долинный	7,249
272	Хр. Зулмарт	долинный, часть сложно долинный	6,606
275 (Октябрьский)	Заалайский Хр.	долинный, часть дендритный	30,793
276 (Западный Октябрьский)	Хр. Зулмарт	долинный, часть дендритный	18,08
277	Хр. Зулмарт	долинный, часть дендритный	6,413
283	Заалайский Хр.	долинный, часть сложно долинный	9,104

Продолжение таблицы 3.8

285	Заалайский Хр.	долинный, часть сложно долинный	5,732
Бассейн реки р. Маркансу			
36	Бассейн реки р. Маркансу (западная часть)	Долинный	6,3
44 (Уйсу)	Бассейн реки р. Маркансу (западная часть)	Дендритный	17,2
45	Бассейн реки р. Маркансу (западная часть)	Дендритный	10,8
47	Бассейн реки р. Маркансу (западная часть)	Дендритный	14,9
82	Бассейн реки р. Маркансу (восточная часть)	Долинный	5,4
88 (Ледник №2)	Бассейн реки р. Маркансу (восточная часть)	Долинный	10,9
89	Бассейн реки р. Маркансу (восточная часть)	Долинный	6,1
91 (Курумды)	Бассейн реки р. Маркансу (восточная часть)	Долинный	12,6
93 (Ледник №4)	Бассейн реки р. Маркансу (восточная часть)	Долинный	9,9
115	Бассейн реки р. Маркансу (восточная часть)	Долинный	6,3

Деградированные ледники (Исчезнувшие)

Таблица 3.9 содержит информацию о двух деградированных ледниках - их номера, координаты, морфологические типы, площади и высотные диапазоны.

Таблица 3.9. - Деградированные ледники (Исчезнувшие)

Но мер	Мин. высот а	Макс. высот а	Общая экспозиция ледника	Морфоло- гический тип ледника	Площадь, км²	Координаты
Бассейн озера Ховаркуль						
42	5100	5380	СЗ	Склонный	0,2	73°41'51,834"E 38°52'2,268"N
Бассейн реки Маркансу						
75	4850	5000	В	Висячий	0,1	73°21'24,514"E 39°25'47,811"N

В целом, представленные таблицы содержат подробные количественные данные о ледниках исследуемого региона, их морфологических типах, размерах, высотном и экспозиционном распределении, что является ценной информацией для изучения современного состояния оледенения и его динамики.

3.2. Разработка карты поверхности ледников Октябрьский и Уйсу бассейна озера Ховаркуль

Ниже приведены подробные топографические карты поверхности ледников Октябрьский и Уйсу, полученные вышеуказанными методами, расположенные в северной части бассейна озера Ховаркуль. Карты дают наглядное представление о высоте поверхности ледников и особенностях рельефа с помощью цветовых шкал и контурных линий.

На снимке (рисунок 3.3) изображён ледник Октябрьский, контур ледника представлен различными оттенками жёлтого, оранжевого и красного цветов, обозначающими различные диапазоны высот. Самая высокая точка ледника, отмеченная красным цветом, достигает высоты 6746 метров над уровнем моря, а самая низкая точка, отмеченная зелёным цветом, находится на высоте 4489 метров над уровнем моря.

Контурные линии или изогипсы, которые нанесены на карту, обозначают высотные линии, которые отражают рельеф и топографию ледника.

Для ледника Уйсу также была создана подробная карты высот, на карте (рисунок 3.4) отражены самая высокая точка ледника которая достигает высоты 6579 метров над уровнем моря и самая низкая точка, которая находится на высоте 4402 метров над уровнем моря что говорит о перепаде высот на леднике в 2177 метров.

Топографические карты для этих ледников были созданы с использованием цифровых моделей рельефа с разрешением около 30 метров, которая была создана на основе радарных снимков SRTM. Для того чтобы получить цифровой модель рельефа и характеристик

поверхности ледника радарные снимки были обработанные в программе ArcGIS.

Дендритный ледник Октябрьский №275, 277-287

На основе полученных карт и их анализа было выявлено, что основная часть зоны абляции находится на высоте до 5000 метров, а выше этой зоны начинается зона аккумуляции, такие высотные характеристики ледников является нормой для Восточного Памира. Причина того что ледник Октябрьский является одним из крупнейших ледников не только на Восточном Памире но и в Таджикистане это обширные территории зоны аккумуляции ледника. На карте, желтые области с далеко расположенные друг от друга изолинии показывают относительные ровности, это позволяет накапливать достаточно твердых атмосферных осадков для питания ледника. Красная область на леднике, где линии высот расположенные рядом, говорят о крутых склонах вокруг зоны аккумуляции ледника, тем самым создавая цирк из хребтов вокруг зоны аккумуляции ледника.

Ледник Октябрьский это дендритный ледник, который имеет множества притоков, как и примыкающих так и не примыкающих, в основном примыкающие ледники находятся на северном склоне правого рукава хребта ледника Октябрьского. А не примыкающие ледники расположены в противоположенной стороне на южном склоне левого рукава хребта ледника.

Основными притоками, влияющими на динамику всей системы, являются ледники 277, 282, 283 и 285. С 1946 по 1973 год нижняя часть языка ледника деградировала, значительные участки мёртвого льда растаяли, а участки прежде активного льда были отсечены водотоками от современного тела ледника. За этот период фронт ледника отступил на 1500 м, а к 1975 году ещё на 50 м. В период с 1975 по 1980 год деградация языка продолжалась и его конец отступил ещё на 500 м.

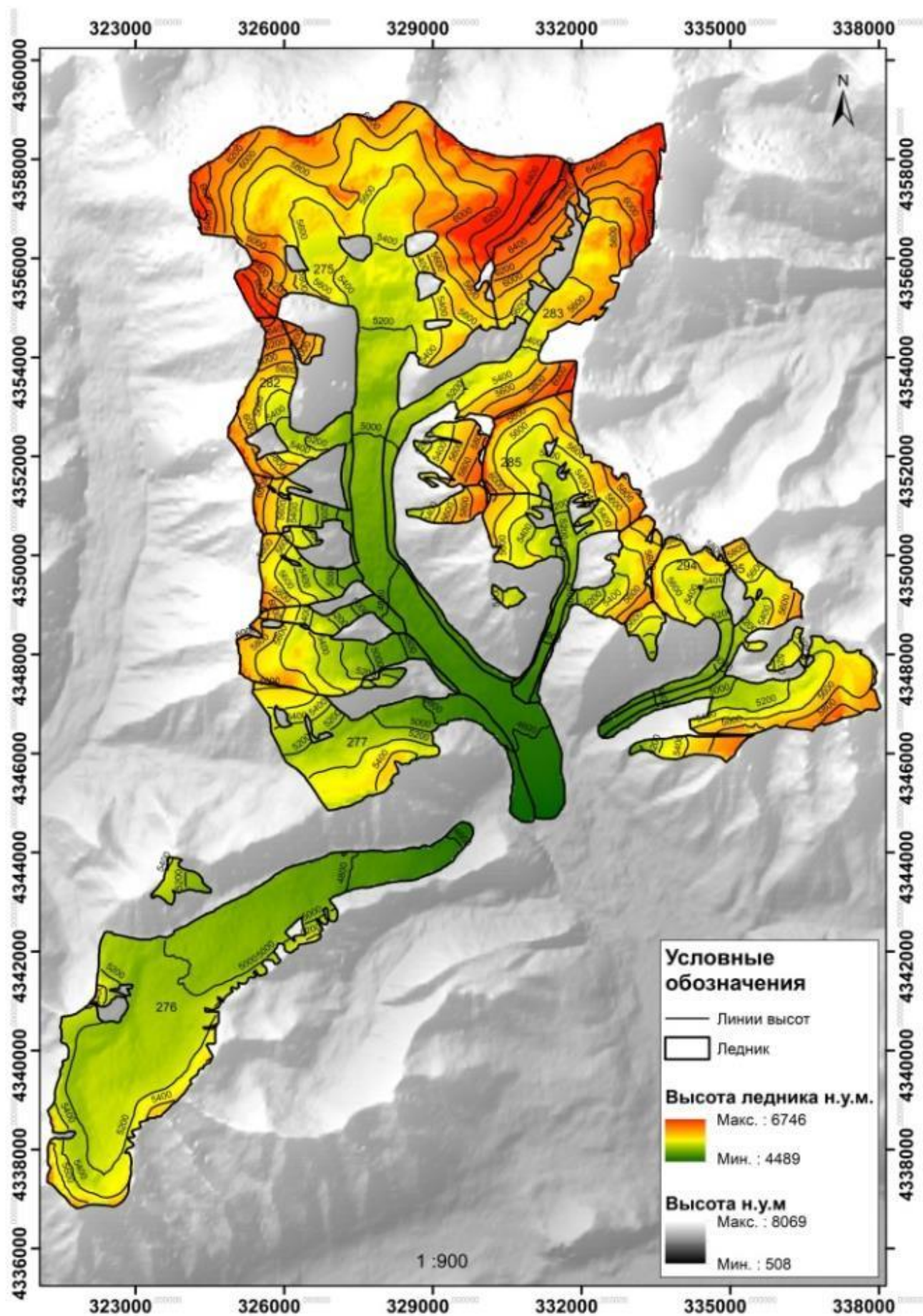


Рисунок 3.3. - Ледник Октябрьский

Ледник 276 (Западный Октябрьский), который в 1946 году был притоком ледника Октябрьский, в 1971 году уже не примыкал к нему. На космических снимках 1975, 1980 и 1990 годов видно, что язык этого ледника деградировал и отступил к 1990 году на 1 км.

В 1989–1990 годах произошла мощная подвижка ледника Октябрьский, завершающий этап которой четко зафиксирован на космическом снимке 1990 года. К 1990 года динамический конец вздвинувшегося языка ледника продвинулся на 1300 м, но не достиг границы ледника 1946 года. В подвижке приняли участие основные притоки ледника: 277, 282, 283, 285–287. Их языки продвинулись вместе с основным стволом на расстояния от 1900 м (ледник 277) до 3500 м (ледник 283). Правые притоки, ледники 278–281, практически не были затронуты подвижкой 1989–1990 годов.

Сразу после завершения подвижки в 1990 году рисунок сочленения основного ствола и притоков, а также дальность их протяжения вдоль основного ствола практически соответствовали рисунку в Каталоге ледников СССР, отражающему состояние ледника в 1946 году.

Дендритный ледник Уйсу №44 — 49

Ледник Уйсу является дендритовым ледником, образованным слиянием шести ледниковых потоков, стекающих веером с шеститысячных гребней Заалайского хребта и его южного отрога. Эти шесть потоков сливаются в общий ледниковый язык шириной около 1,5 км в долине. Все составляющие потоки динамически активны и асинхронно поставляют лед в общий ствол ледника.

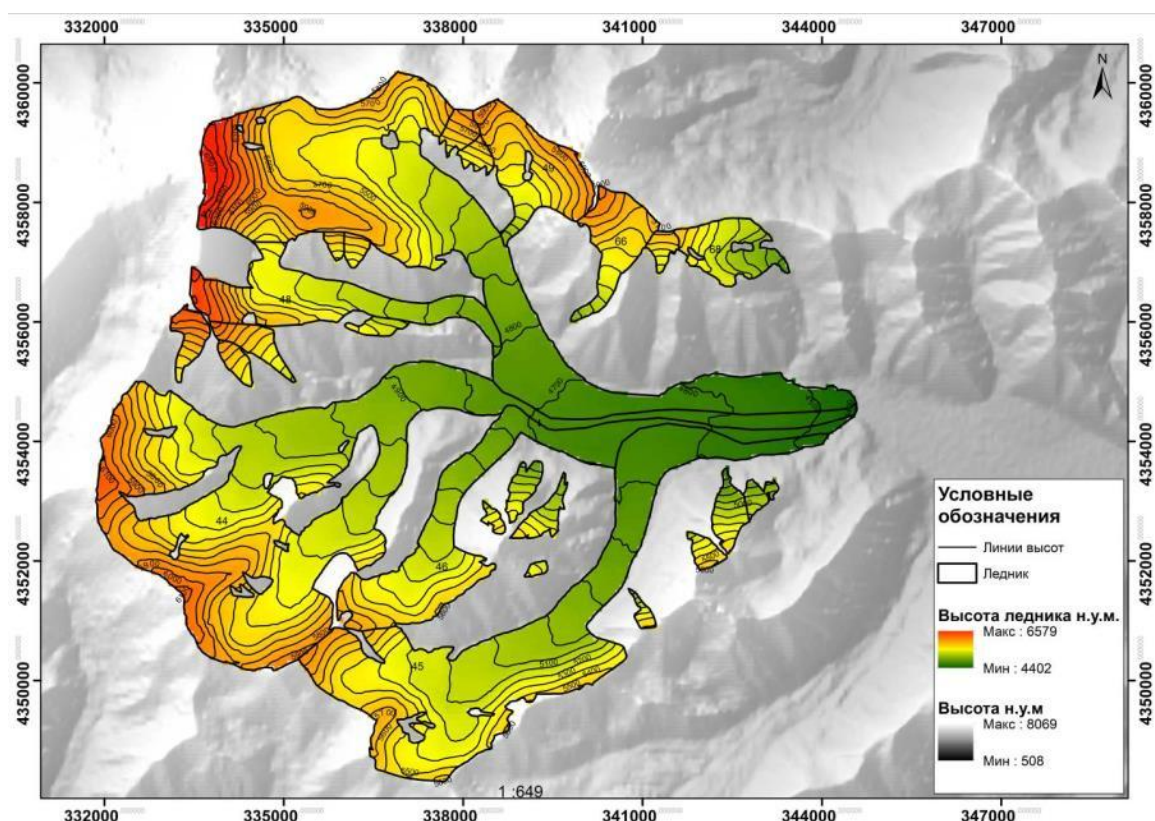


Рисунок 3.4. - Ледник Уйсу

Общий язык ледника Уйсу имеет сложную структуру со следами прошлых подвижек отдельных потоков и покрыт мощным моренным чехлом. Фронт языка резко очерчен, крут, местами обрывистый и покрыт постоянно осыпающейся мореной.

Подвижки составляющих ледниковую систему потоков происходят в пределах общего ледникового языка и их нижние границы распространения покрываются мореной.

Между 1980 и 1990 годами, согласно космическим снимкам, состояние ледника Уйсу и его составляющих потоков практически не изменилось.

3.3. Гляциологические исследования и оценка динамики оледенения бассейна реки Сарыгун дистанционным методом

Бассейн реки Сарыгун является правым притоком реки Акджилга, которая в свою очередь впадает в озеро Ховаркуль. Проведённая оцифровка ледников бассейна реки Сарыгун и оценка их площади охватывает период с 1977 по 2018 год (таблица 3.10). Анализ спутниковых

снимков за этот период показал

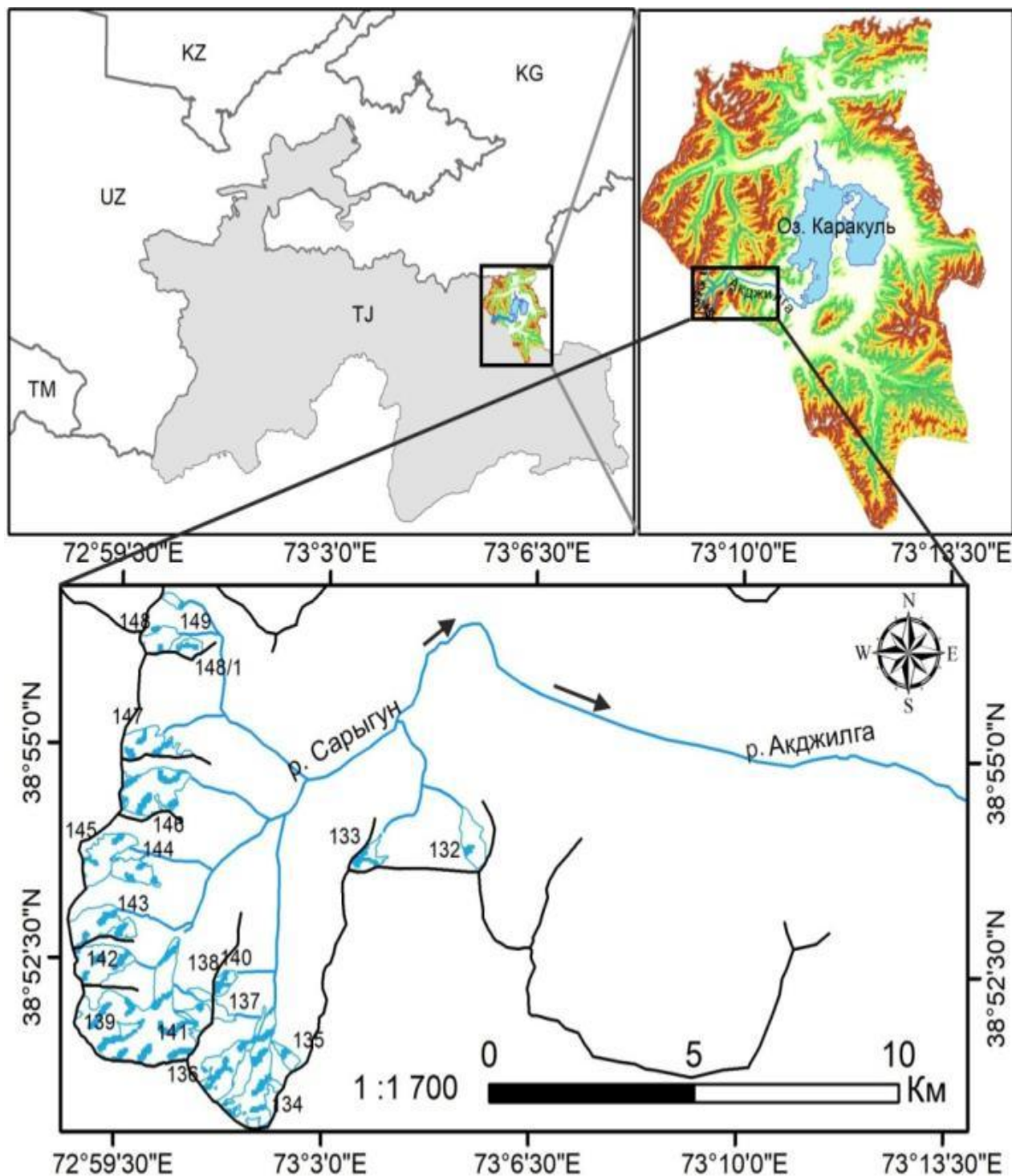


Рисунок 3.5. - Бассейн реки Сарыгун, приток озера Ховаркуль.

уменьшение площади почти всех ледников, за исключением ледника №135. Более подробные данные об изменении площади ледников приведены в таблице 3.10 [З-А].

Таблица 3.10. - Площади ледников по данным дистанционного зондирования с 1977 по 2018 гг.

Река Сарыгун приток р. Акджилга. Бассейн оз. Ховаркуль							
№ ледника	Тип	Экспозиция	Площадь ледников км ²				
			1977г.	1994г.	1998г.	2008г.	2018г.
132	Долинный	СЗ	0.59	0.55	0.54	0.54	0.53
133	Долинный	СВ	0.41	0.41	0.41	0.33	0.33
134	Долинный, часть сложно долинный	С	1.49	1.46	1.46	1.43	1.36
135	Склоновый, часть сложно долинный	СЗ	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
136	Долинный, часть сложно долинный	С	1.01	0.94	0.94	0.89	0.89
137	Долинный	В	0.16	0.16	0.17	0.15	0.14
138	Карово долинный	СВ	0.24	0.22	0.26	0.21	0.21
139	Долинный	С	3.85	3.76	3.75	3.7	3.66
140	Долинный	З	0.14	0.14	0.14	0.13	0.12
141	Висячий	З	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24
142	Долинный	В	0.97	0.97	0.98	0.94	0.92
143	Склоновый	В	1	1	0.99	0.93	0.89
144	Склоновый	С	0.54	0.52	0.52	0.47	0.46
145	Долинный	СВ	0.81	0.81	0.81	0.79	0.79
146	Долинный	В	1.32	1.28	1.27	1.23	1.23
147	Склоновый	СВ	0.84	0.81	0.82	0.74	0.7
148	Асимметрично долинный	В	0.71	0.68	0.69	0.62	0.58
149	Долинный	В	0.14	0.13	0.13	0.11	0.11
Всего			14.65	14.27	14.31	13.64	13.34

Исследования выявили сокращение общей площади ледников в изучаемом бассейне на 9% (1,3 км²) с 1977 по 2018 год. При этом в первое десятилетие уменьшение составило 0,38 км², во второе – незначительное, а в третье – 0,67 км². В четвёртое десятилетие площадь оледенения бассейна сократилась на 0,3 км².

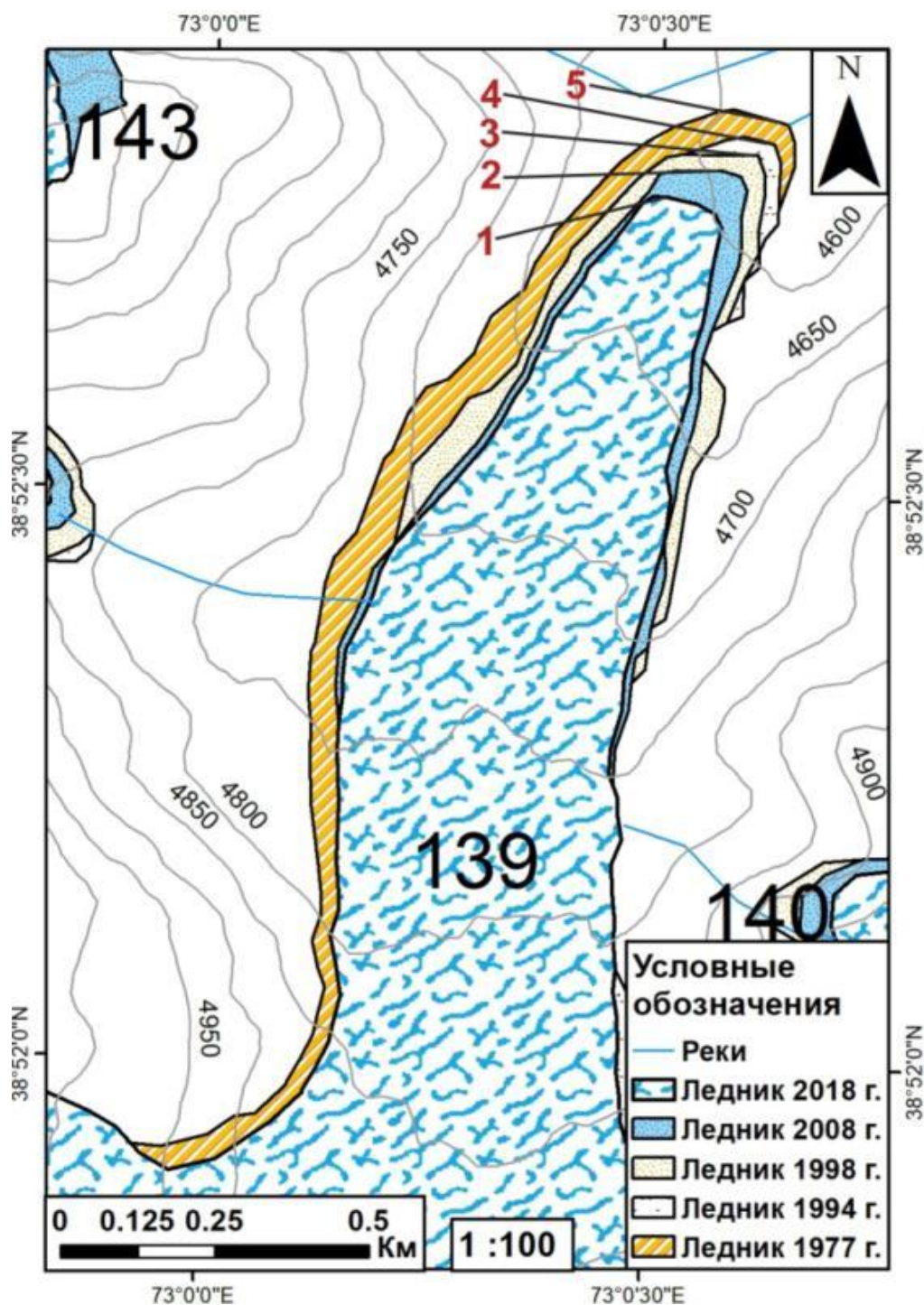


Рисунок 3.6. - Отступ ледника №139

На рисунке 3.6 показаны пронумерованные границы ледника по годам на основе спутниковых снимков. Линия 1 – граница 2018 года, линия 2 –

2008 года. Видно, что с 2008 по 2018 год ледник отступил на 80 м. С 1998 по 2008 год (линии 3, 2) отступление составило 40 м, с 1994 по 1998 год (линии 4, 3) – 30 м, с 1977 по 1994 год (линии 5, 4) – 50 м. В общей сложности с 1977 по 2018 год ледник отступил на 200 метров.

3.4. Первичные результаты измерения баланса массы ледника №139

Первое измерение баланса массы ледника на восточном Памире в бассейне озера Ховаркуль, показал нижеследующие результаты. Из-за своих высотных характеристик первая линия начинается выше изолинии 4700 м и опускается ниже этой изолинии. Это обусловлено тем, что ледник имеет неравномерное питание по правому и левому борту. Линия равного баланса массы ледника проведена между точками, равными 1,5 м в.э., которая разделяет область A1 и A2 (рисунок 2.4); для области A1 с площадью 0,06 км² было присвоено значение -1,75 м в.э., а для области A2 с площадью 0,53 км² было присвоено значение -1,25 (разница 0,5 м в.э.). Область A2 имеет большую площадь на данном леднике, это связано с тем, что данная площадь расположена на пологой местности и не имеет большой разницы высоты.

Средний баланс массы в области b1= -1,75 м в.э., площадь данной области равна A1=0,06 км², по формуле $A*b=\Delta M$ был получен баланс массы данного поля – $\Delta M1 = -0,105$ м в.э. Такие действия были проведены и для других полей, как указано ниже [7-А]:

A = область с равным балансом массы (зоны между изолиний), км²

b = присвоенное значение баланса массы, м в.э.

$$A*b=\Delta M$$

$$\Delta M_{\text{сумма}} = \Delta M1 + \Delta M2 + \dots + \Delta M6$$

$$\Delta M_{\text{сумма}} / A_{\text{сумма}} = B \text{ м в.э.}$$

Таблица 3.11. – Расчёт баланса массы

Площадь каждого поля км ²	Баланс массы каждого поля
A1 = 0,06 км ²	$\Delta M1 = A1 * b1 = 0,06 * (-1,75) = -0,105$

Продолжение таблицы 3.11

$A2 = 0,53 \text{ км}^2$	$\Delta M2 = 0,53 * (-1,25) = -0,6625$
$A3 = 0,17 \text{ км}^2$	$\Delta M3 = 0,17 * (-0,75) = -0,1275$
$A4 = 1,15 \text{ км}^2$	$\Delta M4 = 1,15 * (-0,25) = -0,2875$
$A5 = 1,21 \text{ км}^2$	$\Delta M5 = 1,21 * 0 = 0$
$A6 = 0,11 \text{ км}^2$	$\Delta M6 = 0,11 * 0,25 = 0,0275$
$A7 = 0,42 \text{ км}^2$	$\Delta M7 = 0,42 * 0,5 = 0,21$
	$\Delta M1 + \Delta M2 + \Delta M3 + \Delta M4 + \Delta M5 + \Delta M6 + \Delta M7 = -0,945$
$\text{Баланс массы} = \frac{\Delta M_{\text{сумма}}}{A_{\text{сумма}}} = \frac{-0,945}{3,66} = -0,26 \text{ м в. э.}$	

На карте (рисунок 3.7) различным цветом обозначен средний годовой баланс массы ледника для каждого поля. В точке, где был выкопан шурф, зоне аккумуляции присвоено значение 0,49 м в.э. исходя из этого, для верхней области аккумуляции было присвоено значение 0,50 м в.э. (рисунок 3.6, синяя область), так как расчёт баланса массы осуществляется с разницей между линиями с одинаковым балансом массы в 0,5 м в.э. Для проведения нулевой линии использован зонд, который применяется для определения высоты снежного покрова непосредственно на леднике, и спутниковый снимок SENTINEL, позволивший определить снеговую линию [7-А]. В Юго-Восточной части ледника имеется крутой склон (рисунок 3.7, белая область на карте (рисунок 2.4 Г, Д, область А5), на котором накопление снега маловероятно, поэтому мы присвоили этой области значение ноль. У подножия склона имеется скопление снежной лавины, которая питает ледник. При интерпретации данных было решено присвоить этой области значение 0,25 м в.э.

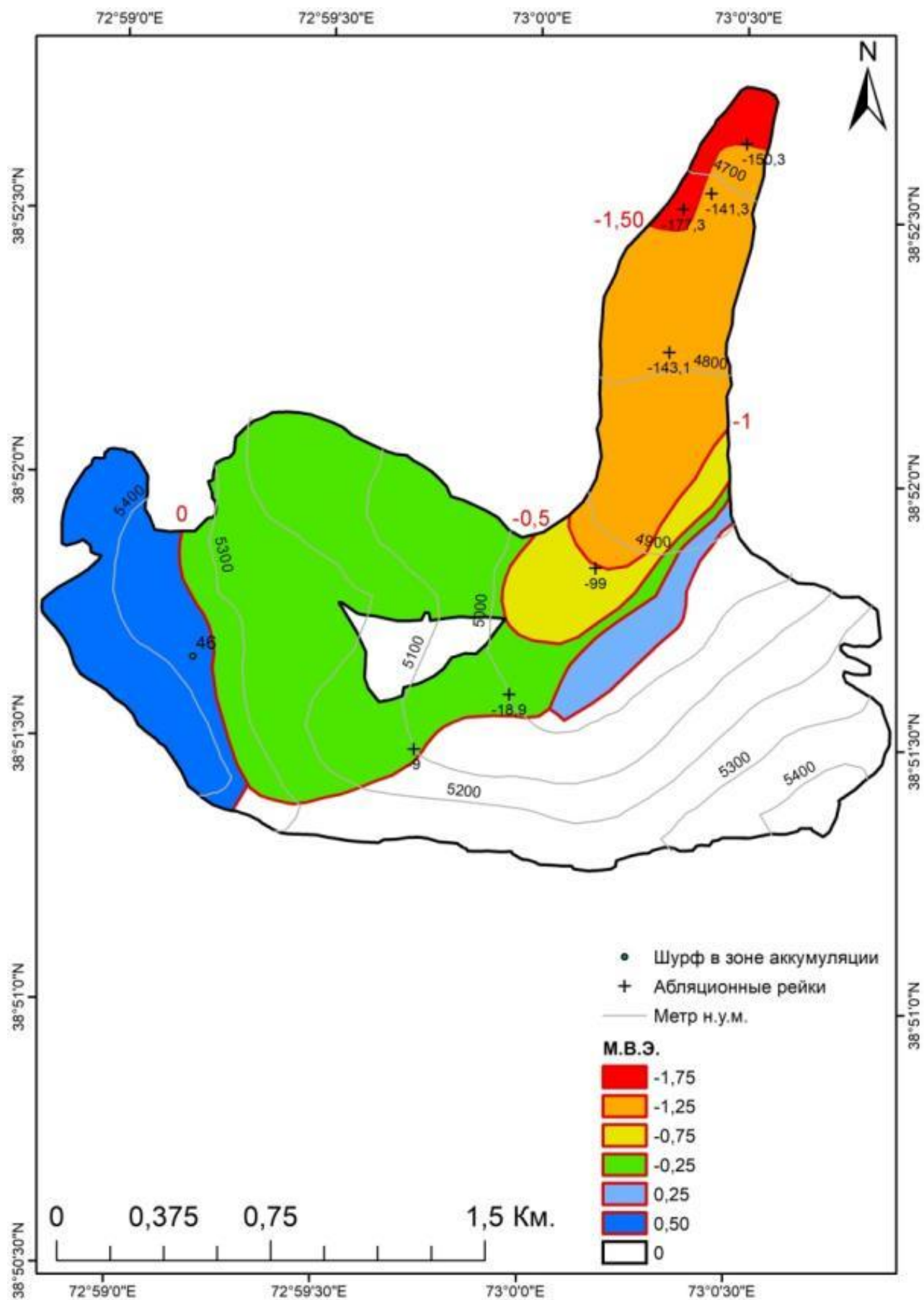


Рисунок 3.7. - Вычисление баланса массы ледника методом контурных линий

По данным Всемирной службы мониторинга ледников, с 1960–1970-х и до середины 1980-х гг. баланс массы ледников несколько стабилизировался во многих районах земного шара – в Канаде, на Аляске, в Альпах, в Тянь-шаньском регионе и др. [176]. Но следует отметить, что в разных регионах динамические колебания ледников происходят по-разному, что связано с климатическими особенностями, рельефом местности, расположением ледников и другими свойствами самого ледника.

Исследования, проведённые на леднике №139 показывают, что ледники на Восточном Памире в бассейне озера Ховаркуль более стабильны, чем в других бассейнах рек Таджикистана. Скорее всего, это может быть связано с тем, что ледники, расположенные на высоте более 4500 метров над уровнем моря и где климат сурово холодный [7-А]. Однако, если принять во внимание тот факт, что экспозиция ледника северная и ледник находится в цирке отрогов хребта Зулмарт и это ограничивает прямые попадания солнечных лучей на ледник, что считается одним из главных факторов таяния ледников на Восточном Памире, а также такое расположение препятствует сносу с поверхности ледника снежного покрова, то и эти факторы могут повлиять на динамику данного ледника (рисунок 3.8). Юго-Восточная сторона ледника №139 имеет крутой склон, где выпавший снег спускается вниз в виде небольших лавин это можно заметить по спутниковым снимкам и по характеру склона можно определить, что снегонакопление в таких склонах считается маловероятным.

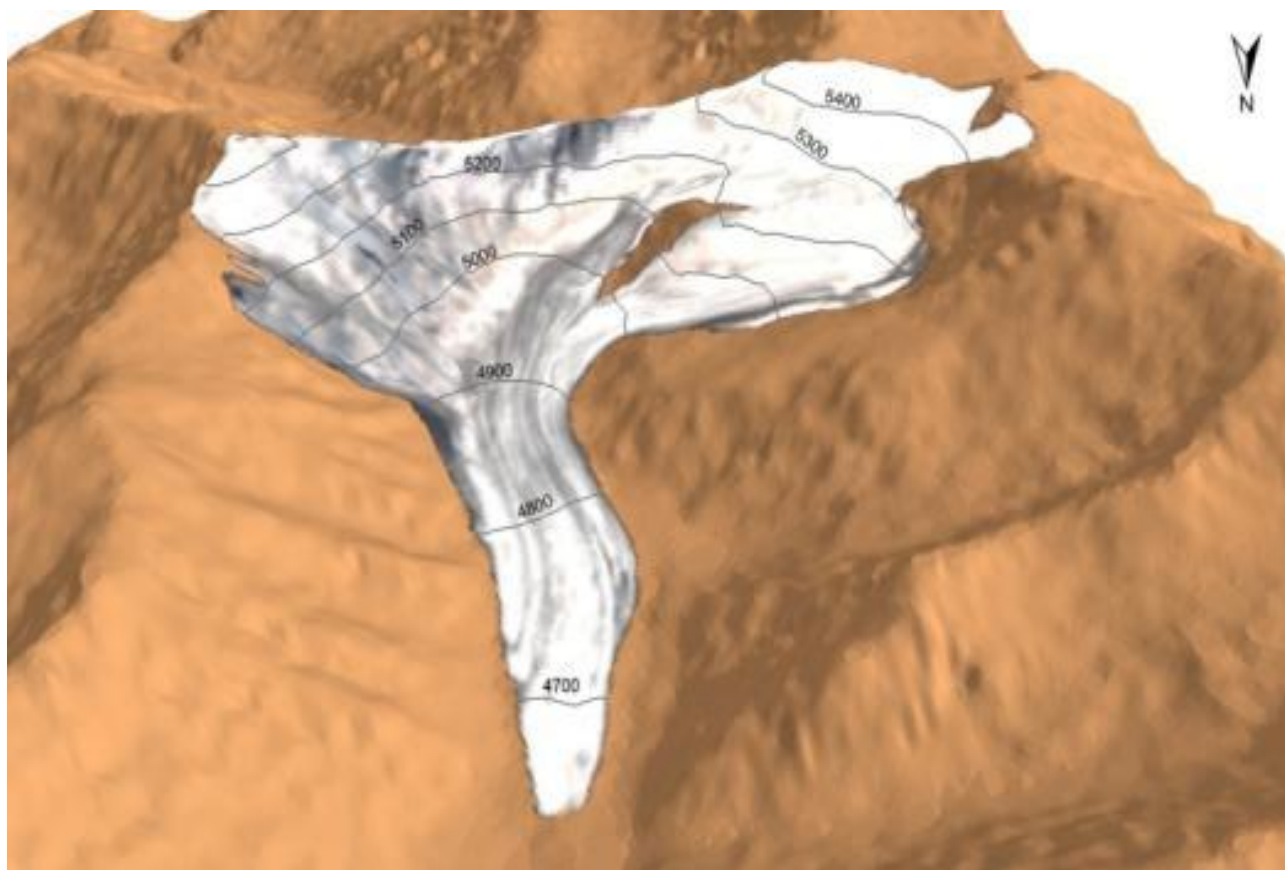


Рисунок 3.8. – 3D модель ледника №139

3.5. Многолетний баланс массы ледника №139

Для того, чтобы иметь правильное понимание о балансе массы ледника необходимо иметь многолетний ряд наблюдений. Ледник №139 является уникальным, потому что является единственным ледником на Восточном Памире, который имеет подобный ряд. Эти работы позволили, получить ценную информацию о леднике и на её основе можно получить общее понимание о динамике ледников в данной местности. Ниже приведены результаты многолетних исследований на леднике, которые имеют большое значение для последующих изысканий.

Зона абляции

Проведённые экспедиционные работы позволили определить таяние ледника в зоне абляции с помощью установленных реек. Рейки были установлены на высотах от 4600 до 5100 метров над уровнем моря, которые позволили определить градиент таяния ледника в зоне абляции за все периоды исследования ледника, так как данные рейки при

необходимости повторно устанавливались на тех же местах. Это позволяет определить уровень таяния ледника на разных высотах ежегодно, что является важным для понимания процессов, происходящих на леднике.

По полученным данным с реек было выявлено, что в среднем поверхность зоны абляции тает на 1 метр, а градиент таяния начинается от 1,5 метра на высотах 4600-4700 метрах; 0,7 метра тает на высотах 4800-4900 метров; на высотах более 5000 метров таяние составляет примерно 0,2 метра [14-А].

Данные абляционных реек

Для лучшего понимания характера динамики поверхности абляционной зоны количество точек для установки реек было увеличено до 10 штук, в каждой точке каждый год устанавливались рейки по мере необходимости. Для определения градиента таяния поверхности ледника было определено среднее значение таяния ледника для каждой точки, где были установлены рейки. На рисунке 3.9 приведён график, где указаны данные о таянии поверхности ледника по высотам. На графике видно, что ледник от высоты 4600 до 4800 метров тает примерно одинаково от 1800 мм. в.э. до 1400 мм. в.э., а начиная с высоты 4850 ледник тает меньше 1000 мм. в.э. и достигает уровня 200 мм. в.э. на высотах 5000-5100 метров. Тем самым рисуется общая картина градиента таяния ледника в зоне абляции, данный градиент говорит о том, что основная масса льда теряется при таянии языковой части ледника до высоты 4900 метров, а после таяние ледника резко уменьшается. Хотелось бы отметить тот факт, что до высоты 4900 зона абляции более пологая и широкая, а после этой высоты начинается крутой склон со сложным рельефом (рисунок 3.8), где на динамику ледника могут повлиять множество факторов.

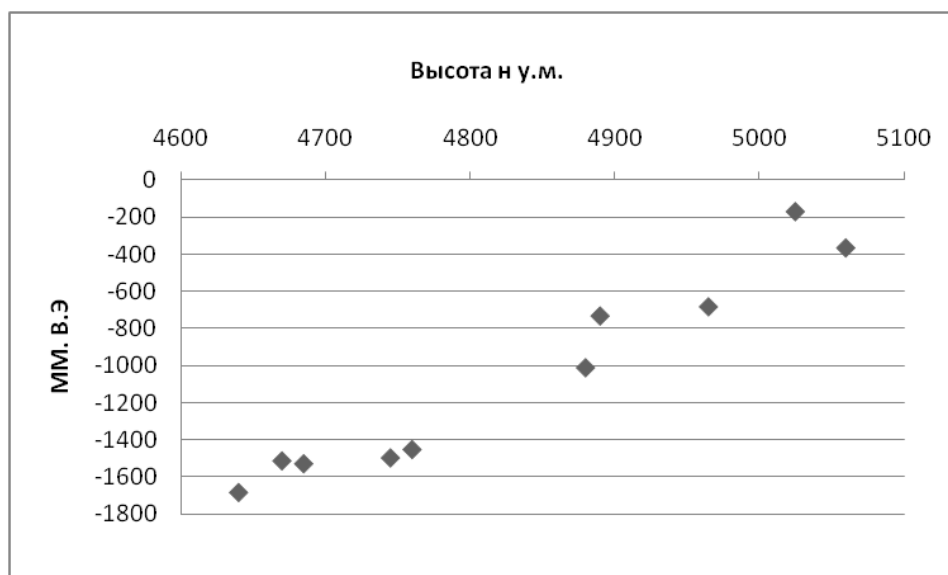


Рисунок 3.9. - Среднее значение абляционных реек за 4 года

На рисунке 3.9 приведены усредненные данные таяния ледника по каждой рейке для общего понимания динамики поверхности ледника по высотам. На рисунке 3.10 отображены таяние ледника по каждой рейке установленные за период исследования, где наглядно отражены ежегодные изменения для каждой установленной абляционной рейки. Данные показывают, что таяние ледника в каждой точке измерения год за годом увеличивается.

Неравномерное таяние на всех рейках является результатом сложного рельефа поверхности ледника, однако полученные результат подтверждает факт о том, что ледник с каждым годом теряет всё больше массы.

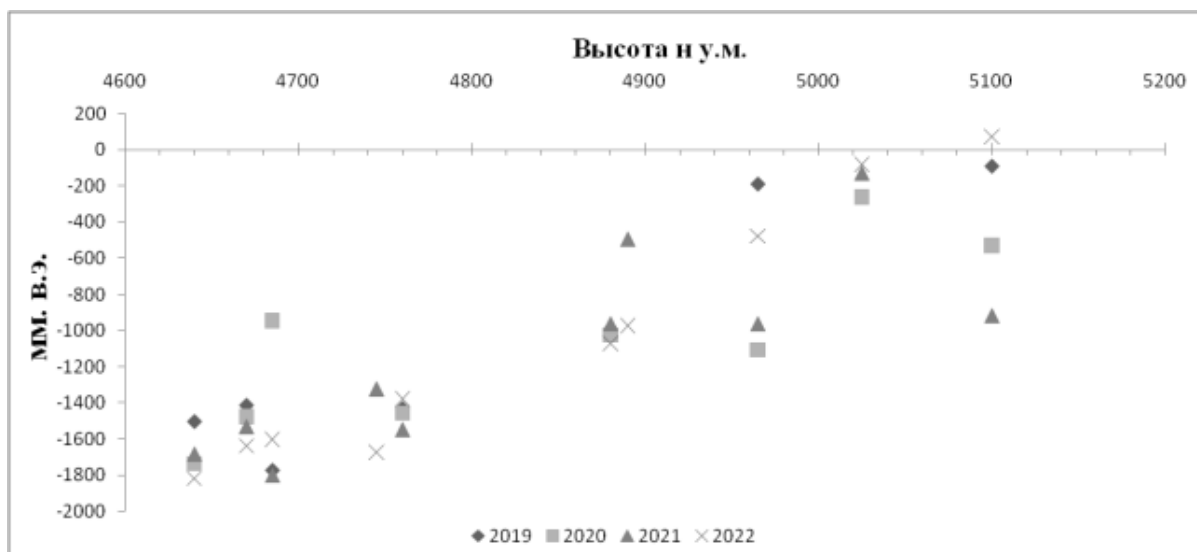


Рисунок 3.10. - Изменение поверхности ледника №139 по рейкам за 4 года.

Пространственное распределение абляции

Распределение рек на поверхности ледника была с учетом сложного рельефа поверхности, где по данным рек в нижней части языка ледника имеется наибольшее таяние так как в этой области отсутствует лавинное питание, а площадь расположена на открытой местности, а солнечные лучи попадают непосредственно на эту часть ледника в течении дня. Область абляции выше, как уже было сказано, имеет также сложный рельеф, что влечёт за собой множество факторов, которые влияют на таяние ледника. Эти факторы зависят от накопленного снега в зоне аккумуляции и лавинных отложений, а также отроги хребтов, загораживающие солнечный свет, которые также влияют на таяние верхней части зоны абляции ледника.

3.6. Моделирование и визуализация результатов расчёта годового баланса ледника №139

Модель отображает распределение годовых значений баланса массы поверхности (SMB) для ледника №139 на Восточном Памире в бассейне озера Ховаркуль за период с 07/16/2018 по 07/15/2019. Разные цвета представляют различные значения SMB в метрах водного эквивалента (м в.э.).

Наиболее негативные значение баланса массы (SMB), составляет от -1,0 до -1,5 м в.э., эти области в основном расположены на языковой части ледник и обозначены оранжевым цветом (рисунок 3.11.), это указывает на значительную потерю массы в этой области. Зона аккумуляции ледника на рисунке 3.11. обозначена светло голубым цветом, где модель показывает накопление снега от +0,2 до +0,5 м в.э. это говорит о том, что ледник имеет обширную зону накопления снега. Несмотря на это ледник демонстрирует отрицательный баланс массы ледника, который составляет за период 2018-2019 гг. -0,247 м в.э., что указывает на общую потерю массы ледника. Среднеквадратичная ошибка в моделировании баланса массы (SMB) составляет 0,090 м в.э., модель показывает относительно небольшую

погрешность, что свидетельствует о хорошей точности расчётов.

Однако из-за сложного рельефа поверхности ледника отрицательные значения баланса массы встречаются и выше фирновой линии, но на общий баланс массы эти значения сильно не влияют.

В результате моделирования получена детальная схема баланса массы поверхности (SMB) ледника, что позволяет лучше понять процессы, происходящие на его поверхности и в дальнейшем более точно прогнозировать состояние данного ледника.

2018/2019

Период измерения (годовой, скорректированный): 07/16 – 07/15

$b_n = -0.247$ м в.э.

СКЗ: 0.090 м в.э.

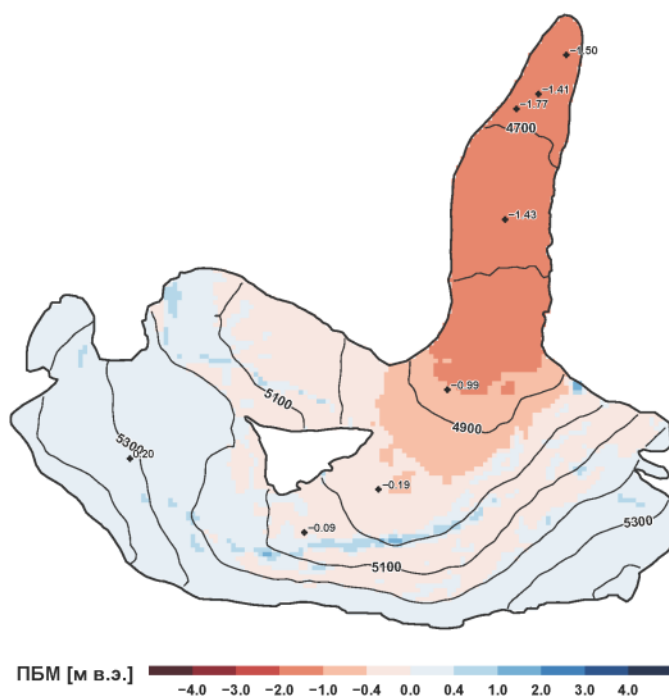


Рисунок. 3.11. - Схема результата моделирования баланса массы ледника №139 за 2018-2019 гг.

3.6.1. Оценка и визуализация результатов динамики годового баланса массы ледника №139

На графике (Рисунок 3.12) отражены результаты моделирования зимней, летней и годовой баланса массы ледника по месяцам, это позволяет отслеживать периоды накопления и таяние ледника №139.

На рисунке 3.12а показано изменение в течение гидрологического

года по месяцам, отрицательные значения наблюдаются с июля по ноябрь, достигая минимума около $-0,6$ м в.э. в октябре, что соответствует периоду абляции (таяния) ледника. Положительные значения наблюдаются с декабря по июнь, со значением до $0,2$ пунктов в м в.э. повышения.

На рисунке 3.12б отражены данные зимней, летней и годовой баланса массы в отдельности что позволяет, проследит за динамикой ледника в отдельных временных периодах, важность таких данных заключается в использовании в гидрологических моделях для лучшего прогнозирования стока рек от ледников.

Данный график (Рисунок 3.12 б) иллюстрирует характерный годовой цикл баланса массы для ледника в этом регионе, с чётко выраженным периодом аккумуляции в зимние месяцы и абляции в летние, с максимумами и минимумами в соответствующие периоды.

Сопоставление этих временных данных с пространственным распределением SMB на карте может дать более полное представление о процессах, влияющих на баланс массы в различных частях ледника.

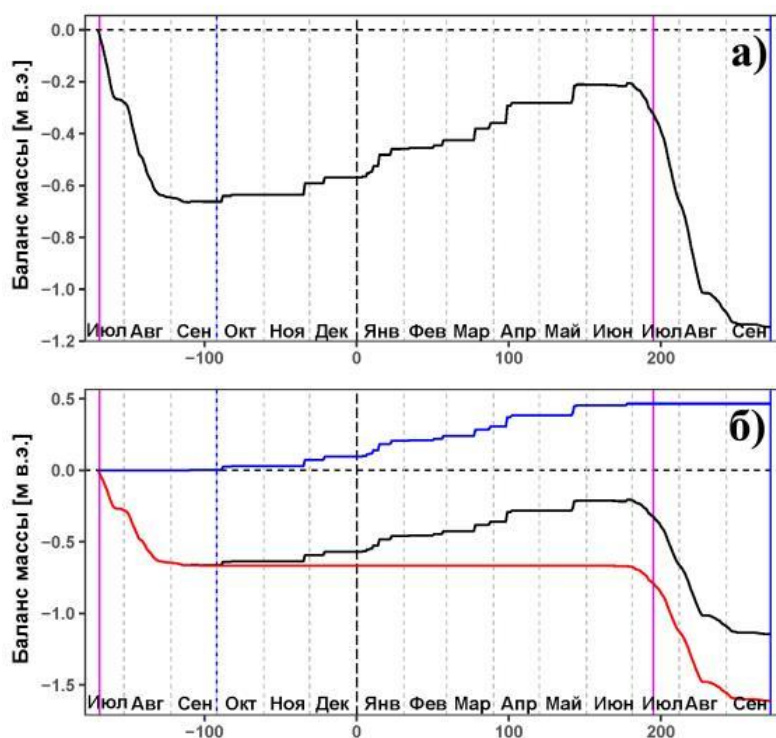


Рисунок. 3.12.- График моделирование поверхностной баланса массы ледника №139

Выводы по третьей главе

1. В бассейне озера Ховаркуль насчитывается 432 ледника площадью более 0,1 км². Наибольшее количество ледников (40,6%) имеет площадь от 0,1 до 0,5 км². Самые крупные ледники (площадью более 10 км²) составляют всего 1,6% от общего количества, но занимают 20,2% общей площади оледенения.

2. В бассейне озера Ховаркуль преобладают долинные (32,4%) и склоновые (30%) ледники. Наибольшее количество ледников ориентировано на север (29,2%) и северо-восток (18,5%). Наибольшая площадь оледенения (28,4%) приходится на высоты 4400-4600 м над уровнем моря. Основная часть ледников расположена в диапазоне высот 4200-5000 м.

3. Среднее таяние в зоне абляции составило около 1000 мм водного эквивалента в год. Максимальное таяние наблюдалось на высотах 4600-4700 м (1500 мм в.э.), а минимальное - на высоте 5000 м (200 мм в.э.).

4. Годовой баланс массы ледника гляциологическим методом за исследуемый период (2019-2022 гг.) варьировался от -206 до -310 мм в.э. Кумулятивный баланс массы за этот период составил -250 мм в.э.

5. Моделирование годовой баланс массы ледника за период 2018-2019 гг. составил -0.247 м водного эквивалента (м в.э.), что указывает на общую потерю массы. В зоне абляции потери ледника зафиксировано от -1.5 а в зоне аккумуляции зафиксировано сохранение снежного покрова до +0.5 м в.э. Выявлен чёткий годовой цикл с периодом абляции с июля по ноябрь (минимум около -0.7 м в.э. в октябре) и периодом аккумуляции с декабря по июнь (максимум около 1.0 м в.э. в апреле-мае).

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДНИКОВ БАССЕЙНА ОЗЕРА ХОВАРКУЛЬ

4.1. Динамические характеристики ледников по результатам дистанционного зондирования

Анализ деградации ледников в зависимости от экспозиции [159, 3-А] показал, что ледники с восточными и северо-восточными экспозициями подвержены деградации больше, чем ледники северной, западной и северо-западной экспозиции (рисунок 4.1) [3-А].

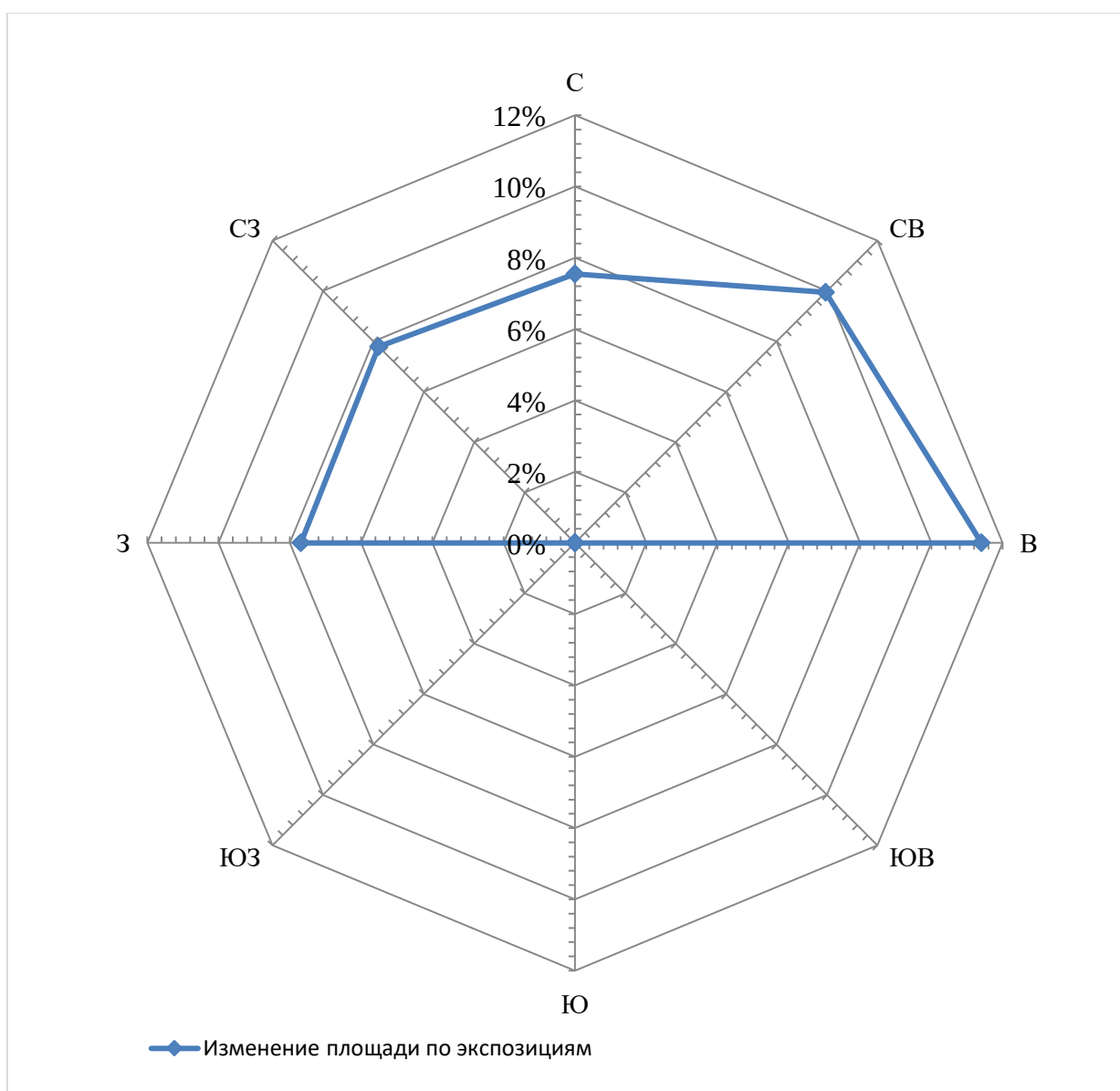


Рисунок 4.1. - Сокращение площади оледенения бассейна по экспозиции в процентах за период 1977 - 2018 гг [3-А].

Анализ динамики деградации в зависимости от типа ледников выявил, что наиболее подвержены деградации асимметрично-долинные, склоновые и карово-долинные ледники (таблица 4.1).

Таблица 4.1. - Изменения площади оледенения бассейна по типу в процентах

Тип ледников	Уменьшение площади в %
Долинный	-7%
Долинный, часть сложно долинный	-10%
Склоновый, часть сложно долинный	0%
Карово долинный	-13%
Висячий	-4%
Склоновый	-14%
Асимметрично долинный	-18%

Анализ данных дистанционного зондирования показал сокращение площади ледников в бассейне реки Сарыгун. В частности, с 1977 по 1994 год потеря площади составила 0,38 км² или 3% от общей, а с 1994 по 1998 год площадь почти не изменилась. В то же время с 1998 по 2008 год уменьшение площади оледенения достигло максимума, около 5%. С 2008 по 2018 год сокращение составило всего 2%. Наибольшее уменьшение площади пришлось на 1998-2008 годы. За этот период основную площадь потеряли ледники восточной и северо-восточной экспозиции площадью 0,1-0,3 км², потерявшие около 20% площади, и такой же экспозиции площадью 0,4-0,7 км², потерявшие около 10% площади, что подтверждает тезис о более быстром таянии малых ледников. Остальные ледники бассейна, независимо от площади и экспозиции, имели незначительные изменения площади, средний годовой темп сокращения площади ледников составил 0,33 км².

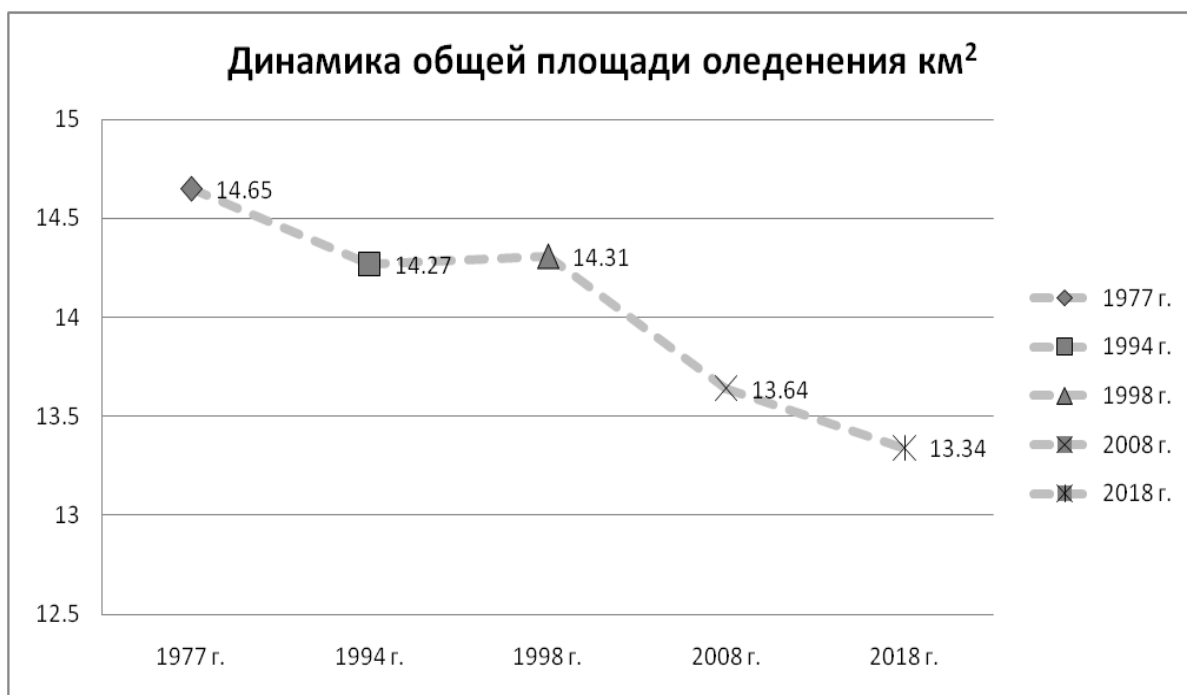
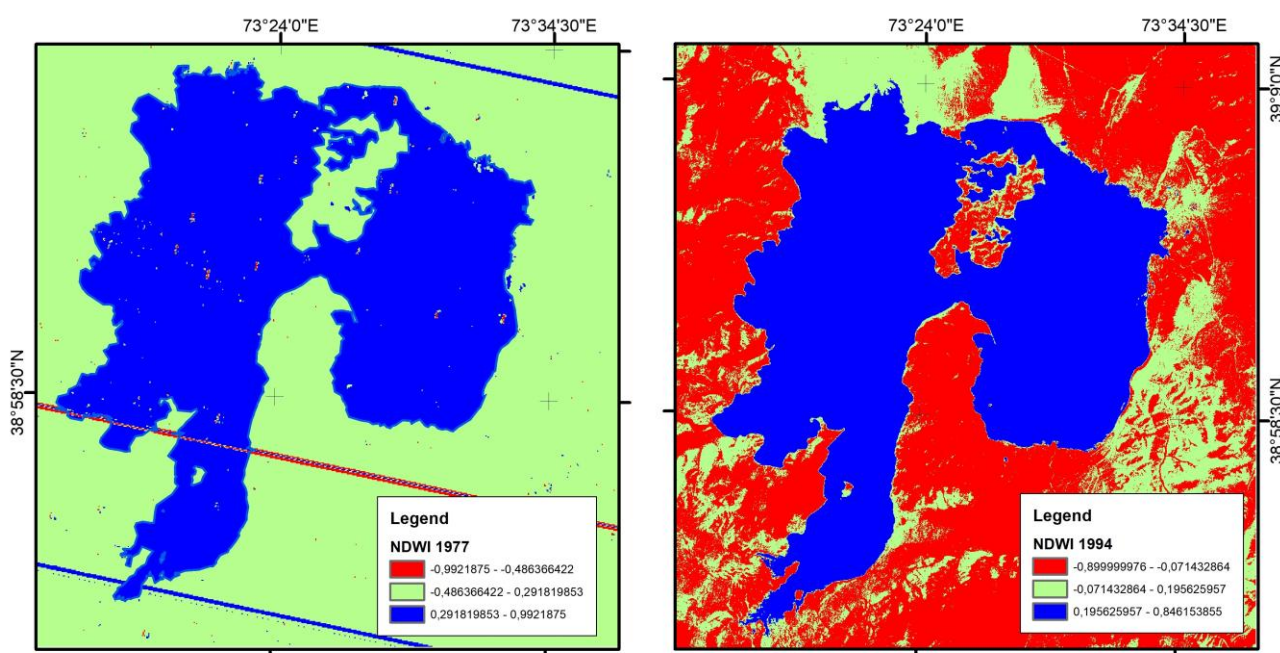


Рисунок 4.2. - Динамика площади оледенения.

4.1.1. Динамики зеркальной площади озеро Ховаркуль с 1972 по 2021 гг.

Использование дистанционного зондирования позволило определить динамику озера Ховаркуль, результаты показывают, что озеро увеличивает зеркальную площади за исследуемый период и площадь увеличения составляет 36,9 км² и это может быть связана с таянием ледников бассейна озера Ховаркуль.



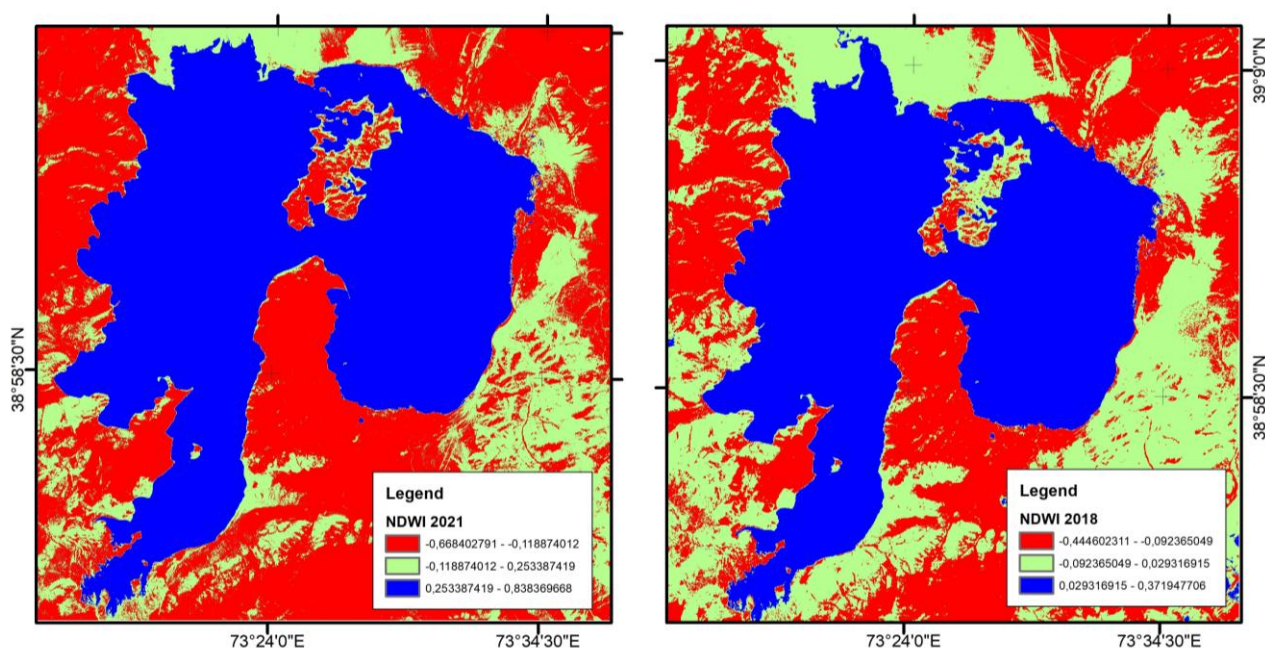


Рисунок 4.3. - Динамики зеркальной площади озеро Ховаркуль с 1977 по 2018 гг.

Таблица 4.2. - Динамики зеркальной площади озеро Ховаркуль с 1972 по 2021 гг.

Спутниковый снимок	Дата	Площадь озеро, км ²	Примечание
LM01_L1TP_162033_19720908_2018042 9_01_T2_B4.TIF	19720908	372,4	NDWI
LM02_L1TP_162033_19770822_2018042 2_01_T2_B4.TIF	19770822	375,9	NDWI
LT05_L1TP_151033_19940901_2017011 3_01_T1_B2.TIF	19940901	396,7	NDWI
LC08_L1TP_151033_20130905_2020091 2_02_T1_B3.TIF	20130905	412,3	NDWI
LC08_L1TP_151033_20180903_2018091 2_01_T1_B3.TIF	20180903	415,4	NDWI
T43SCD_20200821T055641_B03.jp2	20200821	410,6	NDWI
T43SCD_20210905T055641_B03.jp2	20210905	409,3	NDWI

4.1.2. Современное состояние малых ледников бассейна озера

Ховаркуль: исследования и оценка

Малыми ледниками принято называть объекты размером менее 0,1 км² [160]. Малые ледники более чутко реагируют на изменение климата и приведённые ниже примеры этому подтверждение. На основании проведения работы по дистанционному зондированию с 1994 по 2018 гг. для выявления количества и площади ледников меньше 0,1 км² в бассейне озера Ховаркуль получены следующие результаты: наблюдается значительное сокращение количества ледников за период с 1994 по 2018 год. За этот промежуток времени число ледников уменьшилось с 247 до 197, что составляет снижение примерно на 20%. Помимо уменьшения количества, также произошло заметное сокращение общей площади, занимаемой ледниками в этом регионе. В 1994 году их суммарная площадь составляла 11,0216 км², а к 2018 году она снизилась до 8,7774 км². Это означает потерю около 2,2442 км² ледниковой поверхности или около 20% от исходной площади. Таким образом, предоставленные данные свидетельствуют о значительном сокращении численности и площади малых ледников в бассейне озера Ховаркуль за период с 1994 по 2018 год.

Уменьшение численности и площади малых ледников действительно может служить ярким индикатором изменения климата в данном регионе. Малые ледники являются более чувствительными из-за быстрой реакции на колебания климата и поэтому сокращение площади и количества ледников на 20% за 24 года является доказательством того что и на Восточном Памире ощущаются последствия изменения климата [4-А].

Желтые точки на карте (Рисунок 4.4.) показывают ледники в 1994 году, которые распределены по всему бассейну озера Ховаркуль особенно на южном склоне Заалайского хребта, однако к 2018 году многие из этих ледников исчезли, особенно в центральной и северной части бассейна [4-А].

Такое значение таяние ледников может повлиять на гидрологический режим и экосистему бассейна и увеличение площади зеркала озера Ховаркуль за последние годы это подтверждает, а также столь интенсивное таяние оледенения может повлиять не только на уровень озера Ховаркуль но и на ее состав что имеет последующие последствия для экосистемы. Также уменьшение количества и площади оледенения негативно влияет на отражательной способности поверхности (альбедо) данной местности, что увеличит поглощение солнечной радиации, это в свою очередь приведет хот к небольшому, но увеличению температуры в данной местности.

Изучения малых ледников является неотъемлемой частью исследования криосферы и является важным из за своих свойств к быстрой реакции на климатическим изменения.

Данная работа вносит важный вклад в изучение этой проблемы и демонстрирует ценность использования данных дистанционного зондирования для отслеживания динамики ледников. Такой мониторинг необходим для своевременного выявления изменений и, принятия соответствующих мер по адаптации к ним [4-А].

Ниже приведена карта с ледниками меньше 0.1 км^2 «как точки» бассейна озера Ховаркуль, выявленные с помощью спутниковых снимков. Результаты показывают, что ледники малых размеров распределены по всему бассейну. Ледники на карте, обозначенные красными точками, получены со спутниковых снимков 2018 года а жёлтые точки – ледники, полученные со спутниковых снимков 1994 года [4-А].

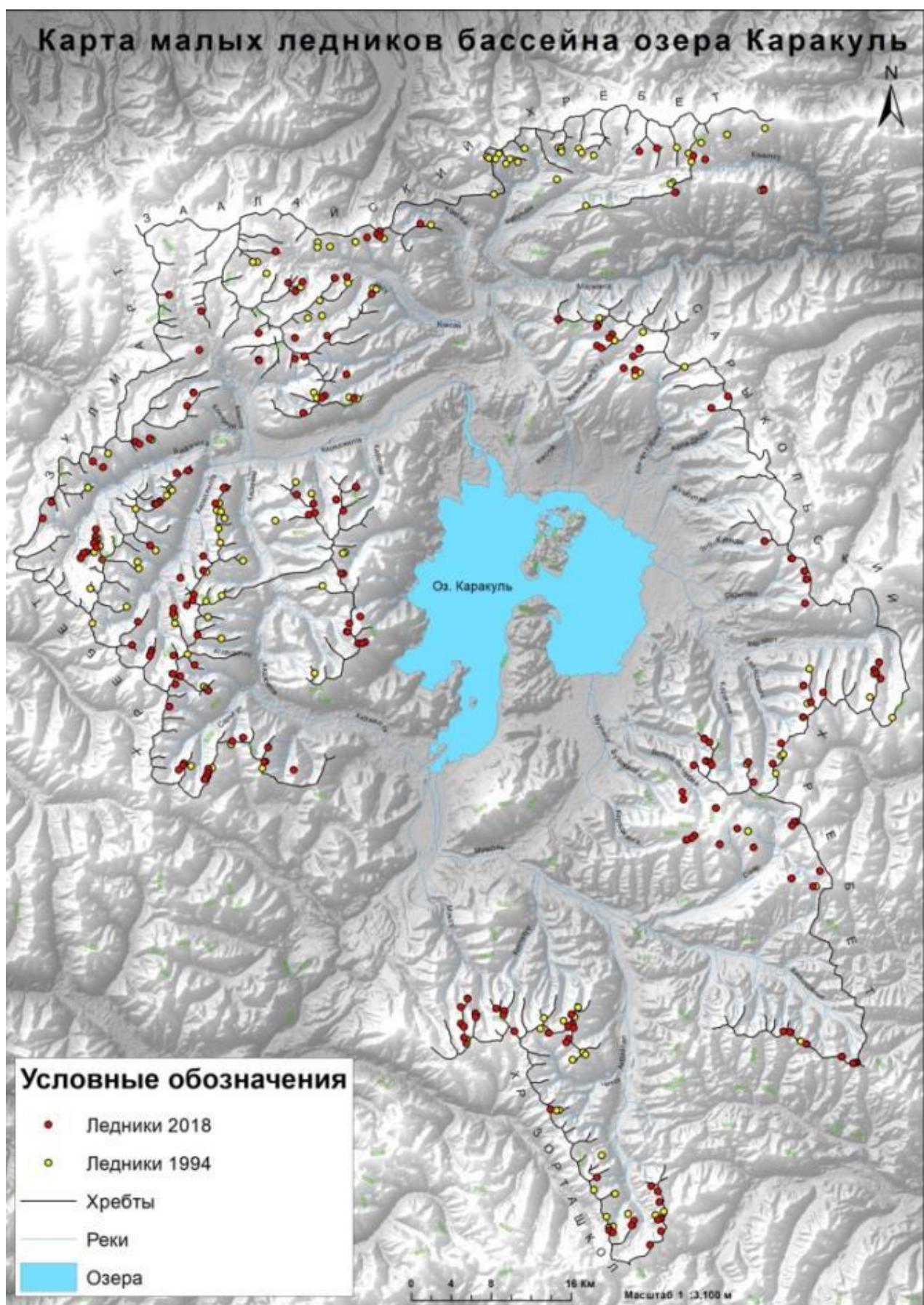


Рисунок 4.4. - Карта малых ледников бассейна озера Ховаркуль

4.2. Баланс массы ледника

Годовые значения баланса массы

После камеральных расчётов полученных данных с ледника путём проведения экспедиционных работ были получены следующие результаты. Измерение баланса массы за 2018-2019 год показало -260 мм. в.э., это первый результат измерения баланса массы ледника на Восточном Памире. Последующие измерения баланса массы ледника дали похожие результаты. Измерение 2019-2020 гг. дали результат -210 мм. в.э., 2020-2021 гг. -206 мм. в.э. а в 2021-2022 гг. результат измерения баланса массы был -310 мм. в.э.

Расчёт баланса массы

Данные, полученные на полевых изысканиях, дали нам возможность рассчитать баланс массы методом изолиний (рисунок 4.5) и профильным методом (рисунок 4.6).

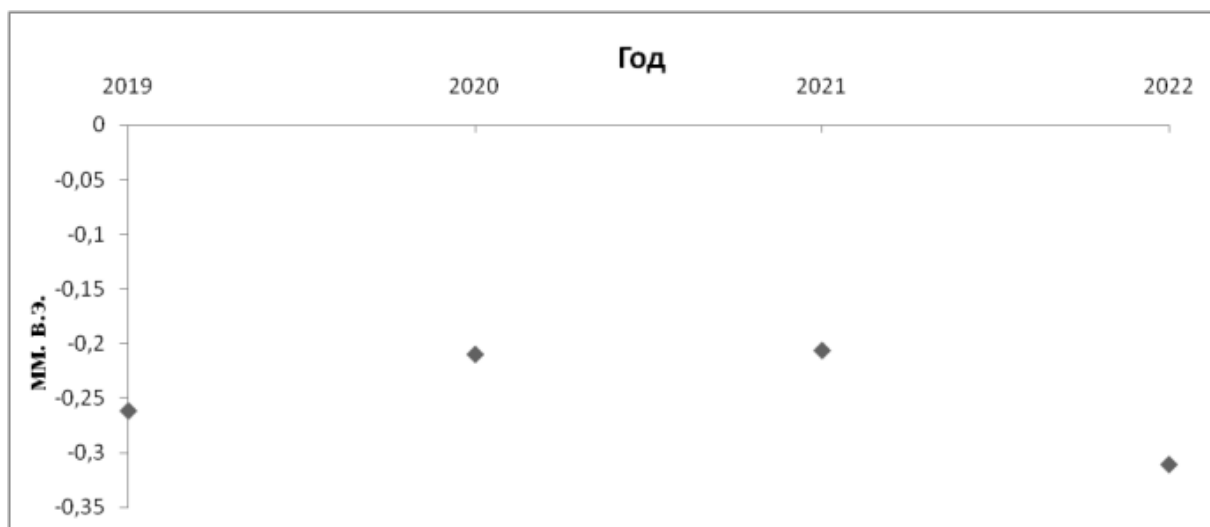


Рисунок 4.5. - Баланс массы методом изолиний

Метод изолиний подразумевает построение карт и нанесение на неё изолиний, которые показывают значение баланса массы на поверхности ледника, используя данные реек в зоне абляции и шурфа в зоне аккумуляции. Данный метод показывает общие характеристики таяния ледника в различных областях.

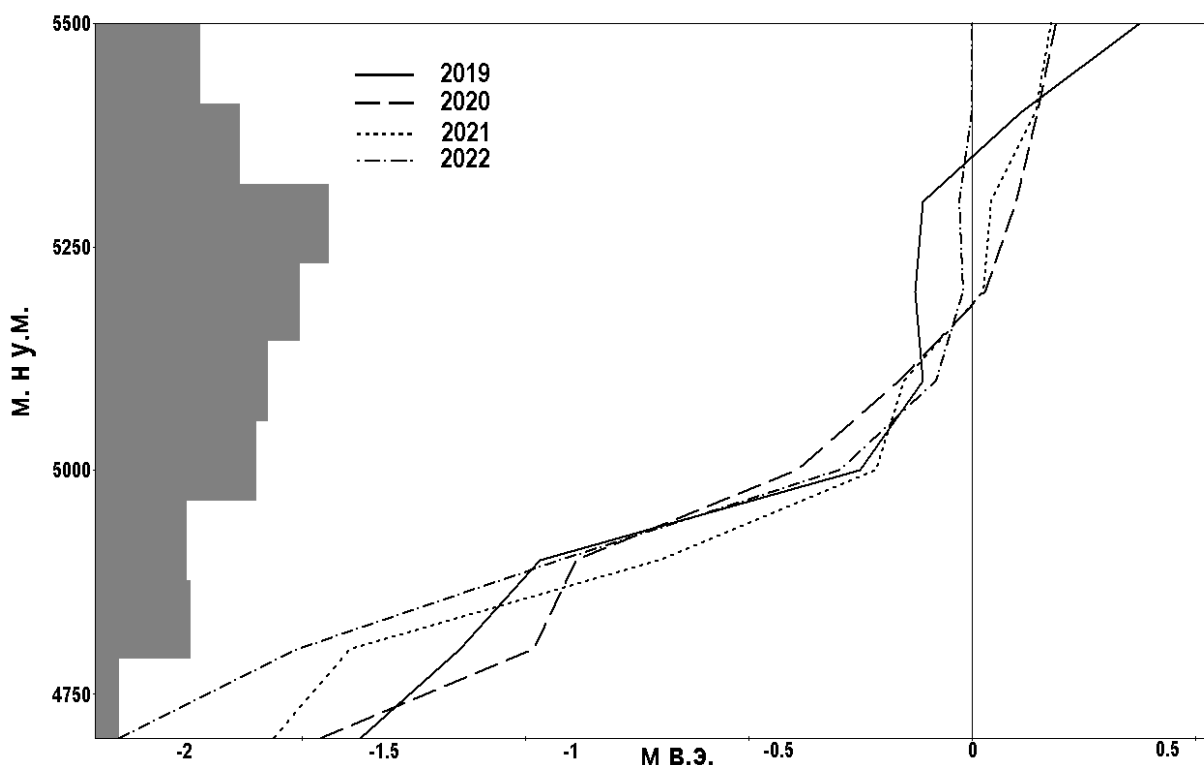


Рисунок 4.6. - Баланс массы профильным методом

Баланс массы ледника профильным методом даёт возможность визуально определить взаимосвязь высотных диапазонов профилей и динамики ледника, что является важным для понимания поведения ледника.

Средний баланс массы и его изменчивость

Результаты исследования показывают, что средний баланс массы ледника за исследуемый период составил -250 мм в.э. За исследуемый период годовой баланс массы изменялся незначительно, за исключением последнего года. В последнем году в зоне аккумуляции сезонный снег полностью растаял, и поэтому для зоны аккумуляции было присвоено значение 0, что показало баланс массы -310 мм в.э. Несмотря на нулевую аккумуляцию, баланс массы изменился не столь критично и был в пределах общей тенденции динамики ледника [14-А].

Перспективы баланса массы

В целом данные результаты показывают, что ледник Восточный Зулмарт на данный момент находится в состоянии отрицательного баланса массы за последние 4 года. Можно предположить, что при умеренных

метеорологических условиях, если зимние осадки будут выше средних значений, а летние температуры не будут критически высокими, то при текущих условиях абляции можно будет увидеть и положительный баланс массы на данном леднике [14-А].

4.3. Моделирование условий изменения баланса масс ледников по отметкам вертикальных перепадов высот

На изображении (Рисунок 4.7) представлены результаты моделирования ледника №139. На графике (Рисунок 4.7а) показаны различные оценки годового изменения высоты ледника в диапазоне значений баланса массы. Цветными линиями отражается результат моделирование баланса массы ледника профильным методом, где красная линия показывает измерение годового баланса массы ледника, оранжевая линия отражает баланс массы полного гидрологического года, а синяя линия показывает зимнее накопление снега на леднике. Особенно важным на этом графике является заштрихованная область с левой стороны графика, которая показывает изменение площади ледника в зависимости от высоты.

На представленном графике (рисунок 4.7б) отражена среднеквадратичная ошибка и смещение от нормы, модель рассчитала баланс массы ледника с погрешностью 0,226 м водного эквивалента, это говорит о том что, имея достаточное количество полевых и метеорологических данных, дает возможность проводить моделирование с высокой точности.

Результаты дали нам возможность дать количественную оценку состояния ледника №139 на Восточном Памире и оценить связь между количеством осадков и температурными колебаниями с динамикой ледников.

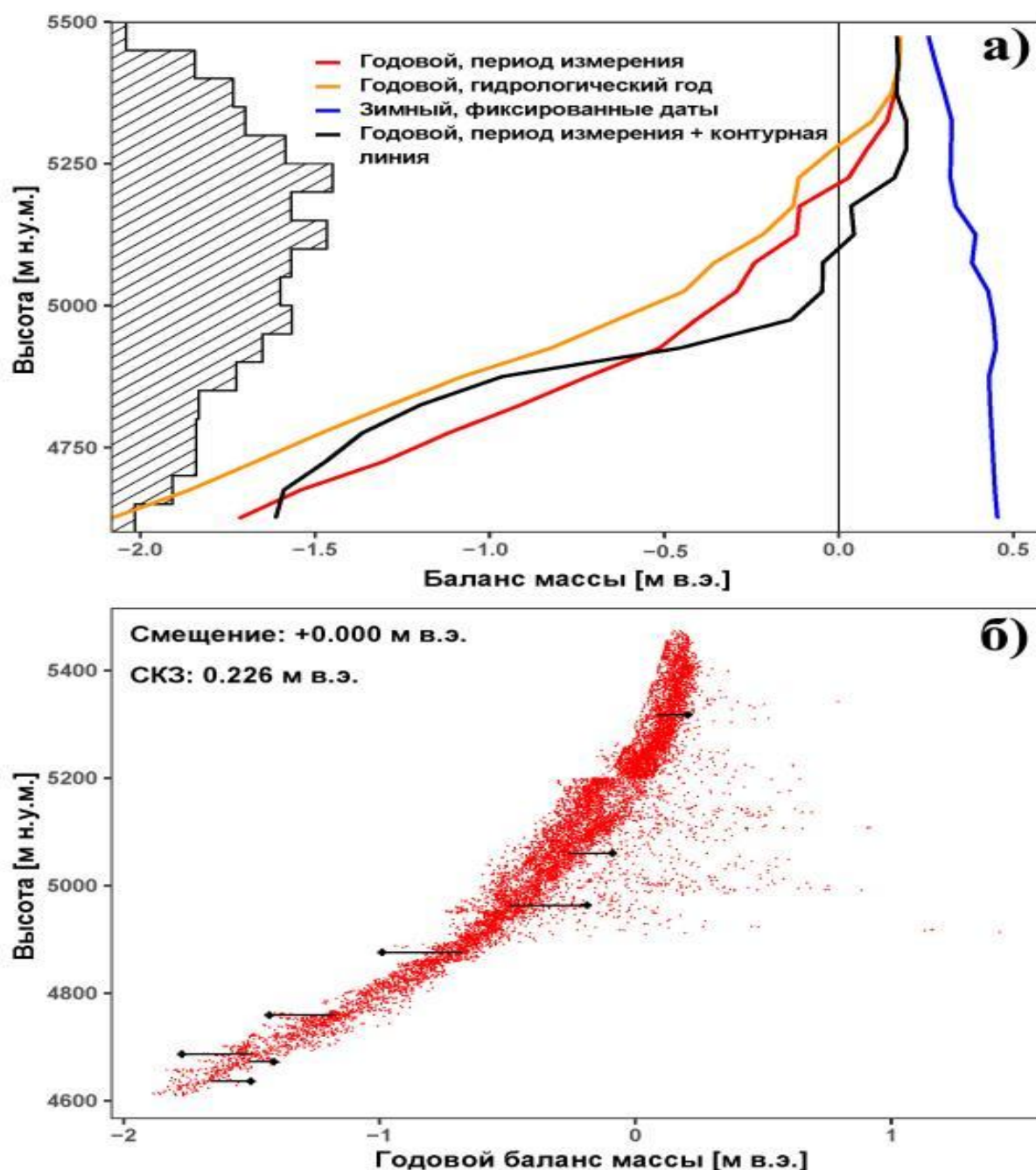


Рисунок. 4.7. - График изменения высоты ледника в диапазоне значений баланса массы

Численное моделирование изменения поверхностной баланса массы ледников по измеренным точкам

Графики, представленные на рисунке 4.8 показывают детальное изменение по каждой рейке на протяжении исследуемого периода для ледника №139. Графики показывают смещение точности моделирование для каждой рейки, установленной на леднике, данные отражают не только смещение точности, но и детальная ежемесячная реконструкция динамики

поверхности льда для каждой рейки, которые на графике обозначены как «zm» с соответствующими номерами.

Вертикальная ось на графиках отражает изменение высоты на поверхности ледника в метрах водного эквивалента, а значения прописанные на графиках показывают на смещение точности модели от реальных данных. Горизонтальная ось отражает время охватывая один гидрологический год, а сплошная линия показывает смоделированное изменение высоты ледника в данной точке. На графиках точкой обозначены фактические измерения, полученные на полевых работах с установленных абляционных реек на леднике.

При анализе графиков было выявлено как отрицательные смещение от наземных данных так и положительные, рейки с обозначениями zm3, zm4 и zm5 показывают смещение со значением около -0,3 м в.э. а рейки с обозначением zm1, zm2, zm7 и zm8 показывают небольшое смещение около +0,1 до +1,7 м в.э., рейка zm6 в отличии от других показывает значительное позитивное смещение которое составляет +0,3 м в.э., такие различия в смещении от наземных данных может быть из-за особенностей рельефа поверхности ледника. Такие подробные данные представляют ценную информацию об поверхностных изменениях ледника, это важно для понимания динамики ледника и реакции на температурные колебания.

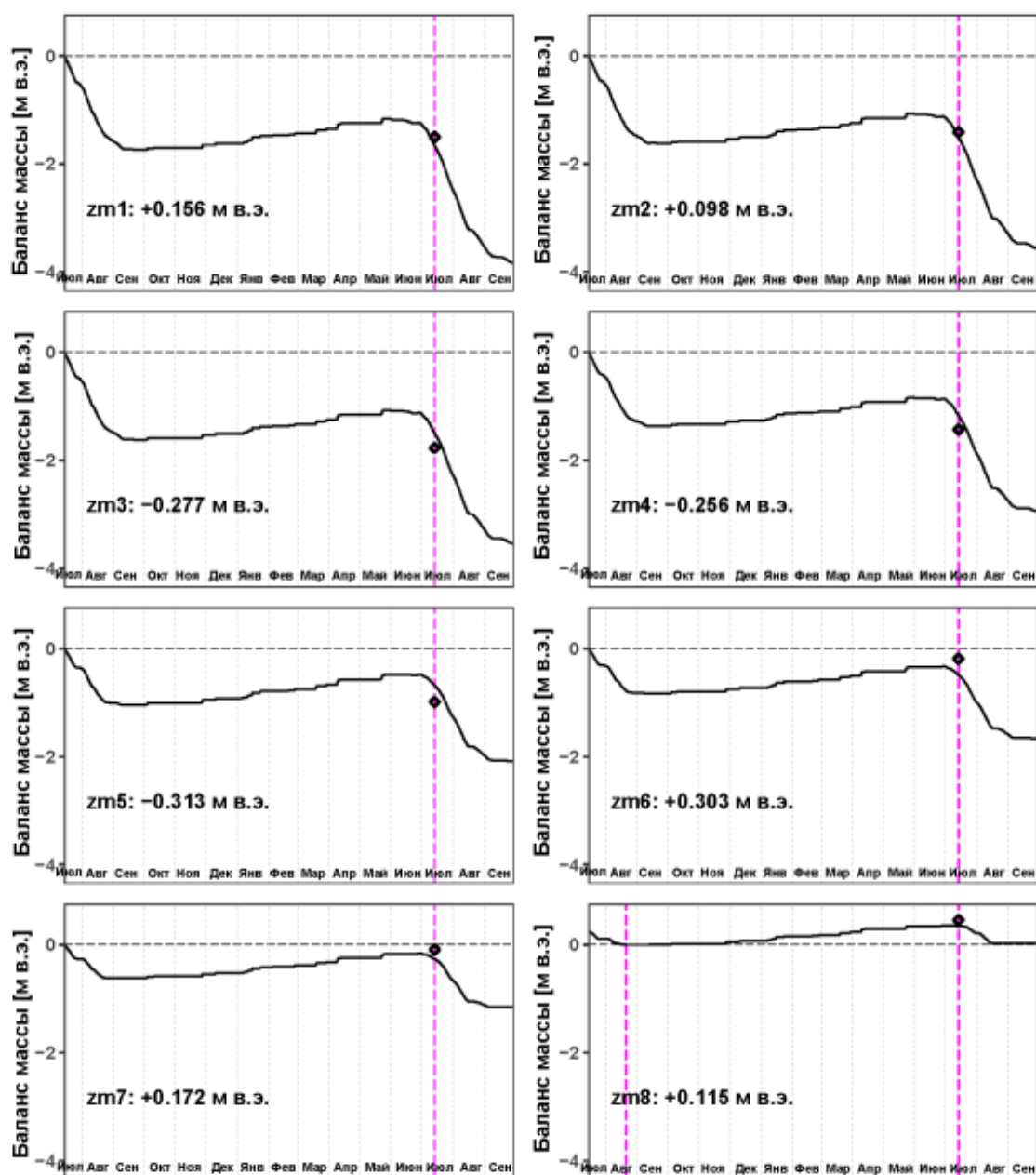


Рисунок 4.8. - Графики детальных результатов моделирования годового баланса массы и изменения высоты поверхности ледника №139 по рейкам

Результаты моделирования баланса массы ледников бассейна реки Сарыгун, притока озера Ховаркуль за 2018/2019 годы.

Была проведена моделирование баланса массы ледников в бассейне реки Сарыгун которая является правым притоком реки Акджилга которая в свою очередь втекает в озеро Ховаркуль, для определения состояния ледников на различных высотах.

Общий отрицательный баланс массы ($bm = -0.282$ м.в.э.) указывает на преобладающую потерю массы ледниками в этом бассейне за

рассматриваемый период. Это согласуется с общей тенденцией сокращения оледенения в горных районах в результате изменения климата.

Разброс индивидуальных значений баланса массы от -2.0 до $+1.0$ м.в.э. демонстрирует значительную пространственную изменчивость процессов аккумуляции и абляции на разных ледниках. Она может быть вызвана различиями в их размерах, высотах, ориентации, окружающем рельефе и микроклимате. Преобладание красных цветов (отрицательный баланс) говорит о том, что большинство ледников в этом регионе теряли массу в течение измеренного периода. Однако наличие некоторых синих цветов (положительный баланс) указывает на то, что для отдельных ледников условия были более благоприятными для аккумуляции массы.

Среднеквадратичная ошибка 0.107 м в.э. является относительно низкой, что свидетельствует о хорошей точности моделирования в целом для этого региона. Для более глубокого анализа требуется дополнительная информация о метеорологических условиях и особенностях отдельных ледников, а также долговременный ряд наблюдений для выявления устойчивых трендов.

В целом, результаты указывают на сложную картину изменения оледенения с преобладанием потери массы в этом высокогорном регионе в период 2018/2019 гг., что согласуется с ожидаемыми последствиями изменения климата.

2018/2019

Период измерения (годовой, скорректированный): 07/16 – 07/15

$b_n = -0.282$ м в.э.

СКЗ: 0.107 м в.э.

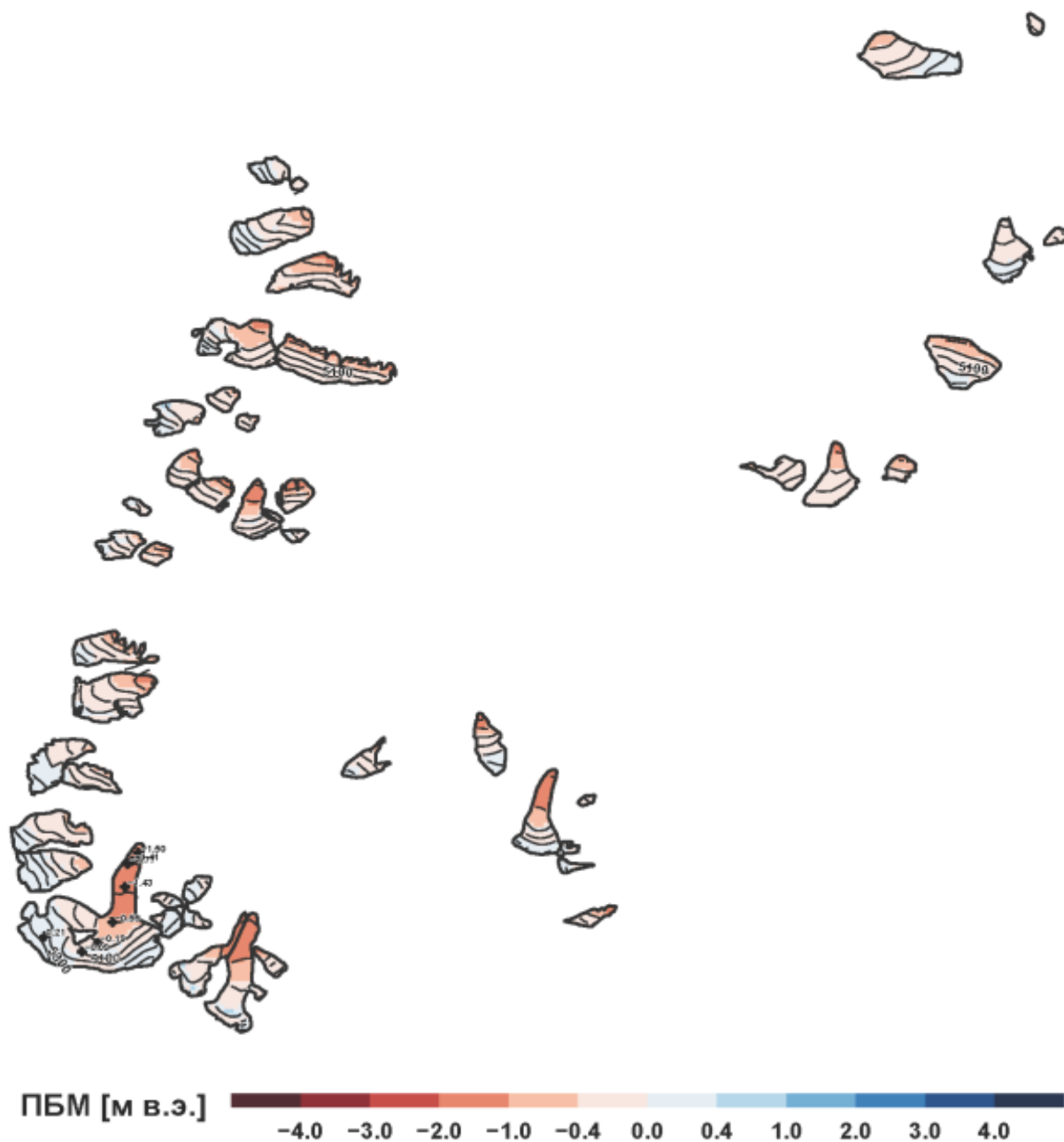


Рисунок. 4.9. - Моделирование баланса массы ледников бассейна реки Сарыгун притока озера Ховаркуль

Выводы по четвёртой главе

1. С 1977 по 2018 год общая площадь ледников в бассейне реки Сарыгун правого притока реки Акджилга, которая впадает в озеро Ховаркуль, сократилась на 9% (1,3 км²). Наибольшее сокращение наблюдалось в период 1998-2008 гг. Ледники восточной и северо-восточной экспозиции подверглись наибольшей деградации.

2. За период с 1994 по 2018 год количество малых ледников (площадью менее 0,1 км²) уменьшилось с 247 до 197 (на 20%). Их общая площадь сократилась с 11,0216 км² до 8,7774 км² (также на 20%).

3. Анализ данных по отдельным рейкам показал различия в смещение данных при реальных измерениях на леднике и моделированием на разных участках ледника. Результаты показали от отрицательных смещений (до -0.3 м в.э.) до положительных смещений (до +0.3 м в.э.), а среднее смещение составляет около 0.17 м в.э. Данные смещения по каждому отдельным рейкам являются не значительными и показывают хороший результат калибровки модели.

4. Моделирование баланса массы ледников бассейна реки Сарыгун притока озера Ховаркуль за 2018/2019 гг. показало общий отрицательный баланс -0.282 м в.э., с индивидуальными значениями от -2.0 до +1.0 м в.э. для разных ледников.

5. Среднеквадратическая ошибка модели составила 0.090 м в.э. для ледника №139 и 0.107 м в.э. для всего бассейна реки Сарыгун, что свидетельствует о хорошей точности расчётов.

ВЫВОДЫ

1. На основе комплексного анализа с использованием данных дистанционного зондирования, ГИС технологий, цифрового моделирования и наземных полевых наблюдений получены новые научные результаты по динамике оледенения в высокогорном регионе Восточного Памира на примере бассейна озера Ховаркуль [1-А, 10-А].

2. Подтверждено, что дистанционное зондирование является оперативным и недорогим источником информации при исследовании и анализе ледников. Данный метод позволяет определить основные характеристики ледников, в том числе характер их динамики [9-А, 13-А].

3. Установлено, что измерение баланса массы ледников является наиболее точным методом для определения ежегодного состояния ледников, это позволяет в контексте изменения климата определить ежегодные изменения в криосфере, что позволяет прогнозировать сток рек с ледниковым питанием наиболее точно [4-А, 7-А].

4. Полученные данные вносят существенный вклад в развитие гляциологических исследований и понимание процессов, происходящих в ледниковых системах Восточного Памира. Они имеют важное научное и прикладное значение для оценки водных ресурсов региона, прогнозирования изменений стока и связанных с ними рисков в условиях меняющегося климата [3-А, 4-А].

5. Выявлены основные характеристики динамики оледенения бассейна озера Ховаркуль, которые подтверждают общую тенденцию сокращения оледенения по всему миру [11-А, 12-А].

6. Смоделирована баланса массы ледников бассейна реки Сарыгун, которая втекает в оз. Ховаркуль, для определения состояния ледников на различных высотах. Общий отрицательный баланс массы ($b_m = -0.282$ м в.э.) указывает потерю массы ледниками в этом бассейне за рассматриваемый период. Это согласуется с общей тенденцией сокращения оледенения гор при климатических изменениях [2-А]

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Использование данных о современном состоянии и динамике ледников для уточнения прогнозов изменения водных ресурсов региона. Полученные количественные оценки баланса и изменения площадей ледников позволяют лучше и более точно моделировать поступление талых ледниковых вод в речные системы и озера. Это важно для планирования водопользования в сельском хозяйстве, энергетике и других отраслях.

2. Применение детальных карт оледенения и топографии ледников для оценки риска, связанного с опасными ледниково-глициальными процессами (прорывы ледниковых озер, ледниковые обвалы, селевые потоки и др.). Эти потребности необходимы для составления кадастровых объектов и разработки мер по защите населённых пунктов и занятости.

3. Результаты исследования оледенения помогают спрогнозировать возможные последствия климатических изменений и определить наиболее уязвимые районы, которые требуют принятия адаптационных мер.

4. Материалы диссертаций могут быть использованы в качестве иллюстраций и обновлений учебных курсов. Результаты диссертации имеют широкий спектр возможного практического применения в научной, образовательной и природоохранной деятельности, а также для управления водными мероприятиями и предотвращения возникновения рисков в горных районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котляков, В. М. Ресурсы поверхностных вод СССР, каталог ледников СССР, том 14, средняя Азия, выпуск 3, Амударья, часть 17, реки бассейна озера Ховаркуль / В. М. Котляков, Л. Э. Фтлас, Г. М. Варнакова, О. В. Рототаева; Институт географии Академии наук СССР. – 1975.
2. Благовещенский, В. П. Гляциологические исследования на леднике Богдановича / В.П. Благовещенский, В.Н. Уваров, Н.Е. Касаткин, А.Л. Кокарев // География и водные ресурсы. – 2011. – № 3. – С. 23-30.
3. Ерисковская, Л. А. Основные характеристики погоды и режима ледника Центральный Туйыксу в Северном Тянь-Шане в 2006... 2010 гг / Л. А. Ерисковская, Н. Е. Касаткин, К. Г. Макаревич // Гидрометеорология и экология. – 2011. – № 3 (62). – С. 66-72.
4. Кокарев, А. Л. Результаты геодезических измерений баланса массы некоторых ледников Заилийского Алатау / А.Л. Кокарев, В.П. Капица, Т. Больш, И.В. Северский, Н.Е. Касаткин, М. Шахгеданова, З.С. Усманова // Лёд и Снег. – 2023. – Т. 62, № 4. – С. 527-538.
5. Макаревич, К. Г. Баланс и кинематика массы ледников Тянь-Шаня на примере ледника Тууюксу / К. Г. Макаревич // Гидрометеорология и экология. – 2004. – № 3. – С. 74-88.
6. Вилесов, Е. Н. Дегляциация и изменение ледникового стока в бассейне р. Усек в Джунгарском Алатау / Е. Н. Вилесов // Гидрометеорология и экология. – 2004. – № 3. – С. 89-95. – Текст : непосредственный.
7. Каюмов, А. Третье национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата / А. Каюмов, Б. Махмадалиев, В. Новиков. – Душанбе, 2014. – 167 с.
8. Hagg, W. J. A comparison of three methods of mass-balance determination in the Tuyuksu glacier region, Tien Shan, Central Asia / W. J. Hagg, L. N. Braun, V. N. Uvarov, K. G. Makarevich // Journal of Glaciology. – 2004. – Vol. 50, № 171. – P. 505-510.

9. Kenzhebaev, R. Mass balance observations and reconstruction for Batysh Sook Glacier, Tien Shan, from 2004 to 2016 / R. Kenzhebaev, M. Barandun, M. Kronenberg, Y. Chen, R. Usubaliev, M. Hoelzle // *Cold Regions Science and Technology*. – 2017. – Vol. 135. – P. 76-89.
10. Kronenberg, M. Mass-balance reconstruction for Glacier No. 354, Tien Shan, from 2003 to 2014 / M. Kronenberg, M. Barandun, M. Hoelzle, M. Huss, D. Farinotti, E. Azisov [и др.] // *Annals of Glaciology*. – 2016. – Vol. 57, № 71. – P. 92-102.
11. Hoelzle, M. The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia / M. Hoelzle, M. Barandun, T. Bolch, J. Fiddes, A. Gafurov, V. Muccione, T. Saks, M. Shahgedanova // *The Aral Sea Basin*. – Routledge, 2019. – P. 100-121.
12. Giorgi, F. Climate change hot-spots / F. Giorgi // *Geophysical research letters*. – 2006. – Vol. 33, № 8.
13. Immerzeel, W. W. Importance and vulnerability of the world's water towers / W. W. Immerzeel, A. F. Lutz, M. Andrade, A. Bahl, H. Biemans, T. Bolch, S. Hyde, S. Brumby, B. J. Davies, A. C. Elmore, A. Emmer, M. Feng, A. Fernández, U. Haritashya, J. S. Kargel, M. Koppes, P. D. A. Kraaijenbrink, A. V. Kulkarni, P. A. Mayewski, S. Nepal, P. Pacheco, T. H. Painter, F. Pellicciotti, H. Rajaram, S. Rupper, A. Sinisalo, A. B. Shrestha, D. Viviroli, Y. Wada, C. Xiao, T. Yao, J. E. M. Baillie // *Nature*. – 2020. – Vol. 577, № 7790. – P. 364-369.
14. Manandhar, M. Gender, health and the 2030 agenda for sustainable development / M. Manandhar, S. Hawkes, K. Buse, E. Nosrati, V. Magar // *Bull World Health Organ*. – 2018. – Vol. 96. – P. 644-653.
15. Fay, M. A simple index of vulnerability to climate change / M. Fay, H. Patel // *Background paper prepared for World Bank report*. – Washington, DC, 2008.
16. Pohl, E. Glacier melt buffers river runoff in the Pamir Mountains / E. Pohl, R. Gloaguen, C. Andermann, M. Knoche // *Water Resources Research*.

– 2017. – Vol. 53, № 3. – P. 2467-2489.

17. Рауфов, Р. Н. Влияние изменения климата на состояние ледников и режим речного стока Таджикистана / Р. Н. Рауфов, Р. Р. Давлятов // Кишоварз. – 2015. – № 1. – С. 57-59.

18. Abdullaev, I. History of water management in the aral sea basin / I. Abdullaev, J. Kazbekov, K. Wegerich // The Aral Sea Basin: Water for Sustainable Development in Central Asia. – 2019. – P. 8-24.

19. Dukhovny, V. Integrated water resources management in Central Asia: The challenges of managing large transboundary rivers / V. Dukhovny, V. Sokolov, D. Ziganshina. – Global Water Partnership (GWP), 2014.

20. Armstrong, R. L. Runoff from glacier ice and seasonal snow in High Asia: separating meltwater sources in river flow / R. L. Armstrong, K. Rittger, M. J. Brodzik, A. Racoviteanu, A. P. Barrett, S. J. S. Khalsa, B. Raup, A. F. Hill, A. L. Khan, A. Wilson, R. B. Kayastha, F. Fetterer, B. Armstrong // Regional Environmental Change. – 2019. – Vol. 19, № 5. – P. 1249-1261.

21. Saks, T. Glacier Runoff Variation Since 1981 in the Upper Naryn River Catchments, Central Tien Shan / T. Saks, E. Pohl, H. Machguth, A. Dehecq, M. Barandun, R. Kenzhebaev, O. Kalashnikova, M. Hoelzle // Front. Environ. Sci., Sec. Freshwater Science. – 2022. – Vol. 9.

22. Aizen, V. B. Climate, snow cover, glaciers, and runoff in the Tien Shan, Central Asia / V. B. Aizen, E. M. Aizen, J. M. Melack // JAWRA Journal of the American Water Resources Association. – 1995. – Vol. 31, № 6. – P. 1113-1129.

23. Сафронова, Е. И. «Водная проблема» в Центральной Азии и ее влияние на имидж России и Китая в регионе / Е. И. Сафронова // Китай в мировой и региональной политике. История и современность. – 2009. – № 14. – Текст : электронный. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vodnaya-problema-v-tsentralnoy-azii-i-ee-vliyanie-na-imidzh-rossii-i-kitaya-v-regione>.

24. Махмадалиев, Б. У. Второе национальное сообщение РТ по рамочной конвенции ООН об изменении климата / Б. У. Махмадалиев, А.

К. Каюмов, А. В. Новиков. – Душанбе, 2003. – 114 с.

25. Sara, J. Central Asia: at the confluence of global water action and climate resilience Dushanbe conference to emphasize role of water in sustainable development / J. Sara, T. Proskuryakova // The World Bank Blog. – 2022. – Текст : электронный. – URL: <http://surl.li/nkdki>.

26. Huss, M. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss / M. Huss, R. Hock // Nature Climate Change. – 2018. – Vol. 8, № 2. – P. 135-140.

27. Schrader, F. Hydropower / F. Schrader, A. Kamolidinov, M. Bekchanov, M. Laldjebaev, S. Tsani // The Aral Sea Basin. – Routledge, 2019. – P. 52-66.

28. Gafforzoda, I. G. Sustainable development of water resources of Tajikistan / I. G. Gafforzoda, F. P. Arabov, A. K. Sodikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2023. – Vol. 1229, № 1. – P. 012024.

29. Ozturk, T. Projected changes in temperature and precipitation climatology of Central Asia CORDEX Region 8 by using RegCM4.3.5 / T. Ozturk, M. T. Turp, M. Türkeş, M. L. Kurnaz // Atmospheric Research. – 2017. – Vol. 183. – P. 296-307.

30. Mankin, J. S. Climate Certainty, Uncertainty, and Human Water Availability in a Warming World / J. S. Mankin. – Stanford University, 2015.

31. Siegfried, T. Will climate change exacerbate water stress in Central Asia? / T. Siegfried, T. Bernauer, R. Guennet // Climatic Change. – 2012. – Vol. 112. – P. 881-899.

32. Koven, C. D. Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming / C.D. Koven, B. Ringeval, P. Friedlingstein, P. Ciais, P. Cadule, D. Khvorostyanov // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2011. – Vol. 108, № 36. – P. 14769-14774.

33. Konovalov, V. G. Evolution of glaciation in the Pamiro-Alai mountains and its effect on river run-off / V. G. Konovalov, A. S. Shchetinnicov

// Journal of Glaciology. – 1994. – Vol. 40, № 134. – P. 149-157.

34. Chen, Y. Changes in Central Asia's water tower: past, present and future / Y. Chen // Scientific reports. – 2016. – Vol. 6, № 1. – P. 35458.

35. Министерство энергетики и водных ресурсов Таджикистана (МЭВР). Использование водных ресурсов. – Текст : электронный. – URL: https://www.mewr.tj/?page_id=576 (дата обращения: 17.05.2024).

36. Toderich, K. Water resources assessment, irrigation and agricultural developments in Tajikistan / K. Toderich, T. Tsukatani, M. Abbdusamatov // KIER Discussion Paper. – 2004. – Vol. 585.

37. Chub, V. Y. Climate change impacts on hydrometeorological processes, agro climatic and water resources of the Republic of Uzbekistan / V. Y. Chub. – Tashkent : Voris Nashriyot, –2007. – P. 133

38. Barandun, M. The state and future of the cryosphere in Central Asia / M. Barandun, J. Fiddes, M. Scherler, T. Mathys, T. Saks, D. Petrakov, M. Hoelzle // Water Security. – 2020. – Vol. 11. – P. 100072.

39. Kriegel, D. Changes in glacierisation, climate and runoff in the second half of the 20th century in the Naryn basin, Central Asia / D. Kriegel, C. Mayer, W. Hagg, S. Vorogushyn, D. Doris, A. Garurov, D. Farinotii // Global and Planetary Change. – 2013. – Vol. 110, Part A. – P. 51-61.

40. Xenarios, S. Climate change and adaptation of mountain societies in Central Asia: uncertainties, knowledge gaps, and data constraints / S. Xenarios, A. Gafurov, D. Schmidt-Vogt, J. Sehring, S. Manandhar, C. Hergarten, J. Shigaeva, M. Foggin // Regional Environmental Change. – 2019. – Vol. 19. – P. 1339-1352.

41. Dyurgerov, M. Glacier mass balance and regime: data of measurement and analysis / M. Dyurgerov. – Boulder : Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, 2002. – P. 88.

42. Kuzmichenok, V. Monitoring of water, snow and glacial resources of Kyrgyzstan / V. Kuzmichenok // Assessment of snow, glacier and water resources in Asia. – Almaty : UNESCO-IHP and German IHP/HWRP National

Committee, 2006.

43. Hoelzle, M. Re-establishing glacier monitoring in Kyrgyzstan and Uzbekistan, Central Asia / M. Hoelzle, E. Azisov, M. Barandun, M. Huss, D. Farinotti, A. Gafurov, W. Hagg, R. Kenzhebaev, M. Kronenberg, H. Machguth, A. Merkushkin, B. Moldobekov, M. Petrov, T. Saks, N. Salzmänn, T. Schöne, Y. Tarasov, R. Usabaliev, S. Vorogushyn, A. Yakovlev, M. Zemp // *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*. – 2017. – Vol. 6, № 2. – P. 397–418.

44. Oztürk, T. Simulation of temperature and precipitation climatology for the Central Asia CORDEX domain using RegCM 4.0 / T. Oztürk, H. Altınsoy, M. Türkeş, M. Kurnaz // *Climate Research*. – 2012. – Vol. 52. – P. 63–76.

45. Huang, A. Changes of the annual precipitation over central Asia in the twenty-first century projected by multimodels of CMIP5 / A. Huang, Y. Zhou, Y. Zhang, D. Huang, Y. Zhao, H. Wu // *Journal of Climate*. – 2014. – Vol. 27, № 17. – P. 6627–6646.

46. Dike, V. N. Evaluation and multimodel projection of seasonal precipitation extremes over central Asia based on CMIP6 simulations / V. N. Dike, Z. Lin, C. C. Ibe, C. C. Dike, M. Hanif, M. Z. Hashmi, X. Zhang // *International Journal of Climatology*. – 2022. – Vol. 42, № 14. – P. 7228–7251.

47. Erokhin, S. A. Debris flows triggered from non-stationary glacier lake outbursts: the case of the Teztor Lake complex (Northern Tian Shan, Kyrgyzstan) / S. A. Erokhin, V. V. Zaginaev, A. A. Meleshko, V. Ruiz-Villanueva, D. Petrakov, S. S. Chernomorets, S. K. Viskhadzhieva, O. Tutubalina, M. Stoffel // *Landslides*. – 2018. – Vol. 15, № 1. – P. 83–98.

48. Hagg, W. Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments / W. Hagg, L. Braun, M. Kuhn, T. I. Nesgaard // *Journal of Hydrology*. – 2007. – Vol. 332. – P. 40–53.

49. Hagg, W. Glacier and runoff changes in the Rukhik catchment, upper Amu-Darya basin until 2050 / W. Hagg, M. Hoelzle, S. Wagner, E. Mayr,

Z. Klose // Global and Planetary Change. – 2013. – Vol. 110. – P. 62–73.

50. Brhane, E. S. Changes in climate extremes in Hissar-Allay mountainous region, Tajikistan / E. S. Brhane, K. Dairaku // Proceedings of the 19th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS 2022) Singapore, 01–05 August 2022. – 2023. – P. 16-18.

51. Kobuliev, M. Effect of future climate change on the water footprint of major crops in southern Tajikistan / M. Kobuliev, T. Liu, Z. Kobuliev, X. Chen, A. Gulakhmadov, A. Bao // Regional Sustainability. – 2021. – Vol. 2, № 1. – P. 60-72.

52. Kure, S. Hydrologic impact of regional climate change for the snowfed and glacierfed river basins in the Republic of Tajikistan: hydrological response of flow to climate change / S. Kure, S. Jang, N. Ohara, M. L. Kavvas, Z. Q. Chen // Hydrological Processes. – 2013. – Vol. 27, № 26. – P. 4057–4070.

53. Khakimov, P. Climate Change in Afghanistan, Kyrgyzstan and Tajikistan: Trends and adaptation policies, fostering innovation / P. Khakimov // Working paper. – 2019. – № 55.

54. Khakimov, P. Climate Change Effects on Agriculture and Food Security in Tajikistan / P. Khakimov, J. Aliev, T. Thomas, J. Ilyasov, S. Dunston // Silk Road: A Journal of Eurasian Development. – 2020. – Vol. 2, № 1. – P. 89-112.

55. Barbone, L. Tajikistan: Key Priorities for Climate Change Adaptation / L. Barbone, A. Reva, S. Zaidi // World Bank Policy Research Working Paper. – 2010. – № 5487.

56. Мирзохонова, С. О. Влияние изменения климата на гидрологический режим бассейна реки Пяндж : специальность 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мирзохонова Ситора Облокуловна ; Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана. – Душанбе, 2021. – С. 22.

57. Farinotti, D. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years / D. Farinotti, L. Longuevergne, G. Moholdt, D. Duethmann, T. Mölg, T. Bolch, S. Vorogushyn, A. Güntner // *Nature Geoscience*. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 716-722.
58. Miles, E. Health and sustainability of glaciers in High Mountain Asia / E. Miles, M. McCarthy, A. Dehecq, M. Kneib, S. Fugger, F. Pellicciotti // *Nature communications*. – 2021. – Vol. 12, № 1. – P. 1-10.
59. Barandun, M. Hot spots of glacier mass balance variability in Central Asia / M. Barandun, E. Pohl, K. Naegeli, R. McNabb, M. Huss, E. Berthier, T. Saks, M. Hoelzle // *Geophysical Research Letters*. – 2021. – Vol. 48, № 11. – P. e2020GL092084.
60. Kraaijenbrink, P. D. Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply / P. D. Kraaijenbrink, E. E. Stigter, T. Yao, W. W. Immerzeel // *Nature Climate Change*. – 2021. – Vol. 11, № 7. – P. 591-597.
61. Pritchard, H. D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress / H. D. Pritchard // *Nature*. – 2019. – Vol. 569, № 7758. – P. 649–654.
62. Barandun, M. Central Asia's spatiotemporal glacier response ambiguity due to data inconsistencies and regional simplifications / M. Barandun, E. Pohl // *The Cryosphere*. – 2023. – Vol. 17. – P. 1343–1371.
63. Kraaijenbrink, P. D. A. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers / P. D. A. Kraaijenbrink, M. F. P. Bierkens, A. F. Lutz, W. W. Immerzeel // *Nature*. – 2017. – Vol. 549, № 7671. – P. 257–260.
64. Wang, R. Spatial heterogeneity in glacier mass-balance sensitivity across High Mountain Asia / R. Wang, S. Liu, D. Shangguan, V. Radić, Y. Zhang // *Water*. – 2019. – Vol. 11, № 4. – P. 776.
65. Shean, D. E. A systematic, regional assessment of high mountain Asia glacier mass balance / D. E. Shean, S. Bhushan, P. Montesano, D. R. Rounce, A. Arendt, B. Osmanolu // *Frontiers in Earth Science*. – 2020. – Vol. 7. – P. 363.

66. Sakai, A. Contrasting glacier responses to recent climate change in high-mountain Asia / A. Sakai, K. Fujita // *Scientific reports*. – 2017. – Vol. 7, № 1. – P. 13717.
67. Mergili, M. Changes of the cryosphere and related geohazards in the high-mountain areas of tajikistan and austria: a comparison / M. Mergili, C. Kopf, B. Müllebner, J. F. Schneider // *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. – 2012. – Vol. 94, № 1. – P. 79–96.
68. Kotlyakov, V. M. Problems and results of studies of mountain glaciers in the Soviet Union / V. M. Kotlyakov // *IAHS Publication*. – 1980. – Vol. 126. – P. 129–136.
69. Lv, M. Characterizing the behaviour of surge- and non-surge-type glaciers in the Kingata Mountains, eastern Pamir, from 1999 to 2016 / M. Lv, H. Guo, X. Lu, G. Liu, S. Yan, Z. Ruan, Y. Ding, D. J. Quincey // *The Cryosphere*. – 2019. – Vol. 13. – P. 219–236.
70. Lambrecht, A. Elevation change of Fedchenko Glacier, Pamir Mountains, from GNSS field measurements and TanDEM-X elevation models, with a focus on the upper glacier / A. Lambrecht, C. Mayer, A. Wendt, D. Floricioiu, C. Völksen // *Journal of Glaciology*. – 2018. – Vol. 64, № 246. – P. 637-648.
71. Lambrecht, A. High altitude accumulation and preserved climate information in the western Pamir, observations from the Fedchenko Glacier accumulation basin / A. Lambrecht, C. Mayer, P. Bohleber, V. Aizen // *Journal of Glaciology*. – 2020. – Vol. 66, № 256. – P. 219-230.
72. Kronenberg, M. Comparison of historical and recent accumulation rates on Abramov Glacier, Pamir Alay / M. Kronenberg, H. Machguth, A. Eichler, M. Schwikowski, M. Hoelzle // *Journal of Glaciology*. – 2021. – Vol. 67, № 262. – P. 253-268.
73. Dolgoushin, L. D. Glacier surges and the problem of their forecasting / L. D. Dolgoushin, G. B. Osipova // *IAHS Publication*. – 1975. – Vol. 104. – P. 292–304.

74. Котляков, В. М. Космический мониторинг пульсирующих ледников Памира / В. М. Котляков, Г. Б. Осипова, Д. Г. Цветков // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2008. – № 4. – С. 74-83.
75. Dehecq, A. Deriving large-scale glacier velocities from a complete satellite archive: Application to the Pamir–Karakoram–Himalaya / A. Dehecq, N. Gourmelen, E. Trouvé // Remote Sensing of Environment. – 2015. – Vol. 162. – P. 55-66.
76. Wendt, A. A Glacier Surge of Bivachny Glacier, Pamir Mountains, Observed by a Time Series of High-Resolution Digital Elevation Models and Glacier Velocities / A. Wendt, C. Mayer, A. Lambrecht, D. Floricioiu // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, № 4. – P. 388.
77. Наврузшоев, Х. Д. Изучение состояния оледенения в верховьях реки Вуждара дистанционным методом / Х. Д. Наврузшоев, А. К. Каюмов // Криосфера. – 2021. – Т. 1, № 3-4. – С. 36-44.
78. Рыбак, О. О. Моделирование и прогноз баланса массы горных ледников Центрального Кавказа в условиях климатических изменений / О. О. Рыбак, Е. А. Рыбак, П. А. Морозова // Системы контроля окружающей среды. – 2016. – № 6. – С. 26.
79. Прохорова, У. В. Расчет составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 года / У. В. Прохорова, Б. В. Иванов, П. Н. Священников, С. Р. Веркулич // Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25, № 3. – С. 50-60.
80. Лаврентьев, И. И. Толщина, объём льда и подлёдный рельеф ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) / И. И. Лаврентьев, С. С. Кутузов, Д. А. Петраков, Г. А. Попов, В. Н. Поповнин // Лёд и Снег. – 2015. – Т. 54, № 4. – С. 7-19.
81. Федоров, В. М. Причины метасинхронности в динамике баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария / В. М. Федоров //

Криосфера Земли. – 2011. – Т. 15, № 2. – С. 70-80.

82. Турчанинова, А. С. Методика оценки лавинного питания (на примере трёх ледников Тянь-Шаня) / А. С. Турчанинова, С. А. Селиверстов, Т. Г. Глазовская, Ю. Г. Селиверстов, Д. А. Петраков // Лёд и Снег. – 2019. – Т. 59, № 4. – С. 460-474.

83. Ледники Таджикистана / Главное управление по гидрометеорологии и наблюдениям за природной средой Министерства охраны природы Республики Таджикистан. – Душанбе, 2003. – С. 25, 32.

84. Осипова, Г. Б. Что дает мониторинг пульсирующих ледников? / Г. Б. Осипова, Д. Г. Цветков // Природа. – 2003. – № 4. – С. 3-13.

85. Терехов, А. В. Определение баланса массы ледника Веринг (Западный Шпицберген) геодезическим методом, 2013-2019 годы / А. В. Терехов, С. Р. Веркулич, Б. Р. Мавлюдов, Р. А. Чернов // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24, № 5. – С. 55-63.

86. Федоров, В. М. Прогноз изменения баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария / В. М. Федоров // Криосфера Земли. – 2018. – Т. 22, № 4. – С. 55-64.

87. Рец, Е. П. Использование физико-математической модели таяния снега и льда AMelt для реконструкции баланса массы ледников Внутреннего Тянь-Шаня / Е. П. Рец, Д. А. Петраков, А. М. Шпунтова // Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии: сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 122-126.

88. Рыбак, О. О. Ожидаемое изменение поверхностного баланса массы ледникового комплекса Эльбруса в условиях глобального потепления / О. О. Рыбак, Е. А. Рыбак, И. А. Корнева // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – № 12-1 (90). – С. 135-141.

89. Белозёров, Е. В. Моделирование таяния ледников Тянь-Шаня в XXI веке / Е. В. Белозёров, О. О. Рыбак, В. В. Попова, Е. А. Рыбак // Theory

and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 54.

90. Карандаева, Л. М. Расчет стока с ледников гляциальной области бассейна реки Пскем / Л. М. Карандаева // Центральноазиатский журнал географических исследований. – 2023. – Т. 1, № 1-2. – С. 138-147.

91. Коновалов, В. Г. Определение характеристик ледников по данным дистанционного зондирования (ДЗЗ) / В. Г. Коновалов, В. А. Рудаков // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 98-107.

92. Адамович, Т. А. Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор) / Т. А. Адамович, Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор // Теоретическая и прикладная экология. – 2017. – № 2. – С. 9-18.

93. Тавасиев, Р. А. Ледники и приледниковые озера бассейнов рек Фастагдон и Искадон, Центральный Кавказ / Р. А. Тавасиев // Вестник Владикавказского научного центра. – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 65-72.

94. Карандаев, С. В. Оценка современного оледенения бассейна ледника Зеравшанский / С. В. Карандаев, Л. М. Карандаева // Центральноазиатский журнал географических исследований. – 2021. – Т. 3. – С. 75-86.

95. Ананичева, М. Д. Изменение ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по данным Каталога ледников СССР и космическим снимкам 2001-2003 гг / М. Д. Ананичева, Г. А. Капустин, М. М. Корейша // Материалы гляциологических исследований. – 2006. – № 101. – С. 163-168.

96. Носенко, Г. А. Изменение площади и объёма ледников Горного Алтая (Россия) с середины XX в. по данным космических съёмок / Г. А. Носенко, С. А. Никитин, Т. Е. Хромова // Лёд и снег. – 2015. – Т. 54, № 2. – С. 5-13.

97. Осипов, Э. Ю. Инвентаризация ледников Восточного Саяна по материалам космических съёмок / Э. Ю. Осипов, О. П. Осипова, Е. В. Клевцов // Лёд и снег. – 2017. – Т. 57, № 4. – С. 483-497.
98. Ананичева, М. Д. Оценка изменений ледников гор Бырранга по космическим снимкам и КATALOGу ледников СССР / М. Д. Ананичева, Г. А. Капустин // Лёд и снег. – 2010. – № 3. – С. 19-26.
99. Адаменко, М. М. Изменение климата и размеров ледников в горах Кузнецкого Алатау в 1975-2015 гг / М. М. Адаменко, Я. М. Гутак, В. А. Антонова // Лёд и Снег. – 2017. – Т. 57, № 3. – С. 334-342.
100. Сарана, В. А. Малые ледники российского сектора Арктики и Субарктики / В. А. Сарана // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2012. – № 2. – С. 82-87.
101. Адаменко, М. М. Новый подход к дифференциации малых ледников и многолетних снежников на основе длительности непрерывного существования гляциально-нивального объекта (на примере гор Кузнецкого Алатау) / М. М. Адаменко, Я. М. Гутак, А. А. Сюбаев. – 2017.
102. Бушуева, И. С. История ледника Алибек по данным дистанционного зондирования, биоиндикации, ¹⁴C и ¹⁰Be датирования / И. С. Бушуева, О. Н. Соломина, В. Жомелли // Лёд и Снег. – 2015. – Т. 55, № 3. – С. 97-106.
103. Китов, А. Д. Динамика отдельных ледников массива Мунку-Сардык (Восточный Саян) и хребта Карлыктаг (Восточный Тянь-Шань) / А. Д. Китов, В. М. Плюснин.
104. Кашдан, А. И. Методика оценки лавинного питания для горных ледников на основе эмпирического А–В моделирования дальности выброса лавин / А. И. Кашдан, Д. А. Петраков, С. С. Кутузов. – 2021.
105. Коновалов, В. Г. Возможности использования данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга ледников и гляциологических расчётов / В. Г. Коновалов, В. А. Рудаков // Лёд и Снег. – 2015. – Т. 55, № 1. – С. 15-27.

106. Китов, А. Д. Дистанционные методы мониторинга нивально-гляциальных образований / А. Д. Китов // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2017). – 2017. – С. 122-126.
107. Bolch, T. Glacier area and mass changes since 1964 in the Ala Archa Valley, Kyrgyz Ala-Too, northern Tien Shan / T. Bolch // Лёд и Снег. – 2015. – Vol. 55, № 1. – P. 28-39.
108. Костенков, Н. А. Определение границ ледников по данным дистанционного зондирования с использованием методов машинного обучения / Н. А. Костенков // «Инженерные изыскания в строительстве» Материалы четвертой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов. – 2022. – С. 140.
109. Никольский, Д. Б. Разработка профильно-площадной методики спутникового зондирования островных ледников Российского Заполярья : дис. – 25 00 31. М., 2013 / Д. Б. Никольский. – 2013.
110. Семакова, Э. Р. Оценка применимости методов автоматической классификации ледников по данным мультиспектральной космической съемки на примере бассейнов реки Кашкадарья и Сурхандарья, Узбекистан / Э. Р. Семакова, А. Д. Крутиков, Д. Г. Семаков. – 2022.
111. Китов, А. Д. Дистанционное и георадарное исследование ледника Радде хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян) / А. Д. Китов, Е. Н. Иванов, В. М. Плюснин // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2020. – Т. 26, № 2. – С. 275-285.
112. Китов, А. Д. Особенности формирования базы данных ледников плато Путорана и хребта Мунку-Сардык / А. Д. Китов.
113. Аристов, К. А. Исследование изменения объема ледника Колка на основе данных наземной стереоскопической фотосъемки / К. А. Аристов // Theory and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and

geophysics. – 2018. – С. 18.

114. Макаренко, А. В. Новые острова новой земли. Изучение таяния ледников архипелага Новая Земля по космоснимкам на примере ледников Нацпарка «Русская Арктика» / А. В. Макаренко, В. С. Саенко, А. А. Кучейко // Theory and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics. – 2018. – С. 171.

115. Терехов, А. Опыт геодезического обеспечения гляциологических исследований на ледниках Монгольского Алтая / А. Терехов, А. Керимов, М. Жумалиев // Theory and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics. – 2018. – С. 230.

116. Бляхарский, Д. П. Мониторинг ледников в сезон абляции с использованием беспилотных аэрофотосъёмочных систем на примере ледников Потанина и александры (массив табын-Богдо-ола, монголия) / Д. П. Бляхарский, Н. Э. Волгушева, Э. Э. Казаков // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 168-179.

117. Никольский, Д. Б. Профильно-площадная методика дистанционного зондирования ледников / Д. Б. Никольский // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2013. – № 5. – С. 77-83.

118. Ананичева, М. Д. Оценка площадей, объёмов и высот границы питания ледниковых систем Северо-Востока России по космическим снимкам начала XXI в / М. Д. Ананичева // Лёд и Снег. – 2015. – Т. 54, № 1. – С. 35-47

119. Самойлова, С. Ю. Мониторинг горных ледников: задачи, новые методы, перспективы / С. Ю. Самойлова // СибСкрипт. – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 131-135.

120. Berthier, E. Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images / E. Berthier, H. Vadon, D. Baratoux, Y. Arnaud, C. Vincent, K. L. Feigl, F. Rémy, B. Legrésy // The Cryosphere. –

2014. – Vol. 8, № 6. – P. 2275-2291.

121. Gärtner-Roer, I. A worldwide reconstruction of glacier mass balance between 1850 and 2000 / I. Gärtner-Roer, K. Naegeli, M. Huss, T. Knecht, H. Machguth, M. Zemp // *Journal of Glaciology*. – 2014. – Vol. 60, № 222. – P. 720-734.

122. Cogley, J. G. Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms / J. G. Cogley, R. Hock, L. A. Rasmussen, A. A. Arendt, A. Bauder, R. J. Braithwaite, P. Jansson, G. Kaser, M. Möller, L. Nicholson, M. Zemp // *IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris*. – 2011. – P. 114.

123. Zemp, M. Globally multi-annual glacier mass balance projections for the period 2015-2100 / M. Zemp, H. Frey, I. Gärtner-Roer, S. U. Nussbaumer, M. Hoelzle, F. Paul, W. Haeberli, F. Denzinger, A. P. Ahlstrøm, B. Anderson, S. Bajracharya // *Nature*. – 2015. – Vol. 526, № 7576. – P. 651-653.

124. Berthier, E. Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery / E. Berthier, H. Vadon, D. Baratoux, Y. Arnaud, C. Vincent, K. L. Feigl, F. Rémy, B. Legrésy // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 95, № 1. – P. 14-28.

125. Quincey, D. J. Ice velocity determination and mass balance estimation using satellite imagery: A study of the Baltoro Glacier, Pakistan / D. J. Quincey, A. Luckman, D. Benn // *Journal of Glaciology*. – 2009. – Vol. 55, № 194. – P. 1119-1128.

126. Murodov, M. A Comprehensive Examination of the Medvezhiy Glacier's Surges in West Pamir (1968–2023) / M. Murodov, L. Li, M. Safarov, M. Lv, A. Murodov, A. Gulakhmadov, K. Khusrav, Y. Qiu // *Remote Sensing*. – 2024. – Vol. 16, № 10. – P. 1730.

127. Kääb, A. Glacier remote sensing using Sentinel-2. Part I: Radiometric and geometric performance, and application to ice velocity / A. Kääb, C. Nuth, H. Breit, M. Duguey // *Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 6, № 11.

– P. 10617-10633.

128. Paul, F. Observation of glacier changes on the Antarctic Peninsula from multi-mission satellite data / F. Paul, T. Bolch, K. Briggs, A. Kääb, M. McMillan, R. Walker, J. Bamber, O. Liestøl, M. Van den Broeke, J. Paden, S. Winsvold // *Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 5, № 9. – P. 4314-4354.

129. Rignot, E. Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling / E. Rignot, J. L. Bamber, M. R. Van den Broeke, C. Davis, Y. Li, W. J. Van de Berg, E. Van Meijgaard // *Nature Geoscience*. – 2008. – Vol. 1, № 2. – P. 106-110.

130. Shepherd, A. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance / A. Shepherd, E. R. Ivins, G. A. V. R. Barletta, M. J. Bentley, S. Bettadpur, K. H. Briggs, D. H. Bromwich, R. Forsberg, N. Galin, M. Horwath // *Science*. – 2012. – Vol. 338, № 6111. – P. 1183-1189.

131. Marzeion, B. Partitioning the uncertainty of ensemble projections of global glacier mass change / B. Marzeion, R. Hock, B. Anderson, A. Bliss, N. Champollion, K. Fujita, M. Huss, J. Krug, V. Radić, D. Rounce, M. Truffer // *Earth's Future*. – 2020. – Vol. 8, № 7. – e2019EF001470.

132. Huss, M. A new model for global glacier change and sea-level rise / M. Huss, R. Hock // *Frontiers in Earth Science*. – 2015. – Vol. 3. – P. 54.

133. Cuffey, K. M. The physics of glaciers / K. M. Cuffey, W. S. B. Paterson. – 4th ed. – Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2010. – P. 693.

134. Gagliardini, O. Capabilities and performance of Elmer/Ice, a new-generation ice sheet model / O. Gagliardini, T. Zwinger, F. Gillet-Chaulet, G. Durand, L. Favier, B. de Fleurian, R. Greve, M. Malinen, C. Martín, P. Råback, J. Ruokolainen // *Geoscientific Model Development*. – 2013. – Vol. 6, № 4. – P. 1299-1318.

135. Radić, V. Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise / V. Radić, R. Hock // *Nature Geoscience*. – 2011. – Vol. 4, № 2. – P. 91-94.

136. Marzeion, B. Attribution of global glacier mass loss to

anthropogenic and natural causes / B. Marzeion, J. G. Cogley, K. Richter, D. Parkes // *Science*. – 2012. – Vol. 345, № 6199. – P. 919-921.

137. Dansgaard, W. Stable isotopes in precipitation / W. Dansgaard // *Tellus*. – 1964. – Vol. 16, № 4. – P. 436-468.

138. Thompson, L. G. A 25,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores / L. G. Thompson, M. E. Davis, E. Mosley-Thompson, T. A. Sowers, K. A. Henderson, V. S. Zagorodnov, P.-N. Lin, V. N. Mikhalev, R. K. Campen, J. F. Bolzan, J. Cole-Dai // *Science*. – 1998. – Vol. 282, № 5395. – P. 1858-1864.

139. Boutron, C. F. Past and recent changes in the large-scale tropospheric cycles of lead and other heavy metals as documented in Antarctic and Greenland snow and ice: A review / C. F. Boutron, U. Görlach, A. Candelozzi, M. A. Bolshov, R. J. Delmas // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1994. – Vol. 58, № 15. – P. 3217-3232.

140. Mayewski, P. A. Seasonal and spatial trends in south Greenland snow chemistry / P. A. Mayewski, M. J. Spencer, W. B. Lyons, M. S. Twickler // *Atmospheric Environment*. – 1986. – Vol. 20, № 2. – P. 363-378.

141. Ivy-Ochs, S. Chronology of the last glacial cycle in the European Alps / S. Ivy-Ochs, H. Kerschner, A. Reuther, F. Preusser, K. Heine, M. Maisch, P. W. Kubik, C. Schlüchter // *Journal of Quaternary Science*. – 2008. – Vol. 23, № 6-7. – P. 559-573.

142. Goehring, B. M. A reevaluation of in situ cosmogenic ^3He production rates / B. M. Goehring, Ø. S. Lohne, J. Mangerud, J. I. Svendsen, R. Gyllencreutz, J. Schaefer, R. Finkel // *Quaternary Geochronology*. – 2011. – Vol. 6, № 2. – P. 289-299.

143. Gosse, J. C. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application / J. C. Gosse, F. M. Phillips // *Quaternary Science Reviews*. – 2001. – Vol. 20, № 14. – P. 1475-1560.

144. Licciardi, J. M. Holocene glacier fluctuations in the western United States / J. M. Licciardi, P. U. Clark, E. J. Brook, K. L. Pierce, M. D. Kurz, D.

Elmore, P. Sharma // Quaternary Science Reviews. – 2009. – Vol. 28, № 21-22. – P. 2226-2240.

145. Longley, P. A. Geographic Information Systems and Science / P. A. Longley M.F. Goodchild, D.J. Maguire. // Wiley & Sons, West Sussex, UK. – 2005. – Vol. 17. – P. 517.

146. Ormsby, T. Getting to Know ArcGIS Desktop / T. Ormsby. – ESRI Press, 2004.

147. Bolstad, P. GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems / P. Bolstad. – Eider Press, 2016.

148. Gorr, W. L. GIS Tutorial for Crime Analysis / W. L. Gorr, K. S. Kurland. – Esri Press, 2012.

149. Heywood, I. An Introduction to Geographical Information Systems / I. Heywood, S. Cornelius, S. Carver. – Pearson Education, 2011.

150. Worboys, M. F. GIS: A Computing Perspective / M. F. Worboys, M. Duckham. – CRC Press, 2004

151. Church, R. L. Business Site Selection, Location Analysis and GIS / R. L. Church, A. T. Murray. – Wiley, 2009.

152. Slocum, T. A. Thematic Cartography and Geovisualization / T. A. Slocum, R.B. McMaster, F.C. Kessler, H.H. Howard. – Pearson Education, 2009.

153. Kraak, M. J. Cartography: Visualization of Spatial Data / M. J. Kraak, F. Ormeling. – Guilford Press, 2010.

154. Электронный ресурс: USGS : [сайт]. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

155. Десинов, Л. В. Дистанционный мониторинг многолетнего режима оледенения Памира / Л. В. Десинов, В. Г. Коновалов // Материалы гляциологических исследований. – 2007. – № 103. – С. 129-133.

156. Коновалов, В. Г. Каталогизация горных ледников и генерализация их распределения по материалам дистанционного зондирования / В. Г. Коновалов // Современные проблемы дистанционного

зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – С. 43-55.

157. Осипов, Э. Ю. Инвентаризация ледников Восточного Саяна по материалам космических съёмок / Э. Ю. Осипов // Лёд и Снег. – 2017. – Т. 57, № 4. – С. 483-497.

158. Электронный ресурс: NASA EARTHDATA : [сайт]. – URL: <https://search.asf.alaska.edu/>.

159. Глазырин, Г. Е. Влияние площади и ориентации ледников на их сокращение при изменении климата / Г. Е. Глазырин // Материалы гляциологических исследований. – 2007. – № 103. – С. 118-122.

160. Гляциологический словарь / Под ред. В. М. Котлякова. – Ленинград: ГИМИЗ, 1984. – С. 528.

161. Энциклопедия гляциологии / Под ред. В. М. Котлякова. – Москва: ВИНТИ, 2005. – С. 528.

162. Котляков, В. М. Избранные сочинения. Кн. 4: Гляциология Антарктиды / В. М. Котляков. – Москва : Наука, 2000. – С. 433.

163. Benn, D. I. Glaciers and glaciation / D. I. Benn, D. J. A. Evans. – 2nd ed. – London : Routledge, 2010. – P. 802

164. Fountain, A. G. Water flow through glaciers / A. G. Fountain, J. S. Walder // Progress in Physical Geography. – 1998. – Vol. 22, № 2. – P. 181-211.

165. Stenni, B. Antarctic climate variability on regional and continental scales over the last 2000 years / B. Stenni, M.A. Curran, N.J. Abram, A. Orsi, S. Goursaud, V. Masson-Delmotte // Climate of the Past. – 2017. – Vol. 13, № 11. – P. 1609-1634.

166. Milner, A. M. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems / A. M. Milner, K. Khamis, T.J. Battin, J.E. Brittain, N.E. Barrand, L. Füreder // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 114, № 37. – P. 9770-9778.

167. Raup, B. H. Remote sensing of glaciers / B. H. Raup, S. J. S. Khalsa, R. Armstrong // Remote Sensing of the Cryosphere. – 2015. – P. 123-156.

168. Радионов, В.Ф. Гляциологические исследования в Арктике / В.Ф. Радионов, Д.В. Кобылкин // Лед и Снег. – 2014. – № 1. – С. 5-14.
169. Котляков, В.М. Современные гляциологические исследования - достижения и перспективы / В.М. Котляков // Гляциологические исследования. – 2004. – Вып. 97. – С. 3-11.
170. Kronenberg, M. From point measurements to glacier wide mass balance / M. Kronenberg. // World Glacier Monitoring Service : [сайт]. – 2016. – URL: https://wgms.ch/downloads/CATCOS16_06_Kronenberg_point-to-glacierwide-mass-balance.pdf
171. Østrem, G. Glacier mass balance measurements / G. Østrem, M. Brugman. : Department of Mines and Technical Surveys, Glaciology Section, 1966. – P. 129.
172. Jackson, M. Glacier Mass Balance measurements in Bhutan / M. Jackson, S. Tenzin, T. Tashi // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2014. – P. 16069.
173. Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши (1800–2005 гг.) по дендрохронологическим данным / О.В. Рототаева, Е.А. Долгова, В.В. Мацковский // Лед и Снег. – 2013. – № 2 (122). – С. 34-42.
174. Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв / О.В. Рототаева, Г.А. Носенко, А.М. Кеквеладзе [и др.] // Лёд и Снег. – 2019. – Т. 59, № 1. – С. 5-22.
175. Glaciological and volumetric mass-balance measurements: error analysis over 51 years for Glacier de Sarennes, French Alps / E. Thibert, R. Blanc, C. Vincent, N. Eckert // Journal of Glaciology. – 2008. – Vol. 54, № 186. – P. 522-532.
176. Global glacier change bulletin no. 1 (2012–2013) / M. Zemp, S.U. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer // Global Glacier Change Bulletin. – 2015. – Vol. 1. – P. 230.
177. Рыбак О. О., Рыбак Е. А. Применение данных сетевых метеорологических станций для расчета баланса массы ледников (на

примере ледника Джанкуат, Центральный Кавказ) //Системы контроля окружающей среды. – 2017. – №. 9. – С. 29.

178. Морозова П. А., Рыбак О. О. Использование данных регионального климатического моделирования для расчета баланса массы горных ледников //Системы контроля окружающей среды. – 2016. – №. 5. – С. 84-89.

179. Морозова П. А., Рыбак О. О. Регионализация данных глобального климатического моделирования для расчёта баланса массы горных ледников //Лёд и Снег. – 2017. – Т. 57. – №. 4. – С. 437-452.

180. Рец Е. П. и др. моделирование баланса массы ледника Сары-Тор (массив Ак-Шийрак, внутренний Тянь-Шань) //Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25. – №. 5. – С. 27-41.

181. Коновалов В. Г. Моделирование и реконструкция параметров речного стока и баланса массы ледников на Северном Кавказе //Лёд и Снег. – 2015. – Т. 54. – №. 3. – С. 16-30.

182. Электронный ресурс: RP5: [сайт]. – URL: <https://rp5.ru/>

СПИСОК НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан и других зарубежных рецензируемых журналах.

[1-А]. **Кабутов Х.К.** Баланс массы ледника Восточный Зулмарт (№139) за 2018-2022 годы / А. Каюмов, Х. К. Кабутов, М. Хольцле, М. Барандун // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2023. – № 1(190). – С. 94-102.

[2-А]. **Кабутов Х.К.** Динамика изменения оледенения бассейна реки Сарыгун в районе озера Ховаркуль / А. Каюмов, Х. К. Кабутов, Х. Д. Наврузшоев // Известия Национальной академии наук Таджикистана.

Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2022. – № 3(188). – С. 165-173.

[3-A]. **Кабутов Х.К.** Современное состояние малых ледников бассейна озера Ховаркуль: исследования и оценка / / Кабутов Х.К. // Водные ресурсы, энергетика и экология. Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана. – 2025. – № 5.-С. - **ISSN 2789-0953**.

[4-A]. **Кабутов Х.К.** Моделирование баланса массы ледника №139 бассейна озера Ховаркуль Восточного Памира с использованием модели SMB / Кабутов Х.К., Амирзода О.Х., Шерализода Н.Ш., Hoelzle M., Mattea E., Saks T., Barandun M. // Водные ресурсы, энергетика и экология. Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана. – 2024. – № 4. - **ISSN 2789-0953**.

[5-A]. **Kabutov K.** A Comprehensive Examination of the Medvezhiy Glacier's Surges in West Pamir (1968–2023) / M. Murodov, L. Lanhai, M. Safarov, L. Mingyang, A. Murodov, A. Gulakhmadov, K. Kabutov, Q. Yubao // Remote Sensing. – 2024. – Т. 16. – №. 10. – С. 1730.

Опубликованные статьи в других изданиях

[6-A]. **Кабутов Х.К.** Баланс массы ледника № 139 бассейна озера Ховаркуль Восточного Памира. / Х.К. Кабутов, А. Каюмов, Т. Сакс, Х. Наврузшоев, Ф. Восидов, Н. Неккадамова, А. Халимов // Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов. – 2022. – № 8(2). – С. 70–84. <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2022-R1.v8-2/70-84.rus>

[7-A]. **Кабутов Х.К.** Крупные ледники бассейна реки Гунт, (Памир Таджикистан). А. Каюмов, Х.Д. Наврузшоев, Х.К. Кабутов // Водные ресурсы, энергетика и экология. – 2021. – №1(1). – С. 43-50.

[8-A]. **Кабутов Х.К.** Оценка деградации ледников притока реки Иштансалды бассейна реки Сурхоб дистанционным методом. / А.К. Каюмов, У. Амиров, Х. Кабутов, Х.Д. Наврузшоев. // Криосфера. – 2021. –

Том 1. – №1-2. – С. 62-71.

[9-A]. **Кабутов Х.К.** Текущее состояние ледников бассейна реки Ситарги в ходе изменения климата. / А.К. Каюмов, С.Т. Гозиев, У.Р. Убайдуллоев, Х.К. Кабутов, Х.Д. Наврузшоев // Криосфера. – 2021. – Том 1. – №1-2. – С. 79-87.

[10-A]. **Кабутов Х.К.** Современное состояние ледников бассейн реки Батрут в условиях изменения климата. / А.К. Каюмов, А.Х. Давлятова, Х.К. Кабутов., Х.Д. Наврузшоев, Х. Саидзода. // Криосфера. – 2021. – Том 1. – №3-4. – С. 91-100.

[11-A]. **Кабутов Х.К.** Динамика площади зеркала горных озер бассейна реки Гунт (Памир, Таджикистан) / Х.Д. Наврузшоев, Ж. Сагинтаев, Х. Кабутов, Н. Неккадамова, Ф. Восидов, А. Халимов // Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов. – 2022. – 8(2). – С. 85–101.
<https://doi.org/10.29258/CAJWR/2022-R1.v8-2/85-101.rus>

[12-A]. **Khusrav K.** The Impact of Glacia Degradation on the State of the Agricultural Sector in the High-Mountain Territories of Tajikistan / K. Khusrav, N. Hofiz, H. Aziz //International Journal of Trend in Scientific Research and Development. – 2023. – Т. 7. – №. 3. – С. 1-8.

[13-A]. **Кабутов Х.К.** Исследование ледника Восточный Зулмарт (№139) гляциологическим методом / А.К.Каюмов, // Криосфера. – 2022. – Том 8. – №3-4. – С. 109-117.

Публикации в материалах научных конференций

[14-A]. Кабутов Х.К. Содержание тяжелых металлов в пробах атмосферных осадков и почв маренах ледника Зулмарт / А.К. Каюмов, С.Ф. Абдуллаев, Д.А. Каюмова, Х.К. Кабутов, М.К. Абдуллаева // Современные проблемы физики конденсированного состояния. – 2023. – С. 298-304.

[15-A]. Кабутов Х.К. Селевой поток в Рошткалинском районе в 2023 году / А.К. Каюмов, С.Ф. Абдуллаев, Х.К. Кабутов, Х.Д. Наврузшоев //

Современные проблемы физики конденсированного состояния. – 2023. – С. 316-320.

[16-А]. Кабутов Х.К. Исследование ледников верховья Сая Наукрум бассейна реки Сурхоб / Камолова Д.Х., Каюмов А.К., Шомахмадов А.М., Кабутов К.К. // Геология и Ледники: актуальные проблемы и перспективы сохранения в эпоху изменений. – 2025. – С. 48-56.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Агентства по
гидрометеорологии Комитета
по охране окружающей среды
при Правительстве Республики
Таджикистан



Курбонзода А.Х.
«18» сентября 2026 г.

АКТ № 1/6

«18» сентября 2026 г.

г. Душанбе

о внедрении результатов диссертационной работы **Курбониёна Хусрава Курбонджона** на тему: «Динамика баланса массы ледников в современных природно-климатических условиях на примере бассейна озера Ховаркуль (Каракуль) Восточного Памира», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.37 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Комиссия в составе:

Председатель комиссии: Назирзода Камолиддин Зайниддин – заместитель начальника Центра гляциологии Агентства по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан;

Члены комиссии:

1. Ходжизода А.Э. – начальник отдела гляциологии и снеголавинных исследований Центра гляциологии Агентства по гидрометеорологии;
2. Джурабекзода Н.М. - начальник отдела прогнозов, информации и архива Центра гляциологии Агентства по гидрометеорологии;
3. Худододов Х.Я. - начальник гидрографическо - экспедиционного отдела Центра гляциологии Агентства по гидрометеорологии.

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Курбониёна Хусрава Курбонджона внедрены и используются при проведении экспедиционных исследований ледников Республики Таджикистан и выполнении научно-исследовательских работ по мониторингу ледников и криосферы.

Актуальность темы. Исследование обусловлено необходимостью комплексного изучения современного состояния ледников Таджикистана в условиях глобального изменения климата. Ледники Восточного Памира

являются важнейшим компонентом криосферы Центральной Азии и играют значительную роль в формировании водных ресурсов региона. Изменение климата оказывает существенное воздействие на природные системы, включая ледники Таджикистана, а баланс массы ледников является одним из наиболее информативных индикаторов этих изменений.

Многочисленные исследования свидетельствуют о сокращении площади ледников во многих регионах мира, особенно малых ледников. Для изучения динамики оледенения применяются различные методы, включая анализ положения языка ледника и многолетних метеорологических данных. Однако такие подходы не всегда позволяют оперативно оценить ежегодные изменения, поскольку реакция ледников на климатические факторы может проявляться с временной задержкой.

В отличие от них, измерение баланса массы ледников обеспечивает получение более точной и актуальной информации о состоянии и динамике ледников, особенно в краткосрочной перспективе. Данный метод позволяет оценивать текущее состояние ледников, прогнозировать их дальнейшие изменения и определить возможное влияние на формирование водных ресурсов горных регионов.

Полученные результаты имеют большое значение для разработки мер адаптации к изменению климата, повышению эффективности управления водными ресурсами и обеспечению устойчивого развития различных отраслей экономики.

В работе получены следующие новые и достоверные результаты:

Научная новизна работы заключается в том, что впервые для исследуемого района выполнена комплексная оценка динамики баланса массы ледников в современных природно-климатических условиях. Получены новые данные о пространственно-временных особенностях изменения ледников Восточного Памира. Проведены наблюдения за балансом массы ледника №139 и определены основные факторы, влияющие на процессы аккумуляции и абляции. Разработаны научно-методические подходы к проведению мониторинга ледников с использованием данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных систем.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждаются использованием большого объема полевых материалов, применением современных методов гляциологических исследований, геоинформационных технологий, данных дистанционного зондирования Земли, статистических методов обработки информации, а также сопоставлением полученных результатов с данными отечественных и зарубежных исследований.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Полученные данные используются при ведении государственного мониторинга ледников и криосферы Республики Таджикистан.
2. Разработанные методы и подходы применяются при составлении и актуализации Каталога (Атласа) ледников Республики Таджикистан.
3. Результаты исследований используются для оценки состояния водных ресурсов ледникового происхождения и прогнозирования их изменений в условиях современного изменения климата.
4. Созданная база данных и картографические материалы могут использоваться государственными органами, научно-исследовательскими учреждениями и международными организациями при разработке программ адаптации к изменению климата и рационального использования водных ресурсов.
5. Результаты исследования способствуют совершенствованию системы наблюдений за ледниками, развитию современных методов гляциологического мониторинга и повышению эффективности научного обеспечения деятельности в области изучения и сохранения ледников Республики Таджикистан.

Результаты диссертационной работы имеют существенное практическое и научное значение. Результаты диссертационной работы имеют существенное научное и практическое значение и будут внедрены в научно-исследовательскую деятельность Центра гляциологии Агентства по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан, где используются при подготовке научных отчетов, разработке тематических карт оледенения, оценке состояния ледников и проведении мониторинговых исследований.

Инновационность исследования заключается в комплексном использовании полевых гляциологических наблюдений, геоинформационных систем, спутниковых данных высокого разрешения и современных методов оценки баланса массы ледников. Применение указанных подходов позволило повысить точность оценки состояния ледников, сократить объем полевых работ и обеспечить доступ к объективной информации о динамике оледенения.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Реализация результатов диссертационного исследования осуществляется посредством внедрения разработанных методологических подходов в научно-исследовательскую деятельность Центра гляциологии Агентства по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды

при Правительстве Республики Таджикистан, использование полученных данных при мониторинге ледников, подготовке научных прогнозов и разработке рекомендаций по адаптации к последствиям изменения климата.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Использование результатов диссертационного исследования позволит:

- повысить эффективность мониторинга ледников и криосферы Республики Таджикистан;
- усовершенствовать методы оценки баланса массы ледников и прогнозирования их изменений;
- обеспечить получение достоверной информации о состоянии ледников Восточного Памира;
- повысить качество научных исследований в области гляциологии, гидрологии и изменения климата;
- создать научную основу для принятия решений в сфере управления водными ресурсами и адаптации к климатическим изменениям;
- совершенствовать систему наблюдений за ледниками и обеспечить сохранение долгосрочных рядов гляциологических данных.

Председатель комиссии,
заместитель начальника Центра гляциологии
Агентства по гидрометеорологии



Назирзода К.З.

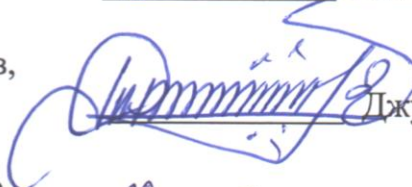
Члены комиссии:

Начальник отдела гляциологии
и снеголавинных исследований



Ходжизода А.Э.

Начальник отдела прогнозов,
информации и архива



Джурабекзода Н.М.

Начальник гидрографическо-
экспедиционного отдела



Худододов Х.Я.

Верно:

Начальник управление кадров
Агентства по гидрометеорологии



Ашуралиев Д.

« 18 » июль 2026 г.

УТВЕРЖДАЮ
 проректор по учебной работе и инновации
 Таджикского национального университета,
 д.х.н., профессор, Сафармамадзода С.М.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ **результатов научных исследований в учебный процесс**

Заказчик - кафедра метеорологии и климатологии, физического факультета Таджикского национального университета.

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований, выполненных на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 25.00.27 - Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия по теме «Динамика баланса массы ледников в современных природно-климатических условиях на примере бассейна озера Каракуль Восточного Памира» заведующим отделом «Мониторинга ледников криосферы, гляциологии и ГИС-технологий» ГНУ «Центра изучения ледников НАНТ» Кабутовым Х. внедрены в учебный процесс.

1. Цель внедрения: Основной целью данной работы является представление методики расчета баланса массы ледника прямым гляциологическим методом для воспроизведения данного метода на других ледниках.

2. Виды внедряемых результатов:

- новые методы определения баланса массы ледников в полевых и дистанционных условиях;
- основные замеры дали возможность рассчитать баланс массы ледника.
- камеральная работа и проведение изолиний для подсчета баланса массы ледника с учётом особенностей и рельефа поверхности ледника.

3. Форма внедрения:

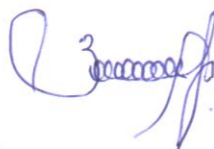
Подготовка учебно-исследовательских работ бакалавров и магистров по курсам дисциплин «Общая гидрология», «Гляциология», «Гидрометеорологические средства и методы измерения», и «Гидрологические прогнозы».

4. Эффективность практической реализации:

Повышение качества подготовки бакалавров, магистров и PhD.

Факт практического использования результатов научных исследований подтверждаем:

Декан физического факультета,
 к. ф-м. н., доцент



Кодирзода З.А.

Зам. декан физического факультета
 по науке и инновациям, к. ф-м. н, доцент



Шарифи Дж.Г.

Зав. кафедры метеорологии и
 климатологии, д.х.н., профессор



Норматов И.Ш.