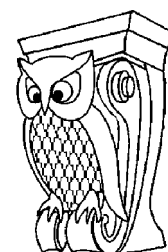




Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 13–20
Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 13–20
<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-1-13-20>

Научная статья
УДК 528.854.2:551.324.63



Использование данных дистанционного зондирования Земли при изучении горных ледников (на примере ледника Алибек в Карачаево-Черкессии)

В. З. Макаров, Д. В. Тюков[✉], П. А. Шлапак

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Макаров Владимир Зиновьевич, доктор географических наук, профессор, makarovvz@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0505-5257>

Тюков Денис Владимирович, студент бакалавриата, den1sov.an@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-6645>

Шлапак Павел Александрович, старший преподаватель, henryxiv@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6418-8749>

Аннотация. В статье приводятся результаты изучения динамики изменений ледника Алибек по данным космоснимков разных лет. Рассматриваются методы обработки данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) Земли для определения структурных элементов ледниковой поверхности. Проводится сопоставление полученных данных с наземными метеорологическими параметрами.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, ледник Алибек, индекс NDSI, глобальное потепление

Для цитирования: Макаров В. З., Тюков Д. В., Шлапак П. А. Использование данных дистанционного зондирования Земли при изучении горных ледников (на примере ледника Алибек в Карачаево-Черкессии) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 13–20. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-1-13-20>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

The use of Earth remote sensing data in the study of mountain glaciers (on the example of the Alibek glacier in Karachay-Cherkessia)

V. Z. Makarov, D. V. Tyukov[✉], P. A. Shlapak

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Vladimir Z. Makarov, makarovvz@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0505-5257>

Denis V. Tyukov, den1sov.an@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-6645>

Pavel A. Shlapak, henryxiv@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6418-8749>

Abstract. The article presents the results of studying the dynamics of changes in the Alibek glacier according to space images of different years. Methods for processing remote sensing data (ERS) of the Earth to determine the structural elements of the glacial surface are considered. The obtained data are compared with ground meteorological parameters.

Keywords: remote sensing data, Alibek glacier, NDSI index, global warming

For citation: Makarov V. Z., Tyukov D. V., Shlapak P. A. The use of Earth remote sensing data in the study of mountain glaciers (on the example of the Alibek glacier in Karachay-Cherkessia). *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 13–20 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-1-13-20>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Актуальность исследования. Значимость исследования динамики оледенения на Западном Кавказе довольно высока и обусловлена влиянием нивально-гляциальных структур на прилегающие к ним территории. Горные ледники влияют на речной сток, провоцируют чрезвычайные ситуации в речных бассейнах, которые могут привести к риску возникновения опасных ситуаций для расположенных поблизости населенных пунктов [1]. Динамика размеров ледников является индикатором современного глобального потепления.

Цель исследования – изучение динамики горного оледенения на примере ледника Алибек в Боковом хребте Западного Кавказа с помощью данных дистанционного зондирования Земли.

Авторы решали следующие задачи:

- определить влияние ледника Алибек на речной сток, питающий р. Теберду большую часть года;
- показать уменьшение площади ледника за последние десятилетия как одного из наиболее «чутких» индикаторов изменений климата;



– продемонстрировать возможность замены значительной части выполняемых наблюдений на метеорологических и гляциологических станциях данными дистанционного зондирования, определив основные их преимущества и недостатки при изучении горных районов оледенения.

Современные методы дистанционного зондирования Земли позволяют с достаточной точностью и периодичностью фиксировать морфометрические характеристики ледниковых структур, не прибегая к полевым исследованиям или в значительной мере заменяя их. Это особенно актуально для труднодоступных территорий, не охваченных стационарными наблюдениями, на которые полученные в данном исследовании закономерности можно экстраполировать.

Объектом исследования является ледник Алибек. Он расположен в Западном Кавказе на Боковом хребте Большого Кавказа в Карачаево-Черкесии западнее пос. Домбай (рис. 1).

Это ледник долинного типа с северо-восточной экспозицией в ущелье Алибек, протянувшееся от вершин Джаловчат и Сулахат к Домбайской поляне, нижняя граница которого расположена на высоте 2074 м, а вершина – на высоте 3363 м.

Ущелье в значительной степени выработано водами р. Алибек и многократным оледенением. В долине можно встретить классические ледниковые формы: «бараньи лбы», цирки и полуцирки, моренные валы. Само ущелье имеет форму трога с корытообразным поперечным про-

филом, в ширину оно достигает 0.68 км, а в длину – 1.5 км. Языки ледника Алибек несколько десятилетий назад спускались к верхней части лесной зоны до абсолютной высоты ~2050 м [2].

Длина ледника в настоящее время составляет 3 832 м, его нижняя кромка расположена на уровне 2074 м (рис. 2). Площадь и объем ледяной массы, измеренные с помощью разных методик, соответственно равны 5.5863 км², 0.1790 км³ (модель glabtop), 0.177 км³ (формула Мазо – Глазырина) [2].

Методы исследования. В качестве основного был выбран метод дистанционного зондирования Земли. Его преимуществами перед методами полевых экспедиций и стационарных наблюдений являются автономность и относительная экономичность ресурсов, затрачиваемых для получения искомым данных, а также актуальность и периодичность данных. Особенное значение использование данного метода имеет в современных условиях, когда в открытом доступе находятся снимки высокого разрешения, сделанные с приемлемой периодичностью наблюдений и содержащие информацию в разных диапазонах спектра излучения. Хотя точность определения различных морфометрических характеристик ледника по ДЗЗ, безусловно, проигрывает натурным съемкам, но может быть применена для получения обобщенных данных, которых достаточно для большинства целей.

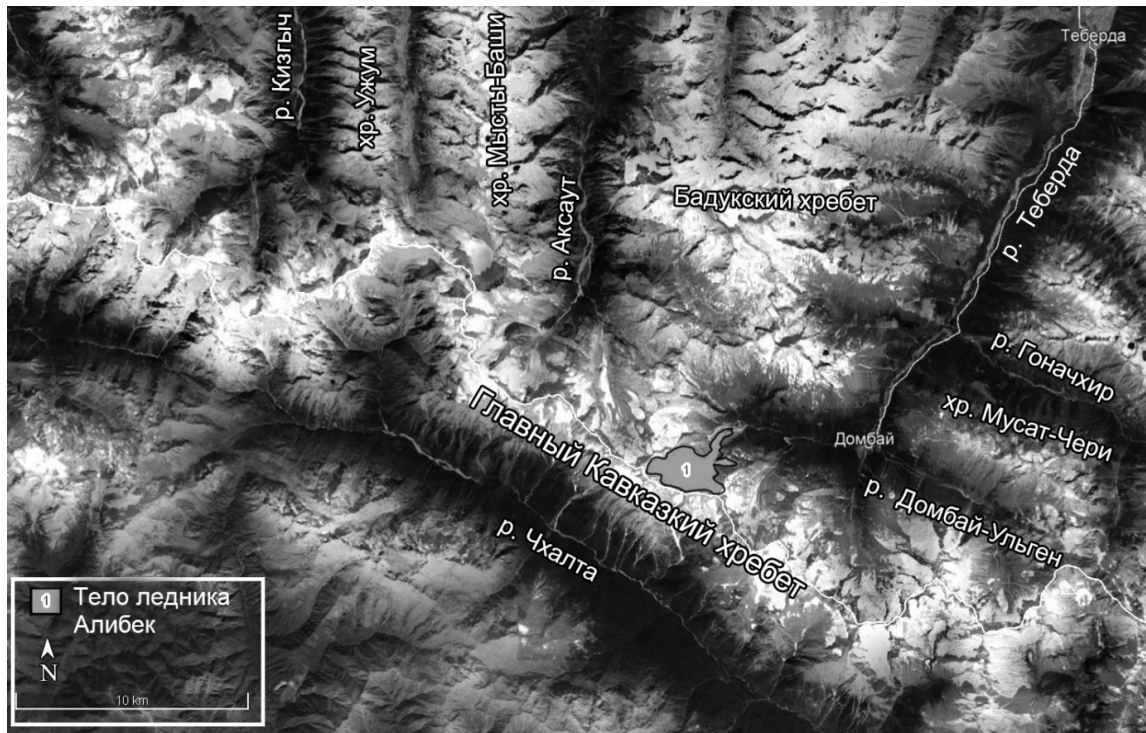


Рис. 1. Положение ледника Алибек в системе хребтов Западного Кавказа (композиция снимков Landsat 8)



Рис. 2. Современное состояние языка ледника Алибек. Июль 2021 г. (фото П. А. Шлапака)

При дешифрировании снимков снежно-ледовых поверхностей с некоторой долей автоматизации используется алгоритм выделения покрытой снегами и льдом площади. Применение указанного алгоритма обусловлено высокой отражательной способностью снежно-ледовых поверхностей в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах спектра и резким ее снижением в коротковолновом ИК диапазоне. Данное свойство позволяет четко отделить исследуемые объекты от облачности или других светлых объектов.

На особые отражательные свойства объектов в разных диапазонах опирается теория спектральных индексов, являющихся пространственными моделями, основанными на операциях растровой алгебры с изображением объектов в разных спектральных диапазонах [3]. Обработанные специальным образом данные ДЗЗ применяются для картографирования сельского хозяйства [3], рельефа [4,5], водных объектов [6–9], моделирования зон затопления [10,11], выделения снежных поверхностей [12–14].

Обзор публикаций по теме исследования.

Остановимся на современных исследованиях, использующих ДЗЗ при изучении деградации ледников.

В работах [15,16] рассматривается метод изучения ледников с помощью ДЗЗ в Монгольском Алтае, в бассейне р. Цаган-Сала-Гол. С помощью обработки данных спутников Landsat и Aster в программном обеспечении ENVI и ArcGIS были выявлены тенденции деградации современного оледенения. Несмотря на использование приемов повышения разрешения космоснимков (метод паншарпенинга), авторы констатируют низкую точность исследования по ДЗЗ в применении к малым ледникам (менее 0,5 км²).

Отметим, что выделение контуров ледников авторы проводили лишь по видимому диапазону, без спектральных преобразований, что позволяет получить лишь некоторую часть доступной информации.

В исследованиях [17,18] рассмотрен мониторинг ледников в Гималаях, Кодарском хребте на Кавказе и массиве Мунку-Сардык в Восточном Саяне. Слежение за динамикой ледников выполнялось на основе анализа данных спутниковых систем Landsat, Aster, QuickBird, WorldView-1. Использовалась технология композиции цветного изображения из нескольких диапазонов спектра, в том числе инфракрасного. Согласно изложенным данным наблюдается зависимость между увеличением средних температур и уменьшением площади исследуемых ледников. При этом аналогичная корреляция с количеством осадков отсутствует. Полученные результаты показывают наибольшие темпы таяния ледников в 1980-е гг. и постепенное затухание этого процесса к 2010-м гг. Данная тенденция прослеживается во всех исследуемых горных системах.

В работах [2,19] рассматриваются тенденции современного оледенения в районах Западного Кавказа, в бассейне р.Кубань. Показывается существенная деградация ледников разной интенсивности за последние 100 лет. Выводы сделаны по данным экспедиций разных лет, лихенометрического и дендрохронологического датирования, анализа ДЗЗ. Исследователи использовали методы преобразования плановых характеристик ледника в трехмерные модели. На основе расчетных данных показываются современные темпы деградации площадей и объемов ледников Западного Кавказа. Следует отметить высокую практическую значимость этих исследований и необходимость их актуализации.

В публикациях [12–14] рассматриваются современные способы анализа ДЗЗ для выделения снежно-ледовых поверхностей, а также определения их качественных и количественных характеристик. Одним из наиболее распространенных алгоритмов является построение раstra индекса снега NDSI (Normalized difference snow index), который высчитывается по формулам с использованием яркостных значений диапазонов коротковолнового ИК, а также зеленого канала:

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR1}{GREEN + SWIR1}, \quad (1)$$

где GREEN – спектральный диапазон 0,53 мкм – 0,61 мкм, SWIR1 – спектральный диапазон 1,55 мкм – 1,75 мкм [12, 13].

Использованные материалы и их подготовка. Определив временные рамки исследования, а это последние четыре десятилетия, авторами были использованы снимки спутниковых систем Landsat-5 и Landsat-8. Данные снимки имеют пространственное разрешение в 30 м –



оптимальное разрешение для анализа площади деградации ледника, позволяющее выполнить вычисления на средне- и даже при некоторых преобразованиях крупномасштабном уровне.

Дополнительно из архива метеостанции, расположенной на Клухорском перевале [20], была получена информация по среднемесячным температурам и количеству выпадающих осадков в рассматриваемом горном районе за период с 1984 по 2019 г.

Определение динамики структурных элементов Алибекского ледника производилось с помощью обработки данных ДЗЗ с использованием опубликованных источников, в которых присутствует довольно точное описание изменений домбайской группы ледников за последний век [2, 19]. Кроме того, полученные результаты были сопоставлены с имеющимися у авторов полевыми наблюдениями ледника Алибек в 2019 г. и 2021 г.

Содержание исследования и его обсуждение. Авторами было выполнено моделирование спектральных индексов. Построение раstra спектрального индекса NDSI (Normalized Difference Snow Index) и определение структурных компонентов ледника по нему производилось в среде программного обеспечения Quantum GIS версии 2.18. Изображения, полученные в результате операций растровой алгебры, открыли возможность для выделения зон ледниковой аккумуляции и абляции, т. е. зон накопления снежной

массы и ее таяния. Каждой из зон соответствует определенный диапазон значения индекса, по которому интерпретация снимков производится гораздо оперативнее и точнее [12, 13].

На основе данных, полученных с метеостанции на Клухорском перевале, были составлены графики средних сезонных значений температуры, сумм значений атмосферных осадков по сезонам за период с 1984 по 2019 г. Выпадающие осадки не показывают четко выраженного тренда на увеличение или уменьшение. В то же время сезонные температуры лета указывают на достаточно четкий повышающий тренд (рис. 3).

Была построена модель колебания нижней границы ледника на основе данных, полученных в ходе дешифрирования ДЗЗ, а также исследований [2], которые демонстрируют положение разновременных конечных морен Алибекского ледника (рис. 4). Синтез этих показателей позволил получить представление о характере движения ледника и его темпе за последнее столетие [2].

Расчет морфометрических и гляциоклиматических показателей ледника. Анализ данных, полученных в ходе камеральных работ по обработке космоснимков Landsat 5 и Landsat 8, а также рассчитанных показателей площади и объема массы ледника [2] позволил построить график динамики параметров ледника Алибек, который иллюстрирует общую картину изме-

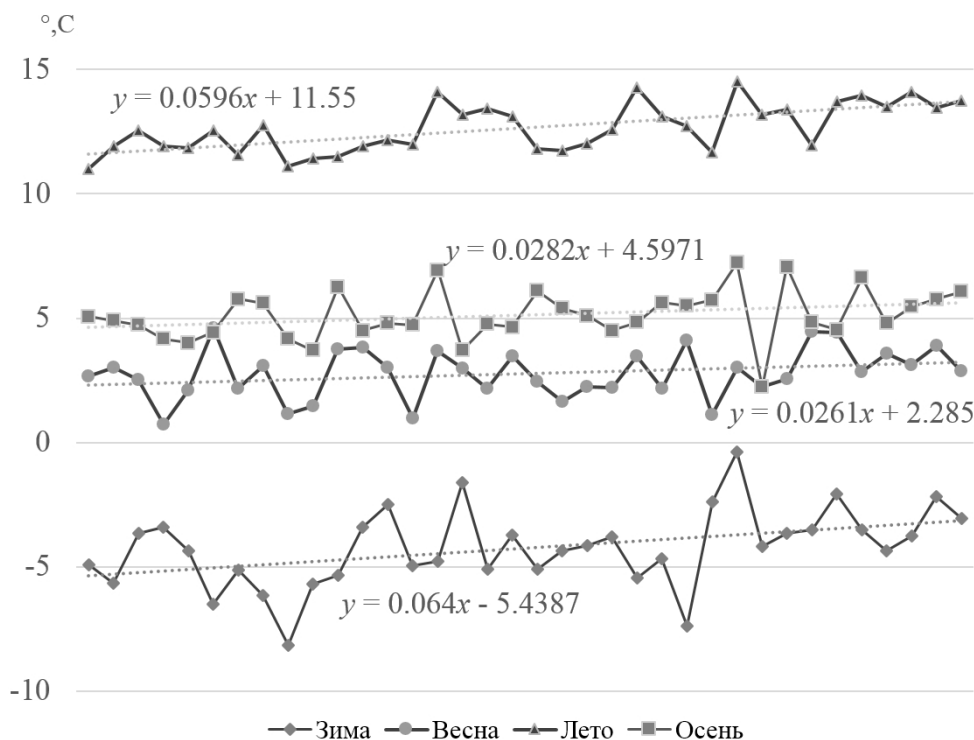


Рис. 3. Графики изменений сезонных температур воздуха (1984–2020 гг.) в районе Клухорского перевала на Западном Кавказе, построенные по данным метеостанции на Клухорском перевале [20]



Рис. 4. Динамика поверхности ледника Алибек. Сплошные линии – устойчивое положение границы ледника за соответствующее десятилетие, даты показывают возраст моренных отложений (сост. по: [2] и на основе камеральной обработки космоснимков)

нения его состояния за последние десятилетия (рис. 5). Полученные данные рассчитывались с помощью модели glabtop, формулы Мазо – Глазырина, метода Адхикари [2].

Проанализировав представленные тенденции по данным ДЗЗ за время с 1985 по 2016 г.

с помощью методов, аналогичных [2], можно заметить:

- в целом происходит замедление темпов деградации ледника;
- замедление уменьшения площади не такое сильное, как замедление сокращения объема

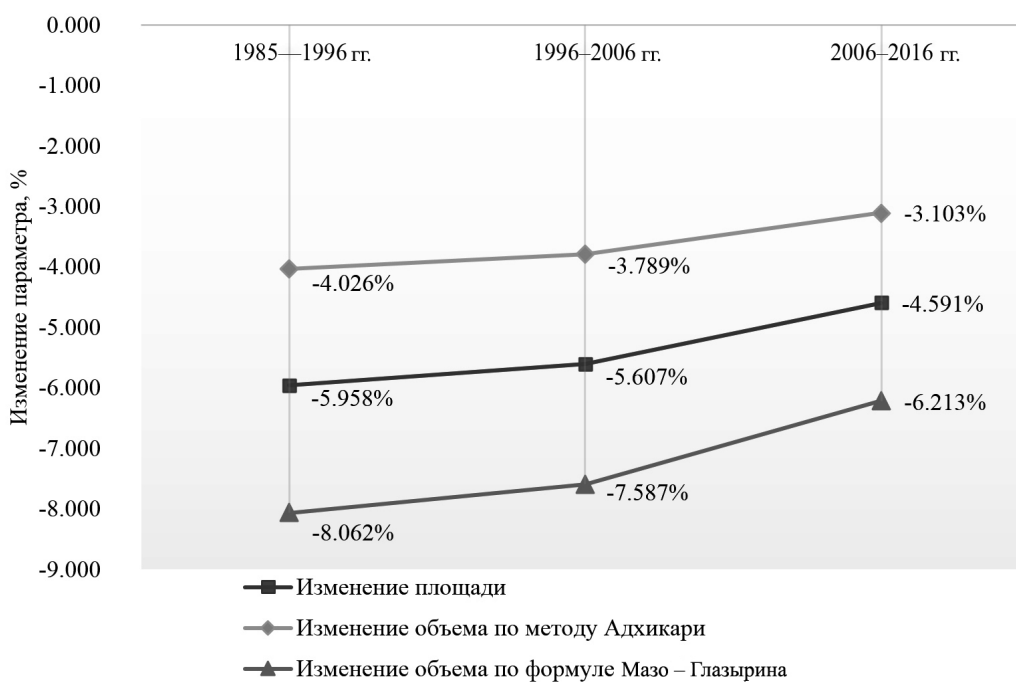


Рис. 5. Изменение площади и восстановленного объема ледника Алибек (сост. по: [2])



ма, что, вероятно, связано с постепенным переходом деградации от части, спускающейся в долину («языков»), к более мощной части ледника, находящейся на большей абсолютной высоте.

Выделение структурных элементов. Другая важная задача – идентификация структурных зон нивально-гляциальных объектов: зоны накопления (аккумуляции) и зоны таяния (абляции). Представленные выше метеорологические данные (см. рис. 3), а также расположение конечных морен за последний век позволяет говорить о постепенном увеличении абсолютной высоты климатической снеговой линии, разделяющей структурные зоны ледника.

Чтобы проверить эту гипотезу, по данным, полученным в результате обработки моделей спектрального индекса *NDSI*, были выделены структурные зоны по сезонам за каждое десятилетие с 1980-х гг. по 2020 г. (рис. 6).

Удалось установить, что наибольшую деградацию претерпевает нижняя абляционная часть, граница которой отступает за последние десятилетия, о чем говорит серия построенных моделей (см. рис. 4). Северо-восточная часть ледника постепенно теряет соединение с основным телом, изолируясь в небольшом пространстве. Кроме того, центральный язык ледника, спускающийся в долину р. Алибек, истончается, уменьшая и объем, и площадь достаточно равномерно в течение рассматриваемого промежутка времени (см. рис. 5).

Абляционная и аккумуляционная зоны ледника были выделены на основе обработки данных съемочной системы Landsat в видимом и коротковолновом инфракрасном диапазонах за последние четыре десятилетия. В июле 2021 г. авторами дополнительно была проведена GPS-съемка нижнего края главного языка ледника Алибек, спускающегося вниз по долине (см. рис. 5). Положение по сравнению с предыдущим годом (2016 г.) натурных обследований изменилось в среднем на 40–70 м вверх по ущелью, что подтверждает обозначенные выше тенденции.

Выводы. Выполненное исследование позволило сформулировать следующие выводы.

1. Разность отражательной способности зоны аккумуляции и зоны стока ледника позволяет провести их идентификацию по данным ДЗЗ и проследить динамику изменения по сезонам. Космоснимки, полученные в августе и сентябре, являются наиболее предпочтительными для рассмотрения из-за наибольшей разности отражаемого излучения между зонами абляции и аккумуляции.

2. Полученные на основе данных с метеостанции на Клухорском перевале (1984–2020 гг.) графики изменения средних сезонных температур демонстрируют тренды к повышению и коррелируют с изменениями площади поверхности ледника Алибек за последние десятилетия.

Устойчивых трендов изменения выпадения осадков за данный период не наблюдается. Не выделяется также значимая корреляция суммарного количества осадков и динамики размеров ледника. Таким образом, наиболее значимым фактором в современной деградации ледника Алибек является повышение температуры в летний сезон.

3. При определении объема снежных масс, составляющих тело ледника, возникает проблема невозможности установления точного объема по дистанционным данным из-за неизвестного значения толщи ледникового покрова. Однако можно вычислить объем ледника как функцию площади, которую занимают снежные массы, учитывая погрешности моделирования. На протяжении 2010-х гг. ледник Алибек демонстрирует общую тенденцию к уменьшению объема массы (см. рис. 5). По выполненным расчетам можно сделать вывод о постепенном замедлении темпов уменьшения массы ледника, что может быть объяснено значительной деградацией нижней, сравнительно тонкой абляционной части.

4. Сравнивая изменения контуров ледника за последний век (по анализу абсолютной высоты конечных морен) и за последние четыре десятилетия, на основе полученных данных в ходе обработки ДЗЗ можно отметить следующее: изменения положения нижней границы ледника значительно выражены и имеют неоднородный характер, последние четыре десятка лет ледник имеет наибольшие темпы изменения основных структурных компонентов, т. е. наблюдается ускорение темпов его деградации. В то же время в последние два десятилетия эти темпы незначительно замедляются (см. рис. 4).

5. Структурно наибольшим изменениям подверглись основной язык ледника, значительно истончившийся и уменьшившийся по площади, а также боковой северо-восточный язык, который изолировался от основного тела в последнее десятилетие. Кроме того, значительно увеличилась высота климатической снеговой линии, сократилась площадь аккумуляции, хотя эти изменения и не столь значительны, как в нижней, сравнительно тонкой части ледника.

Подводя итоги можно сказать о значимости используемой модели *NDSI*, применение которой в работах, посвященных исследованию ледников, позволит с высокой степенью точности проводить процедуру интерпретации космоснимков, выделения структурных элементов ледника, мониторинга процессов в нивально-гляциальной зоне. Для уточнения данных могут быть использованы общедоступные модели снежного покрова, обладающие невысоким пространственным разрешением, но поддерживающие необходимую актуальность [21–23].

Стоит отметить, что хотя взаимосвязь, наблюдаемая между климатическими характеристиками и динамикой размеров ледника, выявляется довольно четко, для наиболее полного

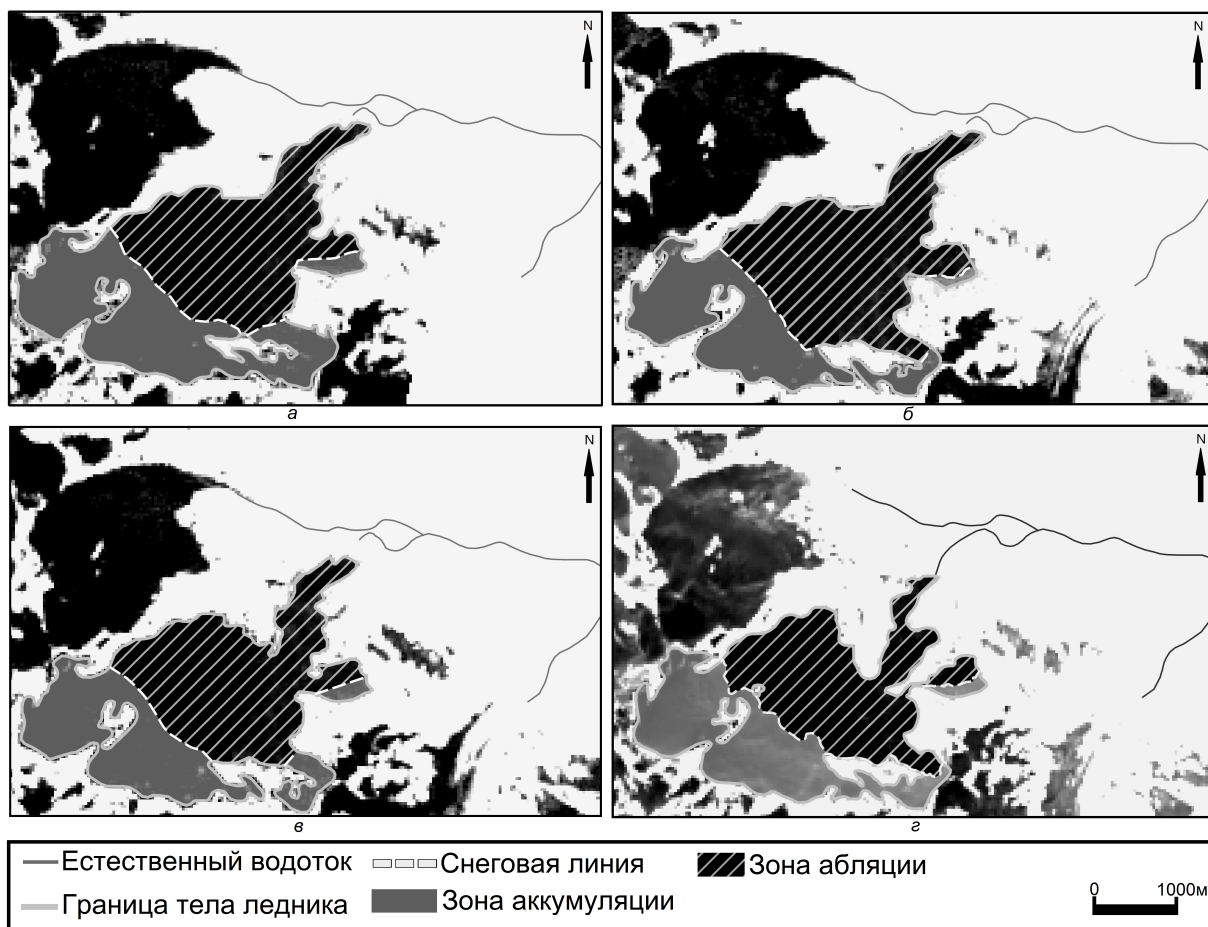


Рис. 6. Динамика зон абляции и аккумуляции ледника Алибек по моделям NDSI за летний период по четырем десятилетиям с 1980-х гг. по 2020 г. (по данным Landsat 5 и Landsat 8): а – летний сезон 1980–1990е гг.; б – летний сезон 1990–2000е гг.; в – летний сезон 2000–2010е гг.; з – летний сезон 2010–2020е гг.

рассмотрения генезиса деградации объекта необходимо производить анализ и других факторов, оказывающих влияние на динамику ледника.

Наблюдаемый тренд изменения ледника Алибек характеризуется значительной деградацией основных структурных компонентов с достаточно высоким темпом, что отмечается за последние четыре десятилетия. Прогнозирование состояния ледника указывает на затухание темпов его деградации, что может быть обусловлено стаиванием его нижней тонкой уязвимой части.

Библиографический список

1. Геоэкологический риск-анализ нефтяных месторождений Саратовской области с применением ГИС технологий / А. Н. Чумаченко, А. В. Молочко, В. З. Макаров [и др.] ; под ред. А. Н. Чумаченко. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2017. 104 с.
2. Бушуева И. С., Соломина О. Н., Жомелли В. История ледника Алибек по данным дистанционного зондирования, биоиндикации, ¹⁴C и ¹⁰Be датирования // Лёд и Снег. 2015. № 55 (3). С. 97–106.

3. Антонова О. С., Неврюев А. М., Шлапак П. А. Использование данных ДДЗ для анализа влагообеспеченности сельскохозяйственных угодий (на примере саратовского заволжья) // Геоинформационное картографирование в регионах России : материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Воронеж : Цифровая полиграфия, 2020. С. 22–27.

4. Федоров А. В., Шлапак П. А., Муженский Д. А. Исследование линейной эрозии путем создания уточненной цифровой модели рельефа на основе SRTM (на примере территории Хвалынского района Саратовской области) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Науки о Земле. 2020. Т. 20, вып 1. С. 36–40. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-1-36-40>

5. Хворостухин Д. П., Муженский Д. А., Власенко А. А. Обработка общедоступных данных дистанционного зондирования для создания крупномасштабной цифровой модели рельефа // Сборник материалов участников XVI Большого географического фестиваля, посвященного 200-летию со дня открытия Антарктиды русской экспедицией под руководством Фаддея Беллинсгаузена и Михаила Лазарева. Санкт-Петербург : Свое издательство, 2020. С. 607–611.



6. Using water indices (ndwi, mndwi, ndmi, wri and awei) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and gis techniques // Researchgate. URL: https://www.researchgate.net/publication/320869780_using_water_indices_ndwi_mndwi_ndmi_wri_and_awei_to_detect_physical_and_chemical_parameters_by_apply_remote_sensing_and_gis_techniques (дата обращения: 18.04.2021).
7. Target detection method for water mapping using landsat 8 OLI/TIRS Imager // Researchgate. URL: https://www.researchgate.net/publication/274837119_Target_detection_method_for_water_mapping_using_landsat_8_OLITIRS_Imagery/ (дата обращения: 16.04.2021).
8. Морозова В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования // Современные проблемы территориального развития. 2019. № 2. С. 1–12.
9. Проказов М. Ю., Шлапак П. А. Использование ГИС-технологий в картографировании геосистемных и геоэкологических характеристик Волжской островной поймы в районе г. Саратова // Геоинформационное картографирование в регионах России : материалы X Всероссийской научно-практической конференции. Воронеж : Научная книга, 2018. С. 137–141.
10. Шлапак П. А., Морозова В. А., Морозова Е. А. Разработка алгоритма математико-картографического моделирования зон затопления застроенных территорий (на примере участка реки Медведица у города Петровска (Саратовской области) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Науки о Земле. 2020. Т. 20, вып. 3. С. 176–183. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-3-176-183>
11. Морозова В. А. Применение ГИС-технологий совместно с данными дистанционного зондирования (ДДЗ) для мониторинга и картографирования зон затопления на примере рек Саратовской области // Теория и практика гармонизации взаимодействия природных, социальных и производственных систем региона : материалы Международной научно-практической конференции : в 2 томах / редколлегия : С. М. Вдовин (отв. ред.) [и др.]. Саранск : Издательство Мордовского университета, 2017. С. 359–364.
12. Дмитриев А. В., Дмитриев В. В. Аппроксимационный алгоритм картирования снежного покрова по спутниковым данным // Актуальные вопросы современной науки. 2014. № 36. С. 40–51.
13. Кучмент Л. С., Романов П. Ю., Гельфан А. Н., Демидов В. Н. Оценка характеристик снежного покрова путем совместного использования моделей и спутниковой информации // Исследование Земли из космоса. 2009. № 4. С. 47–56.
14. Чурюлин Е. В., Копейкин В. В., Розинкина И. А., Фролова Н. Л., Чурюлина А. Г. Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2. С. 120–143.
15. Лапина К. В., Останин О. В., Дьякова Г. С. Динамика оледенения хребта монгольский Алтай (на примере бассейна реки Цаган-Сала-Гол) // Вестник АГАУ. 2017. № 9 (155). С. 72–76.
16. Kamp U., Krumwiede B., McManigal K., Pan C., Walther M., Dashtseren A. The Glaciers of Mongolia / Institute for Arctic, Antarctic and Alpine Research (INSTAAR). Missoula, 2013. 43 p.
17. Китов А. Д., Плюснин В. М. Сравнение динамики ледников в Гималаях и горах юга Восточной Сибири // Известия Иркутского государственного университета. Серия : Науки о Земле. 2019. Т. 29. С. 68–83.
18. Shea J. M., Immerzeel W. W., Wagnon P., Vincent C., Bajracharya S. Modelling glacier change in the Everest region, Nepal Himalaya // The Cryosphere. 2015. Vol. 9. P. 1105–1128.
19. Лурье П. М., Панов В. Д., Ильичев Ю. Г., Салпагаров А. Д. Снежный покров и ледники бассейна реки Кубани // Труды Тебердинского государственного биосферного заповедника. 2006. Вып. 41. 243 с.
20. Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori> (дата обращения: 18.04.2021).
21. Шихов А. Н., Герасимов А. П., Пономарчук А. И., Перминова Е. С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения / Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2020. 191 с.
22. Pyankov S. V., Shikhov A. N., Mikhaylyukova P. G. Simulation of snow accumulation and melting in the Kama river basin using data from global prognostic models // Led i Sneg. Ice and Snow. 2019. Vol. 59 (4). P. 494–508.
23. Шихов А. Н., Связов Е. М. Прогнозирование динамики процесса снеготаяния на западном Урале с применением мезомасштабной модели WRF/ARW // Современные проблемы науки и образования. URL: <https://science-education.ru/pdf/2013/4/363.pdf> (дата обращения: 19.01.2020).

Поступила в редакцию 10.12.2021; одобрена после рецензирования 15.20.2021; принята к публикации 20.12.2021
The article was submitted 10.12.2021; approved after reviewing 15.20.2021; accepted for publication 20.12.2021