

УДК: 551.324.43

## МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕДНИКА БАБРГУЗАР ПО ДАННЫМ АЭРОФОТОСЪЁМКИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Муслимов К.<sup>1,\*</sup>, Убайдуллоев У.Р.<sup>1</sup>, Кабутов Х.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана

\*Автор корреспондент. E-mail: muslimov.cryos@gmail.com

**Аннотация.** В работе предлагается комплексный подход к анализу современной поверхности ледника Бабргузар (Зулмарт), основанный на данных аэрофотосъёмки, полученной с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА). На основе цифровой модели рельефа были рассчитаны ключевые морфометрические параметры, отражающие пространственную структуру ледниковой поверхности: уклон, экспозиция, суммарная солнечная радиация, кривизна и характеристики гидрологического стока. С применением метода многокритериального взвешенного наложения выполнена интеграция этих факторов в единую карту пригодности поверхности. Полученная модель выявила закономерное распределение зон аккумуляционного потенциала и участков с повышенной абляцией, подчёркивая влияние локальной морфометрии на современные процессы на леднике. Результаты подтверждают эффективность использования высокоточных данных БПЛА для детального картографирования гляциальных поверхностей.

**Ключевые слова:** ледник Бабргузар (Зулмарт), морфометрический анализ, БПЛА (UAV), Цифровая модель рельефа (ЦМР), Взвешенное наложение (Weighted Overlay), ГИС-моделирование.

### Введение

Ледники высокогорных регионов являются важными элементами криосферы и ключевым компонентом водного баланса горных территорий [1].

Их состояние чувствительно к колебаниям температур, распределению твёрдых осадков и интенсивности солнечной радиации, что делает их надёжными индикаторами климатических изменений [2, 3,4].

В Памире за последние десятилетия наблюдается устойчивое сокращение ледникового покрова, что подтверждается международными исследованиями [5, 6, 7,8]. Эти изменения напрямую отражаются на водных ресурсах региона и экосистемных процессах. На территории Таджикистана, где ледники обеспечивают значительную часть годового стока рек, мониторинг оледенения приобретает особую значимость.

Современные методы дистанционного зондирования, особенно высокоточная аэрофотосъёмка с БПЛА, позволяют получать детальные цифровые модели рельефа, которые служат основой

для анализа морфометрии ледников [9,10]. Интеграция DEM с инструментами ГИС расширяет возможности оценки влияния солнечной радиации, уклонов и гидрологических сетей на динамику ледниковых процессов.

Цель данной работы - выполнить комплексный морфометрический анализ поверхности ледника Бабргузар (Зулмарт) и построить карту его пространственной пригодности, отражающую влияние уклона, экспозиции, радиации и гидрологических характеристик на условия аккумуляции и абляции.

### 1. Район исследования

Ледник Бабргузар расположен в восточной части Памира - регионе, где современные исследования фиксируют ускоренные климатические изменения и сокращение ледников [11,12]. Для района характерны низкие температуры, малый объём осадков и существенная роль ветрового перераспределения снега.

Высоты в пределах ледника варьируют от 4600 до 5500 м, что приводит к выраженной вертикальной зональности.

Верхняя аккумуляционная часть отличается сглаженными формами, тогда как нижняя зона характеризуется расчленённым рельефом, трещинами и активным поверхностным стоком. Южные склоны подвергаются значительной солнечной инсоляции, что усиливает процессы абляции.

Ледник входит в бассейн озера Каракуль и участвует в формировании сезонного стока местных водотоков. Сложные ландшафтные условия и труднодоступность делают применение дистанционных методов основным подходом к его изучению.



Рисунок 1. Ледник Бабругзар (Зулмарт) (Снимок с Google Earth Pro).

## 2. Методы

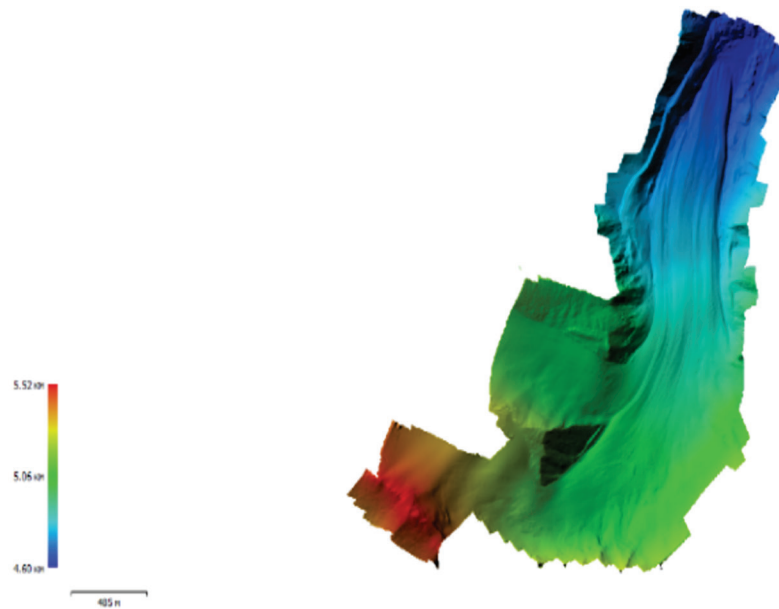
Методическая основа исследования базируется на комплексном подходе, сочетающем детальный морфометрический анализ цифровой модели рельефа (DEM) с последующим многокритериальным геоинформационным моделированием.

Основная цель данного блока состояла в разработке единой интегральной модели, способной оценить пространственные различия в процессах аккумуляции,

таяния и локальной динамики ледниковой поверхности.

### 2.1. Исходные данные и подготовительные операции

Цифровая модель рельефа (DEM) была создана в ПО Metashape на основе высокоточных аэрофотоснимков БПЛА. DEM была приведена к единой системе координат, отфильтрована и проверена на артефакты, что обеспечило корректность дальнейших расчётов.

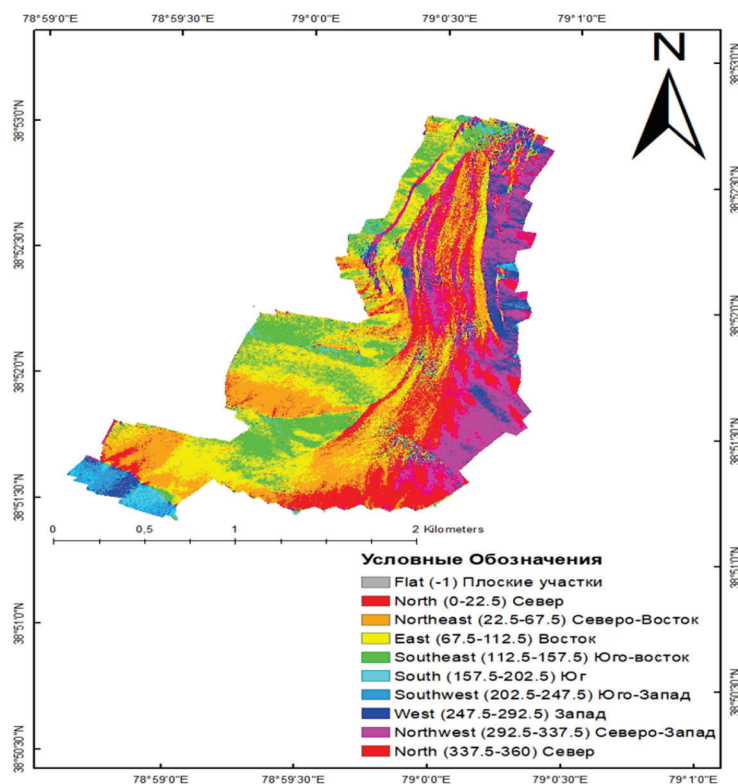


**Рисунок 2.** Цифровая модель местности (DEM) после сглаживания незначительных артефактов методом фильтрации низких пространственных частот, выполненного в программе фотограмметрической реконструкции.

## 2.2. Расчет экспозиции склонов (Aspect)

Экспозиция определена с использованием инструмента Arcgis(10.5) и переклассифицирована в укрупнённые

направления. Северные экспозиции рассматривались как потенциально аккумуляционные.

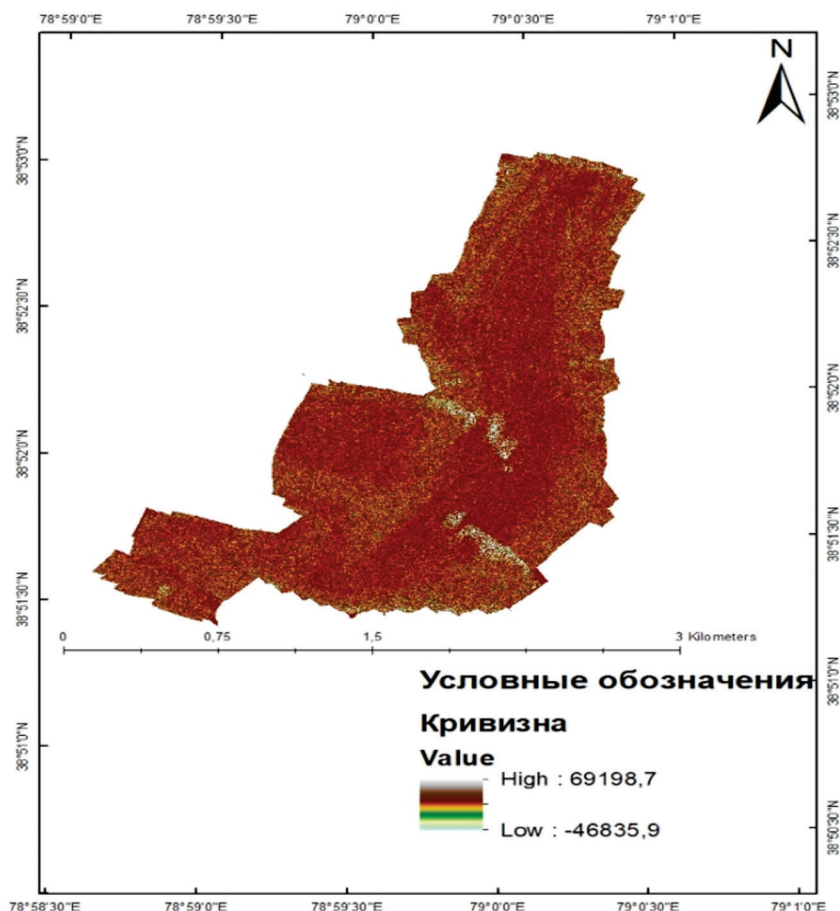


**Рисунок 3.** Карта экспозиции ледника, построенная по данным цифровой модели местности (DEM). Цветовая шкала указывает направление склонов в градусах (север – синий, юг – зеленый, восток – желтый, запад – темно-синий).

### 2.3. Кривизна поверхности (Curvature)

Параметр кривизны использован для выявления участков, способствующих накоплению или рассеиванию поверх-

ностного стока. Вогнутые участки интерпретировались как аккумуляционные, выпуклые - как зоны стока.



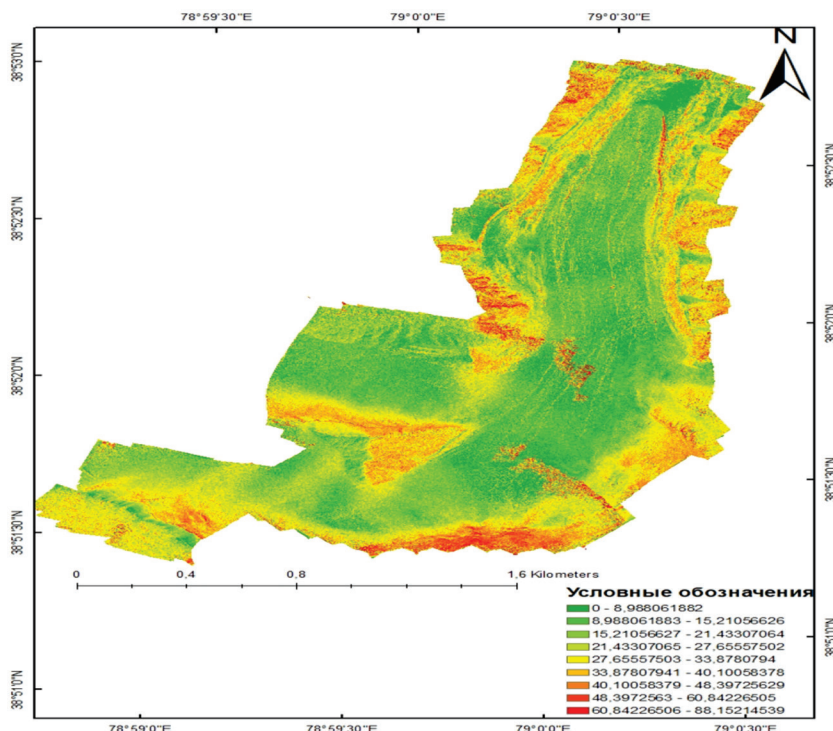
**Рисунок 4.** На карте синим цветом выделены вогнутые формы рельефа (участки конвергенции стока и потенциального накопления снега), красным цветом — выпуклые формы (гребни и выступы, подверженные интенсивной абляции), серым (или белым) цветом — участки с нулевой или близкой к ней кривизной.

### 2.4. Уклон поверхности (Slope)

Уклон рассчитан в градусах и разделён на классы, отражающие динамику стока талых вод. Пологие склоны соответствуют стабильным зонам, крутым - зонам активной абляции.

- Зеленые оттенки: Участки с минимальным уклоном (от 0 до примерно 15 градусов). Это могут быть плоские вершины, ледниковые плато или широкие долины.

- Желтые и оранжевые оттенки: Участки со средним уклоном (от 15 до примерно 40 градусов).
- Красные оттенки: Участки с максимальным уклоном (более 40 градусов, вплоть до 88.15 градусов). Это самые крутые склоны и обрывы на исследуемой территории.)

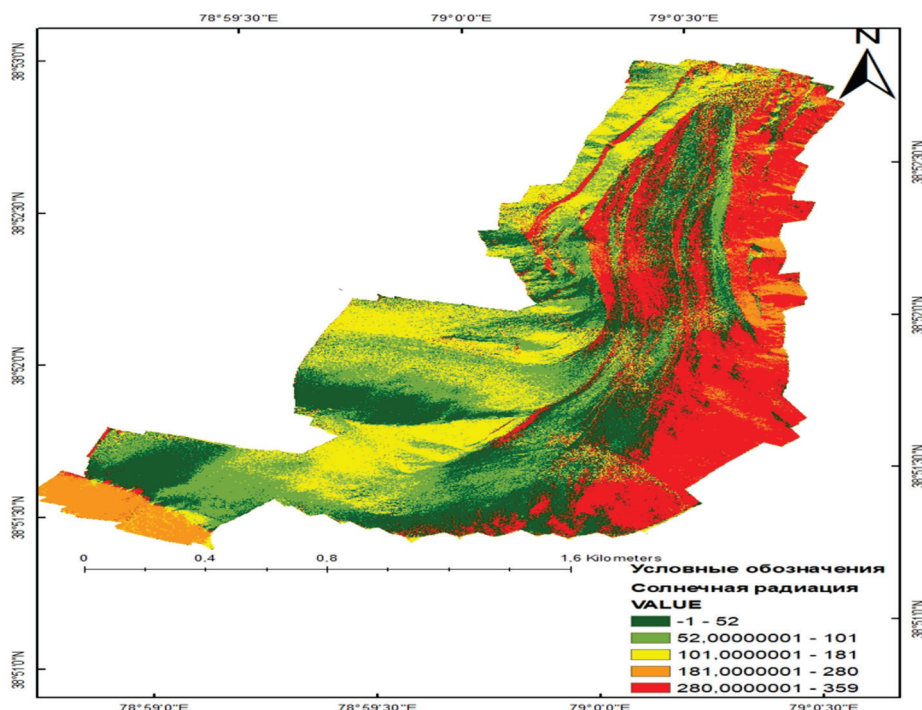


**Рисунок 5.** Карта уклонов поверхности ледника, построенная по данным цифровой модели местности (DEM). Цветовая шкала указывает угол наклона поверхности в градусах (от 0° до >60°).

**2.5. Солнечная радиация**

Радиационная модель построена с учётом рельефных теней и сезонных параме-

тров солнечного освещения. Этот показатель - важный критерий таяния льда [12].

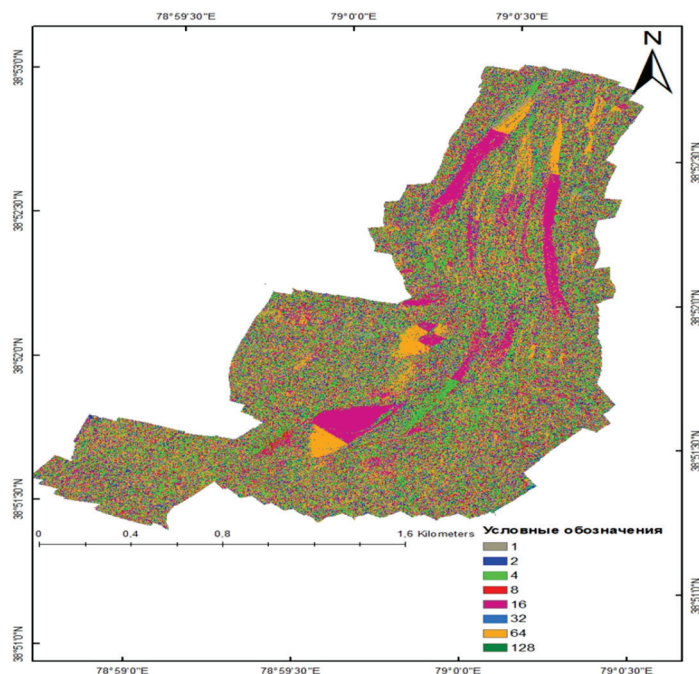


**Рисунок 6.** Карта суммарной солнечной радиации на поверхность ледника. Цветовая шкала указывает интенсивность радиации (VALUE) в диапазоне от низких значений (зеленый) до высоких (красный).

**2.6. Гидрологические характеристики**

С помощью Flow Direction и Flow Accumulation были смоделированы направления и концентрации потоков та-

лых вод. Это важно для понимания формирования поверхностных каналов и зон задержки воды.

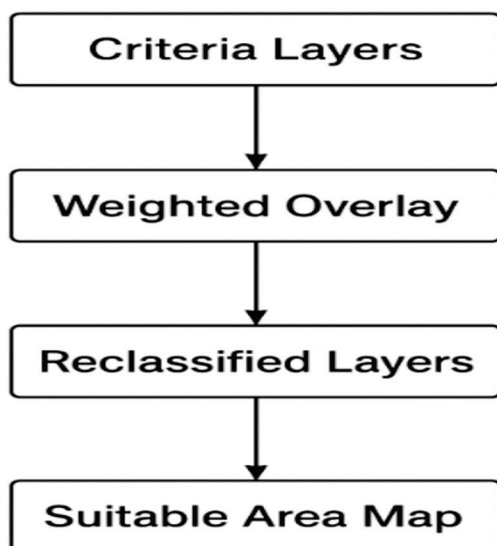


**Рисунок 7.** Карта гидрологической модели направлений стока воды ледника. Условные обозначения (1-128) представляют собой дискретные коды, используемые в ГИС-анализе для определения пути стока осадков и талых вод по поверхности рельефа.

**2.7. Многокритериальная интеграция (Weighted Overlay)**

Для объединения всех параметров была использована методика взвешенно-

го наложения. Наибольшие веса получили уклон и солнечная радиация, поскольку они сильнее всего влияют на абляцию.



**Рисунок 8.** Алгоритм выполнения операции взвешенного наложения (Weighted Overlay) в программном обеспечении Arcgis (10.5) Показана последовательность от входных данных (Criteria Layers) до итогового картографического продукта (Suitable Area Map).

### 2.8. Карта пригодности

Финальным этапом стала интеграция всех реклассифицированных параметров в единую карту пригодности. Для этого использовался инструмент *Weighted Overlay*, где каждому фактору был присвоен весовой коэффициент.

Весовые коэффициенты распределялись с учетом их значимости: уклон и

солнечная радиация были признаны наиболее значимыми, а сток, экспозиция и кривизна имели меньший вес. Суммарная оценка дала итоговый растр, отражающий пространственные различия условий на поверхности ледника (9,10). Для повышения точности результат был обрезан по границе ледника

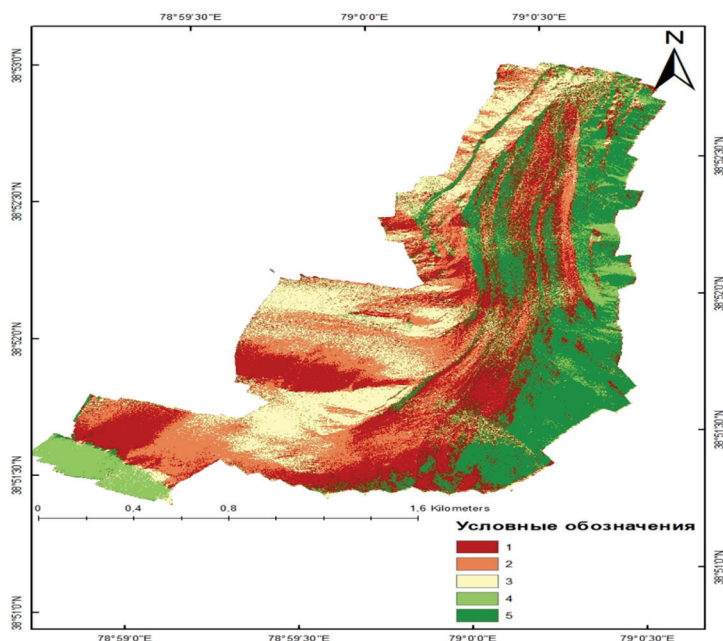


Рисунок 9. Карта пространственной оценки территории ледника, полученная с помощью инструмента "Взвешенное наложение" (*Weighted Overlay*).

Цветовая шкала (от 1 до 5) отражает итоговый индекс оценки, где 1 - наименьшая оценка (красный), 5 - наибольшая оценка (зеленый).

### 2.9. Количественная оценка распределения классов пригодности

Для перехода к количественной оценке площадей, занятых каждым классом пригодности, результирующий растровый слой был конвертирован в полиго-

нальный формат с помощью инструмента «Растр в полигоны». В атрибутивной таблице агрегирована статистическая информация по каждому уникальному классу.

Таблица 1. Статистика площадей для каждого класса пригодности.

OID	gridcode	Count gridcode	Sum Shape Area
0	1	412092	902729,109781
1	2	418408	890497,296562
2	3	257682	595838,792136
3	4	181191	263516,517336
4	5	202150	984330,499279

### 3. Результат исследования

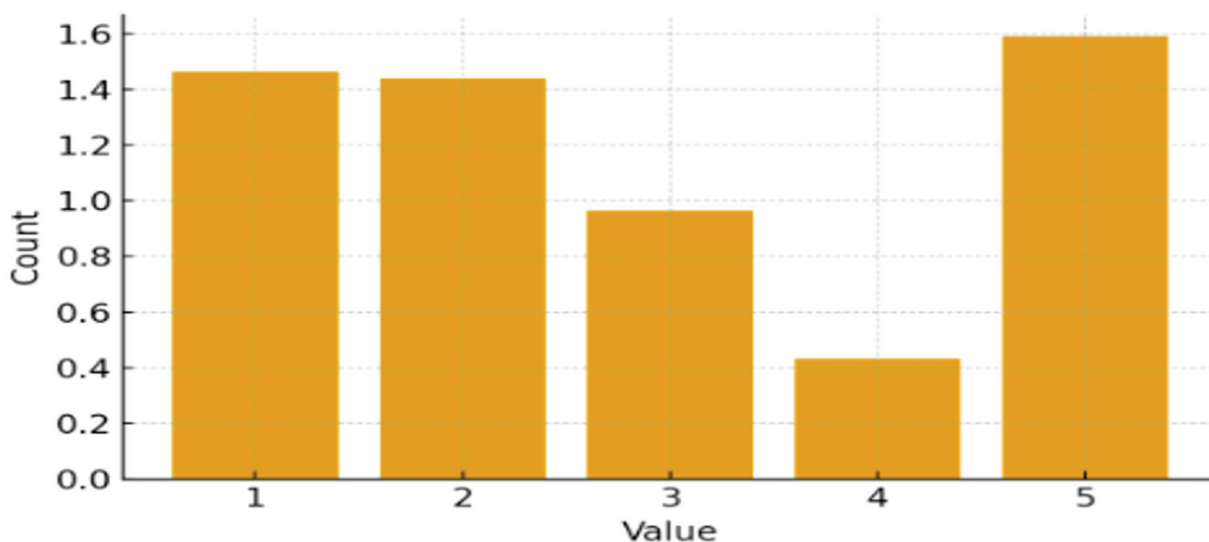
Построенная интегральная карта пригодности поверхности ледника демонстрирует выраженную неоднородность морфометрических условий, определяющих современные процессы перераспределения снега, таяния и концентрации талых вод. На итоговом растре чётко выделяются несколько зон, различающихся по степени потенциальной устойчивости и характеру взаимодействия с внешними факторами.

Наиболее благоприятные условия (класс 5), представленные на карте зелёными тонами, сосредоточены преимущественно на относительно пологих участках ледника и в областях с северной и северо-восточной экспозицией. Эти территории характеризуются пониженным уровнем солнечной радиации и менее выраженной динамикой поверхностного стока. Подобная комбинация факторов указывает на вероятное преобладание аккумуляционных процессов либо, по крайней мере, на относительно слабую интенсивность абляции в течение сезона таяния.

Противоположная картина наблюдается в зонах, отнесённых к наиболее

неблагоприятным классам (1–2), окрашенных в красные тона. Эти участки совпадают с крутыми склонами и южными или юго-западными экспозициями, получающими максимальную суммарную солнечную радиацию. Кроме того, здесь фиксируются высокие значения аккумуляции стока, что свидетельствует о концентрации талой воды и вероятности формирования временных русел либо локальных эрозионных форм на поверхности. На таких элементах рельефа условия для сохранения снежного покрова заметно хуже, что делает их потенциальными зонами активной абляции.

Интересным аспектом является пространственное распределение участков со средней степенью пригодности (классы 3–4). Они формируют переходную полосу между стабильными и динамически активными зонами ледника. Эти территории представляют собой сочетание умеренных уклонов и экспозиций, а также вариативных значений кривизны. Вероятно, именно здесь происходит наиболее активное перераспределение снега в начале сезона таяния, что отражает их роль в формировании структуры поверхностного стока.



**Рисунок 10.** Распределение количества пикселей (Count) по пяти итоговым классам оценки (Value от 1 до 5). График иллюстрирует долю площади ледника, относящуюся к каждому классу пригодности/опасности.

Сопоставление карты пригодности с морфологией ледника показывает, что результаты анализа хорошо согласуются с наблюдаемыми элементами рельефа. Пологие аккумуляционные зоны в верхней части ледника демонстрируют высокие значения пригодности, тогда как центральный и нижний абляционный пояс характеризуется преимущественным развитием неблагоприятных классов. Это подтверждает корректность выбранного подхода и обоснованность включённых морфометрических параметров.

Таким образом, полученная модель позволяет не только выделить участки с различной динамической напряжённостью, но и установить взаимосвязь между рельефными характеристиками и современными процессами на поверхности ледника. Комбинация уклона, экспозиции, солнечной радиации, кривизны и гидрологических параметров формирует устойчивую картину пространственной изменчивости условий, ключевую для дальнейших исследований динамики ледниковых систем.

#### 4. Обсуждение результатов

Выявленные закономерности хорошо согласуются с классической структурой горных ледников, где северные склоны играют роль аккумуляционных зон, а южные - зон интенсивной абляции. Полученная модель подтверждает, что морфометрические параметры оказывают ключевое влияние на распределение областей таяния и накопления.

Применение метода *Weighted Overlay* показало свою эффективность при интеграции разнородных геопространственных данных. Высокоточные DEM, полученные с БПЛА, дают возможность детально анализировать даже мелкие элементы рельефа, ранее трудные для картографирования.

Итоговая карта пригодности поверхности ледника демонстрирует ярко выра-

женную пространственную дифференциацию.

- Зона высокой пригодности (класс 5) располагается на пологих северных склонах с минимальной инсоляцией. Эти участки соответствуют аккумуляционным зонам, известным по предыдущим исследованиям ледников Памира [12].
- Зоны низкой пригодности (классы 1–2) совпадают с южными крутыми склонами, где наблюдается максимальный приход солнечной радиации и интенсивный сток.
- Переходные классы (3–4) формируют пояс умеренной динамики и отражают сочетание средних уклонов и вариативной кривизны.

Сопоставление результатов с фактической морфологией ледника подтверждает корректность использованного подхода.

#### Выводы

Использование беспилотного летательного аппарата (БПЛА) позволило получить данные с пространственным разрешением 24.8 см/пикс. На их основе была построена высокоточная цифровая модель рельефа (ЦМР), что обеспечило детальный расчет морфометрических параметров (уклона, экспозиции и кривизны) и позволило выявить микроформы рельефа ледника Бабргузар, которые не фиксируются спутниковыми снимками среднего разрешения.

На поверхности ледника отчётливо выделяются аккумуляционные зоны на северных пологих склонах и абляционные зоны на южных крутых участках.

1. Морфометрические параметры - уклон, экспозиция, радиация и кривизна являются ключевыми факторами пространственной изменчивости ледника.

2. Метод многокритериального анализа (*Weighted Overlay*) позволил получить интегральную оценку условий стабильности ледяной массы.

3. Данные БПЛА доказали высокую эффективность для детального анализа состояния ледников в труднодоступных районах Памира.

**Литература**

1. Котляков В. М. Избранные труды. Кн.1. Гляциология. – М.: Наука, 2000. – 688 с.
2. Immerzeel W. W., van Beek L. P. H., Bierkens M. F. P. Importance and vulnerability of the world's water towers // Nature. – 2020. – Vol. 577, No. 7790. – P. 364–369.
3. Kapitsa V., et al. Assessment of glacier surface evolution using high-resolution UAV photogrammetry // Journal of Mountain Science. – 2020. – Vol. 17. – P. 2355–2371.
4. Курбонов, Н.Б. Использование математического выражения, для определения объема и толщины ледников Кызылкул и Дидал бассейна реки Сурхоб, в результате последствия изменения климата // Земледелец. – 2023. – Т.99. – №2. – С.184-191. – EDN UHRGMD (на тадж. яз.).
5. Gardelle J., Berthier E., Arnaud Y., Kääb A. Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya from 1999 to 2011 // The Cryosphere. – 2013. – Vol. 7, No. 4. – P. 1263–1286.
6. Farinotti D., Longuevergne L., Moholdt I., et al. Glacier decline in the Pamir as revealed from satellite and in situ data // Nature Communications. – 2015. – Vol. 6. – Article 8023.
7. О зависимости движения ледника медвежий от изменения метеорологических параметров / Н.Б. Курбон, Т.М. Чурабеков, Ф.Д. Шарифов, Б.М. Боев // Ледники Таджикистана – источник водных ресурсов Центральной Азии в условиях изменения климата: Международная научно-практическая конференция, посвященная Международному году сохранения ледников, 2025 г. и Международному дню сохранения ледников, 14-15 марта 2025 г. - С.92-101. – EDN EKHRVN (на тадж. яз.).
8. Kääb A., Linsbauer M., Altena B. Quiescent phase glacier velocities and thinning rates in the Pamir Mountains, Central Asia // The Cryosphere. – 2018. – Vol.12, No.4. – P.1321-1334.
9. Heid T., Kääb A. Worldwide glacier velocities derived from optical satellite data // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol.121. – P.393-404.
10. Malczewski J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature // International Journal of Geographical Information Science. – 2006. – Vol.20, No.7. – P.703–726.
11. Eastman J. R., Jones P. A. K. K. GIS and Decision Making // GIS, Spatial Analysis and Remote Sensing. – 2016. – P.195–216.
12. Mayer C., et al. Glaciological characteristics of the Fedchenko Glacier, Pamir // Annals of Glaciology. – 2004. – Vol. 39. – P.103–110.
13. Pohl E., Knoche C., Gloaguen R., et al. In-situ measurements of glaciers in the Pamir Mountains, Tajikistan // Journal of Glaciology. – 2017. – Vol. 63. – P.1–18.

**ТАҲЛИЛИ МОРФОМЕТРИИ САТҲИ ПИРЯХИ БАБРГУЗАР ДАР АСОСИ МАЪЛУМОТИ АКСҲОИ МОҶВОРАИИ САТҲИ БАЛАНД**

**Муслимов К.<sup>1,\*</sup>, Убайдуллоев У.Р.<sup>1</sup>, Кабутов Х.Қ.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Муассисаи давлатии илмии Маркази омӯзиши пирияхҳои Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон  
\*Муаллифи масъул. E-mail: muslimov.cryos@gmail.com

**Шарҳи мухтасар.** Дар мақола таҳлили морфометрии сатҳи пирияхи Бабргузар (Зулмарт) дар асоси модели рақамии релйеф (DEM), ки тавассути Ҳавопаймои бесернишин ба даст оварда шудааст, пешниҳод мегардад. Нишондодҳои асосӣ ба монанди релйеф, нишебӣ, мавқеи ҷойгиршавӣ, хамиш, радиатсияи офтоб ва самтҳои ҷараёни об бо истифода аз имконоти Гео-иттилоотӣ натиҷагирӣ карда шуданд. Ҳамаи натиҷаҳои ҳосилшуда тавассути усули Weighted Overlay ба як модели ягона ҳамгиро карда шуданд. Харитаи ниҳоии баҳодиҳии ҳолати аккумулятсионӣ ва қитъаҳои ба аблятсияи фаъол дучоришуда тартиб дода шуд. Ин модел метавонад ҳамчун асос барои мониторинги минбаъдаи динамикаи пирияхҳо ва арзёбии устувории онҳо дар шароити тағйирёбии иқлим хизмат намояд.

**Калидвожаҳо:** Пирияхи Бабргузар (Зулмарт), морфометрия, модели рақамии релйеф (DEM), аксбардори ҳавоӣ, ҳаврпаймои бесарнишин, нишебӣ, экспозитсия, қачи сатҳ, радиатсияи офтобӣ, таҳлили гидрологӣ, ҷараёни сатҳ.

## MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE BABRGUZAR GLACIER SURFACE USING HIGH-RESOLUTION AERIAL PHOTOGRAPHY DATA

Muslimov K.<sup>1,\*</sup>, Ubaydullov U.R.<sup>1</sup>, Kabutov Kh.Q.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Scientific Institution Center for the Study of Glaciers of the National Academy of Sciences of Tajikistan

\*Corresponding author. E-mail: muslimov.cryos@gmail.com

**Abstract.** This study aims to identify and spatially differentiate zones of morphological stability (accumulation) and potential risk (ablation) on the Babrguzar (Zulmart) glacier surface. The analysis utilized high-precision data obtained from aerial photography via an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The research relies on a comprehensive Geographic Information System (GIS) analysis, including the calculation of several morphometric parameters: slope, aspect, curvature, and detailed modeling of incoming solar radiation. The Multi-Criteria Weighted Overlay method was applied to integrate these diverse factors. Modeling results established a clear zonal differentiation of the glacier: accumulation areas are predominantly concentrated on gentle northern slopes, whereas active melting zones coincide with steep, high-insolation southern slopes. The resulting quantitative distribution of suitability classes confirms that local surface morphology is a key regulator of the glacier's mass balance.

**Keywords:** Zulmart (Babrguzar) Glacier; Morphometric analysis; UAV; Digital Elevation Model (DEM); Weighted Overlay; GIS modeling;

**Маълумот оид ба муаллифон:** Муслимов Кадыр Каримович – лаборанти калони Муассисаи давлатии илмии «Маркази омӯзиши пирахҳои Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон», Тел: +992905051564; E-mail muslimov.cryos@gmail.com; Убайдуллоев Убайдулло Равшанович – ходими калони илмии Муассисаи давлатии илмии «Маркази омӯзиши пирахҳои Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон», Тел: +992200000946; E-mail ubaydullov80@gmail.com; Кабутов Хусрав Курбонҷонович – мудири шуъбаи мониторинги пирахҳои криосфера гляциология ва ГИС-технологияи Маркази омӯзиши пирахҳои АМИТ, Тел.: 934538084, E-mail: kabutov.khusrav@gmail.com.

**Сведения об авторах:** Муслимов Кадыр Каримович – старший лаборант Государственного научного учреждения Центра изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана, Тел: +992905051564; E-mail muslimov.cryos@gmail.com; Убайдуллоев Убайдулло Равшанович - старший научный сотрудник Государственного научного учреждения Центра изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана Тел: +992200000946, E-mail ubaydullov80@gmail.com. Кабутов Хусрав Курбонҷонович – заведующий отделом мониторинга ледников, криосферы, гляциологии и ГИС-технологий Центра изучения ледников НАНТ, Тел.: 934538084, E-mail: kabutov.khusrav@gmail.com.

**Information about the authors:** Muslimov Kadyr Karimovich – Senior Laboratory Technician Centre for Glacier Study of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Tel +992905051564; E-mail muslimov.cryos@gmail.com; Ubaydullov Ubaydullo Ravshanovich – Senior Scientific Researcher Centre for Glacier Study of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Tel: +992200000946, E-mail ubaydullov80@gmail.com; Kabutov Khusrav Kurbonjonovich – Head of Department for Monitoring glaciers, Cryosphere, Glaciology and GIS technology Center for Research of Glaciers of the NAST» Tel.: 934538084, E-mail: kabutov.khusrav@gmail.com.