







И.В. Северский¹ , Б.А. Муканова^{1,2} , В.П. Капица¹ ,
М.Е. Татькова^{1,2*} , А.Л. Кокарев¹ , И.Н. Шестерова¹ 

¹Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Казахстан, г. Алматы

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы
*e-mail: tatkova_m@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЕ ОЛЕДЕНЕНИЯ СЕВЕРНОГО СКЛОНА ИЛЕ АЛАТАУ ЗА СЕМИДЕСЯТИЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Проблема дефицита водных ресурсов, особенно пресной воды и стока в вегетационный период, актуальна для всех государств аридных регионов. В Центральной Азии, в том числе и в Казахстане, одним из основных поставщиков пресной воды являются горные регионы. Климатообусловленная деградация горного оледенения вызывает изменения в горных экосистемах, оказывая непосредственное влияние на жизнедеятельность людей, вызывает изменения в гидрологических циклах, биогеохимии рек и гляциальных озер, влияя на качество и доступность водных ресурсов. В статье представлены результаты семидесятилетнего мониторинга изменения площади оледенения северного склона Иле Алатау. По данным оперативных космических съемок сенсоров Landsat 5 TM+ и Landsat 8, 9 OLI TIRS за 1990, 2006, 2014 и 2022 годы оценено состояние оледенения. Для анализа деградации ледниковой системы использованы данные предыдущих каталогизаций этого региона – по состоянию на 1955, 1974, 1979, 1990, 2008 гг. За 67 лет оледенение северного склона Иле Алатау сократилось по площади на 140,4 км² (на 49 %), теряя в год по 2,1 км² или по 0,72 % своей площади. Темп деградации практически не изменился в сравнении с прежними исследованиями оледенения этого региона. На основании прогноза, к концу XXI века оледенение северного склона Иле Алатау может исчезнуть, разумеется, при сохранении условий деградации.

Ключевые слова: оледенение, ледниковые системы, космические снимки, геоинформационные системы, прогноз деградации оледенения.

I.V. Severskiy¹, B.A. Mukanova^{1,2}, V.P. Kapitsa¹,
M.Ye. Tatkova^{1,2,*}, A.L. Kokarev¹, I.N. Shesterova¹

¹Central Asian Regional Glaciological Centre (category 2) under the auspices of UNESCO, Kazakhstan, Almaty

²Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: tatkova_m@mail.ru

Changes in the glaciation of the northern slope of Ile Alatau over the seventy-year period

The problem of shortage of water resources, especially fresh water and runoff during the growing season, is relevant for all countries in arid regions. In Central Asia, including Kazakhstan, mountainous regions are one of the main suppliers of fresh water. The climate-caused degradation of mountain glaciation causes changes in mountain ecosystems, having direct impact to human life, causes changes in hydrological cycles, biogeochemistry of rivers and glacial lakes, affecting the quality and availability of water resources. The article presents the results of the seventy-year monitoring of changes in the area of glaciation of the northern slope of Ile Alatau. According to the satellite surveys of the Landsat 5 TM+ and Landsat 8, 9 OLI TIRS sensors for 1990, 2006, 2014 and 2022, the state of glaciation was assessed. To analyze the degradation of the glacial system were used the data from previous inventories of this region - as of 1955, 1974, 1979, 1990, 2008. For 67 years, the glaciation of the northern slope of Ile Alatau has decreased in area by 140.4 km² (by 49%), losing 2.1 km² or 0.72% of its area per year. The rate of degradation has not changed much in comparison with previous studies of the glaciation of this region. Based on the forecast, by the end of the 21st century, the glaciation of the northern slope of the Ile Alatau may disappear, of course, by the remaining conditions of degradation.

Key words: glaciation, glacial systems, satellite images, geoinformation systems, glaciation degradation forecast.

И.В. Северский¹, Б.А. Муканова^{1,2}, В.П. Капица¹,
М.Е. Татькова^{1,2*}, А.Л. Кокарев¹, И.Н. Шестерова¹

¹ ЮНЕСКО аясындағы 2-санатты Орта Азия Өңірлік Гляциологиялық Орталығы, Қазақстан, Алматы қ.

² Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: tatkova_m@mail.ru

Жетпіс жылдық кезеңдегі Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі мұзданудың өзгеруі

Су ресурстарының, әсіресе вегетациялық кезеңдегі тұщы су мен ағынның тапшылығы проблемасы аридтік зоналардың барлық мемлекеттері үшін өзекті. Орта Азияда, оның ішінде Қазақстанда да тұщы судың негізгі жеткізушілерінің бірі таулы өңірлер болып табылады. Тауды мұзбасу деградациясының климатына байланысты тау экожүйелерінде өзгерістер туғызады, адамдардың тіршілік әрекетіне тікелей әсер етеді, гидрологиялық циклдарда, өзендер мен гляциалды көлдердің биогеохимиясында өзгерістер тудырады, су ресурстарының сапасы мен қолжетімділігіне әсер етеді. Мақалада Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі мұздану алаңының өзгеруіне жетпіс жылдық мониторинг нәтижелері келтірілген. 1990, 2006, 2014 және 2022 жылдардағы Landsat 5 TM+ және Landsat 8, 9 OLI TIRS сенсорларының жедел ғарыштық түсірілімдеріне сәйкес мұздану жағдайы бағаланды. Мұздық жүйенің деградациясын талдау үшін осы аймақтың алдыңғы каталогтарының -1955, 1974, 1979, 1990, 2008 жж деректері пайдаланылды. 67 жыл ішінде Іле Алатауының солтүстік беткейінің мұздану ауданы бойынша 140,4 км²-ге (49% - ға) қысқарды, жылына 2,1 км²-ден немесе өз алаңының 0,72%-ын жоғалтты. Бұл аймақтың бұрынғы мұздану зерттеулерімен салыстырғанда деградация қарқыны іс жүзінде өзгерген жоқ. Болжам бойынша, XXI ғасырдың аяғында Іле Алатауының солтүстік беткейіндегі мұздану, әрине, деградация жағдайларын сақтай отырып жойылуы мүмкін.

Түйін сөздер: мұздану, мұздық жүйелер, ғарыштық түсірілімдер, геоақпараттық жүйелер, мұзбасу деградациясының болжамы.

Введение

Дефицит водных ресурсов является одной из наиболее актуальных проблем стран с засушливым климатом, а для стран Центральной Азии горное оледенение является одним из основных источников пресной воды в летний период. Продолжающаяся деградация оледенения в результате реакции на изменения климата создает новые проблемы для населения и экономики этого региона.

Согласно результатам исследований, представленных в докладах ООН, МГЭИК и Национальных сообщениях стран Центральной Азии по Рамочной конвенции ООН об изменении климата ожидается дальнейшее потепление климата и в перспективе проблема водного дефицита в регионе обострится: согласно прогнозным оценкам региональные водные ресурсы могут сократиться на 20 – 40 % относительно современных к концу столетия (Stocker T. F. et al, 2013: 68). В условиях роста населения и экономической активности обострится конкуренция и конфликты из-за водных ресурсов, и воздействие (нагрузка) на горные экосистемы усилится, что негативно отразится на водной и продовольственной безопасности стран региона.

Для точного прогноза изменения оледенения в обозримом будущем необходим постоянный мониторинг ледниковых систем (Котляков, 1987: 291). Гляциологический мониторинг – это проведение периодических наблюдений (в настоящее время с использованием ДДЗ) ледниковых систем различного уровня с каталогизацией и детальной характеристикой изменения отдельных ледников. Повторные инвентаризации ледников – самая надежная основа для сравнительной оценки изменения оледенения как естественной реакции на изменение климата.

Во всем мире в последние десятилетия отмечено сокращение оледенения, масштабы которого особенно возросли в XXI веке (Hoelzle et al, 2020: 113). Сокращение площади ледников высокогорной Азии отмечено в работах многих гляциологов (Aizen et al, 2006: 202; Liu et al, 2006: 92; Narama et al, 2006: 226; Shangguan et al, 2006: 81; Bolch, 2007: 3; Li et al, 2007: 428; Niederer et al, 2007: 228; Cogley, 2016: 41). Республика Казахстан не является исключением: площадь ледников на северном склоне Иле Алатау сокращается со средней скоростью 0,77% в год (Severskiy et al, 2016: 389).

Оледенение Балкаш-Алакольской впадины является одним из наиболее изученных в

Центральной Азии. Гляциологи изучают эту ледниковую систему на протяжении многих десятилетий. Систематические гляциологические исследования, начиная с создания Сектора географии Академии наук Казахстана в 1938 году значительно активизировались во время проведения работ по программам Международного геофизического года и Международного гидрологического десятилетия, и успешно продолжили работу в рамках приоритетов долгосрочной Международной гидрологической программы ЮНЕСКО. Состояние оледенения северного склона Иле Алатау оценивалось по результатам нескольких сопоставимых каталогизаций ледников на основании аэрофотосъемки (по состоянию на 1955, 1974, 1979, 1990 годы) и с использованием спутниковых снимков (по состоянию на 2008 год). В данной статье рассмотрено состояние оледенения на 2006, 2016 и 2022 годы и проведен анализ деградации оледенения за период с 1955 по 2022. Одной из основных целей работы являлось сравнение различных методических приемов мониторинга оледенения и оценки достоверности полуавтоматического метода.

Область исследований

Хребет Иле Алатау – крайняя северная дуга горной системы Тянь-Шаня в пределах Казахстана. Хребет вытянут с запада на восток на широте 43° с.ш. в пределах $75-78^\circ$ в.д. на расстоянии около 280 км при ширине 40-60 км (Ресурсы..., 1967: 6).

Естественными границами хребта являются: на востоке – река Шарын, на западе – перевал Кастек, на юге – реки Шелек и Чон-Кемин. Северные склоны хребта спускаются к предгорным впадинам, представляющим собой зеленый оазис и переходящим на севере в пустыни. На юге хребет довольно близко подходит к хребту Кунгей Алатау, сливаясь с последним в районе истоков рек Шелек и Чон-Кемин, образуя Шелек-Кеминскую перемычку (горный узел).

Центральная часть главного водораздельного гребня Иле Алатау протяженностью около 100 км достигает наибольших высот в районе Талгарского массива (Пик Талгар - 4973 м). Многие вершины в этом районе превышают отметку высот 4500 м.

От главного хребта в меридиональном направлении отходят отроги – ветвящиеся гребни второго порядка, отделенные ущельями на

северной стороне длиной 20-30 км. Северные боковые отроги по высоте почти не уступают вершинам осевого хребта. Средний уклон поверхности в центральной части хребта на севере составляет $6-8^\circ$ (Пальгов, 1958: 5).

Ледниковая система северного склона Иле Алатау снизу ограничена изогипсой 3300 м. Современное оледенение расположено в бассейнах рек: Узын Каргалы, Шамалган, Каскелен, Аксай, Каргалы, Улькен и Киши Алматы, Талгар, Есик и Турген, относящихся к бассейну р. Иле (Современное..., 2002: 149) и представлены на рисунке 1.

Инвентаризации района оледенения

Первый полный Каталог оледенения северного склона Иле Алатау по состоянию на 1955 г. был составлен в соответствии с рекомендациями подготовки многотомного издания «Каталог ледников СССР» Е.Н. Вилесовым и Р.В. Хониным (Ресурсы..., 1967: 3,4) по материалам аэрофотосъемки и экспедиционных наблюдений. Впоследствии при получении более точных результатов измерений в Каталог были внесены некоторые изменения, поэтому при характеристике оледенения мы используем данные Е.Н. Вилесова, заново пересчитанные в работе (Вилесов, Уваров, 2001: 8).

На базе топографических карт, созданных с применением материалов аэрофотосъемок 1973–75 гг., П. А. Черкасовым был создан второй полный Каталог ледников северного склона Иле Алатау по состоянию на 1974 г. (Черкасов и др., 1998: 8).

Подобные работы были проведены на основе данных аэрофотосъемки 1990 года Е.Н. Вилесовым и В.Н. Уваровым (Вилесов, Уваров, 2001: 11).

На основе карт М 1:25000 и по материалам аэрофотосъемки 1990 г., П.А. Черкасовым был составлен очередной Каталог ледников северного склона Иле Алатау (Современное..., 2002: 141, 148-182).

Инвентаризация ледников северного склона Иле Алатау по состоянию на 2008 год проведена А.Л. Кокаревым и И.Н. Шестеровой (Кокарев, Шестерова, 2011: 39, 43). При выполнении этой работы использовались космические снимки: Landsat 7 ETM+ (даты съемки 11.08.2006, 01.09.2008); IRS (LISS-3) (даты съемки 07.09.2006, 23.09.2008); ALOS (даты съемки 16.08.2006, 29.08.2008); IKONOS (дата съемки 30.08.2008).

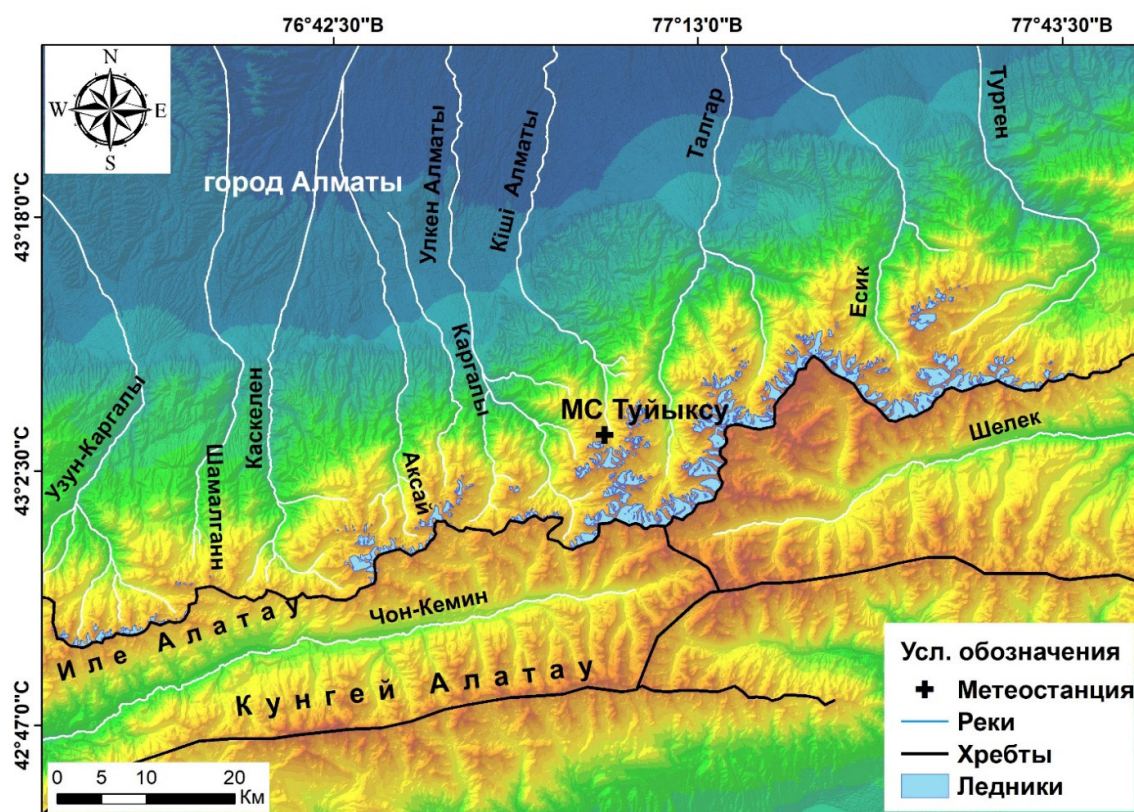


Рисунок 1 – Район исследования

Изменения климатических параметров региона

Деградация оледенения в Иле Алатау, как и во всем мире, происходит вследствие климатических изменений, а именно продолжающегося потепления. Повышение приземной температуры воздуха в среднем по Казахстану с 1976 по 2021 год оказалась выше общепланетарного и составило $0,32\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет (Восьмое национальное..., 2022: 205). В работе Л.А. Ерисковской (Ерисковская, 2014: 70). на основе анализа метеорологических данных (за 1972-2013 гг.) станции Туйыксу (3450 м над уровнем моря) (рисунок 1) делается вывод, что наиболее важным для существования ледников северного склона Иле Алатау является изменение температуры воздуха и выпадение осадков в летний период.

Положительные тренды за период с 1973 по 2022 г., по данным станции Туйыксу, выявлены для: среднегодовых температур ($0,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10

лет), средних температур теплого ($0,27\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) и холодного ($0,32\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) периодов (рисунок 2). Отметим, что рост температур теплого периода наблюдается во все месяцы, с наибольшими значениями в начале и конце абляционного периода (июне – $0,30\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет и сентябре – $0,41\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет), что может косвенно указывать на увеличение его продолжительности.

Аналогичное повышение температуры было выявлено в работе (Пивень, 2008: 115, 122) при оценке климатических изменений по данным метеостанций Туйыксу (за 1972–2005 гг.) и Мынжилки (3017 м) за период с 1937 по 2006 гг.

Выявленные в рядах сумм осадков положительные тенденции за годовой, теплый и холодный периоды (рисунок 3), как и отрицательные тренды за отдельные месяцы (декабрь, январь, апрель и июнь) являются статистически незначимыми на 5% уровне значимости, коэффициент детерминации составляет три процента и менее.

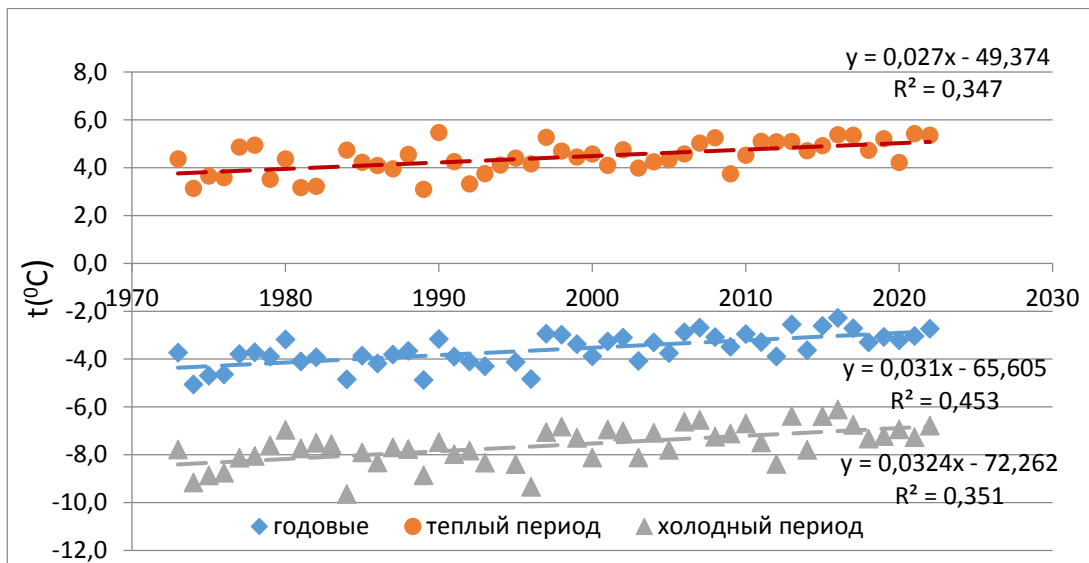


Рисунок 2 – Изменение температуры воздуха по данным станции Туйыксу за 1973–2022 гг.

Согласно исследованиям (Пивень, 2008: 122) из-за потепления в гляциально-нивальная зона Иле Алатау на более ранние сроки сдвинулись даты начала таяния снега и устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C весной и на более поздние сроки осенью, что также свидетельствует

об увеличении продолжительности теплого периода.

Таким образом, основными климатическими факторами, влияющими на сокращение оледенения Иле Алатау, являются устойчивый рост температур теплого периода и увеличение продолжительности периода абляции.

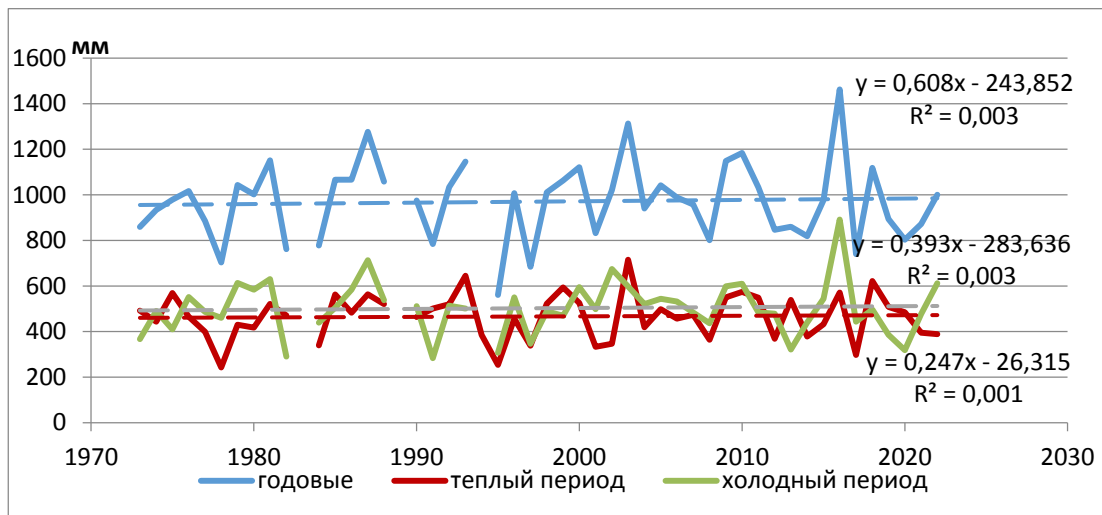


Рисунок 3 – Изменение сумм осадков по данным станции Туйыксу за 1973–2022 гг.

Материалы и методы

Для 1990, 2006, 2014 и 2022 годов площадь открытой части ледников рассчитывалась по-

луавтоматическим методом на базе программы ArcGIS. В таблице 1 перечислены данные спутниковых снимков, которые использовались в данном исследовании.

Таблица 1 – Характеристики использованных космических снимков

Название спутника/сенсор	Каналы	Путь/ряд	Идентификационный номер	Дата снимка
Landsat 5 ETM+	4 (0.64 - 0.67 μm); 6 (1.57 - 1.65 μm) 3 (0.525-0.600); 5 (0.845-0.885); 7(2:10-2.300; 8 050-0680)	151/033	LT05L1TP14903019900807202009 1502T1	07.08.1990
		151/033	LT05L1TP14903020060819202008 3102T1	19.08.2006
Landsat 8 OLI/ Landsat 9 OLI	3 (0.63 - 0.69 μm); 5 (1.55 - 1.75 μm) 2 (0.519-0.601); 4 (0.772-0.898); 7 (2.064-2.345); 8 (0.515-0.8986)	151/033	LC08L1TP1490302014080920200 91102T1	09.08.2014
		151/033	LC09L1TP1490302022082320220 82302T1	23.08.2022

Для автоматического определения водоразделов использовались цифровые модели рельефа SRTM3 GDEM (<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>) и ASTER GDEM2 (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>) с разрешением 30 м, а затем осуществлялось разделение оледенения по бассейнам основных рек района исследований. Был применен полуавтоматический метод оценки площади оледенения, подробный алгоритм которого изложен в работах авторов (Bolch, Kamp, 2006: 40; Paul et al, 2009: 121; Racoviteanu et al, 2009: 53-69). Лед имеет высокую отражательную способность в видимом электромагнитном диапазоне и низкую отражательную способность в ближней инфракрасной области, что позволяет автоматически обнаруживать чистый лед. Используя нормализованный индекс различия снега (NDSI) и отношение каналов (диапазон/b), можно легко отличить снег от чистого льда. Для дешифровки оледенения были использованы соотношения – для Landsat 5 b3/b5, для Landsat 8,9 b4/b6).

С оператором на финальной стадии ручное или полуавтоматическое дешифрование имеет множество преимуществ. Даже после применения всех этапов автоматической интерпретации и различных фильтров, некоторые полигоны могут оказаться не ледниками, а снежниками, озерами или чем-то другим. Это обстоятельство требует тщательного визуального критического анализа всех собранных данных, сравнения с уже существующими историческими данными, полевыми исследованиями, изображениями высокого разрешения и сопутствующими ресурсами.

Оператору не составит труда определить границы ледника по изображению на псевдоцветном изображении, если он знаком с регионом исследований, местной географией и изменениями ледника, которые происходили в прошлом. С помощью приложения ArcGIS спектральные диапазоны фотографий были объединены для создания мультиспектрального изображения (Муканова, 2023: 33-35). Также существует ряд сложностей с определением границы ледника, расположенного в тени хребтов (рисунок 4). При подборе сочетания различных каналов эта проблема может быть устранена (участок 1 на рисунке 4). Некоторые сложности определения границ открытой части ледника так же возникают при небольшом заморенивании языков ледников (участок 2 на рисунке 4).

При проведении работ по инвентаризации оледенения необходимы определенные требования к применяемым ДДЗ (в нашем случае к космическим снимкам) (Bolch et al 2007: 3, Кокарев, Шестерова, 2011: 42). Во-первых, применяются снимки, полученные в определенный период года, а именно в августе – начале сентября. Именно в этот период поверхность ледника максимально освобождается от снежного покрова. Во-вторых, космические снимки должны иметь минимум облачности, которая иногда полностью препятствует проведению векторизации ледников и получения важных морфолого-морфометрических характеристик элементов оледенения. В процессе выполнения данной работы были использованы снимки за август и с облачностью не более 5%.

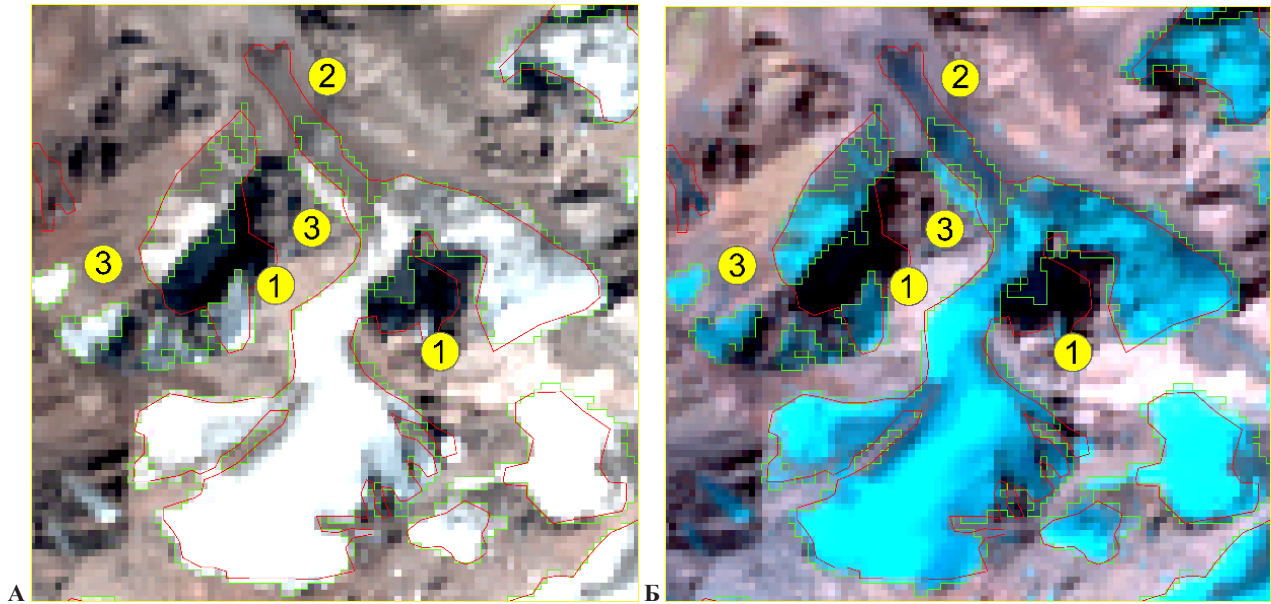


Рисунок 4 – Пример автоматического (зеленый) и полуавтоматического-ручного (красный) дешифрирования границ ледников при различных комбинациях каналов: А) сочетание каналов Landsat Band_3 Band_2: Band_1 (видимый спектр), Б) сочетание каналов Landsat Band_4: Band_5: Band_6; 1 – проведение границы в тени склонов, 2 – участки ледников, покрытые обломочные материалы, 3 – снежники

Результаты полуавтоматического и ручного картирования ледников хорошо согласуются друг с другом, особенно для крупных ледников без орографических особенностей. Общая площадь открытой части ледников, определенная полуавтоматическим методом, отличается от ручной обработки менее чем на 6 %, что позволяет говорить о возможности применения этих двух методов для оценки оледенения. Впрочем, разница в дешифрировании для некоторых отдельно взятых ледников может достигать 10 %.

Оценка погрешности расчетов

Для количественной оценки погрешности определения площади оледенения, вызванной искажением космических изображений, мы использовали «метод буфера» предложенный в работах (Bolch et al., 2010: 131; Granshaw and Fountain, 2006: 252-253), размер которого был выбран, исходя из величины среднеквадратической ошибки (RMSE) при сорегистрации снимков Landsat за исследуемые периоды, которая не превышала $\frac{1}{2}$ пикселя, т.е. 15 метров. Для каждого полигона-ледника был построен буфер величиной $\frac{1}{2}$ RMSE (7,5 м) и погрешность определялась разницей площадей полигонов с буфером

и без буфера. Такой метод дает относительно большую ошибку для ледников площадью менее $0,1 \text{ км}^2$, так как небольшой ледник имеет больше краевых пикселей. Кроме того, в погрешность мы включили ошибку оператора-исследователя, которая по данным (Paul et al, 2013: 177) в среднем составляет 3,6%.

Результаты и обсуждение

Площадь оледенения северного склона Иле Алатау по данным дешифрирования космических снимков Landsat за 4 временных среза, а также сведения по площади первого каталога, по бассейнам основных рек представлены в таблице 2 (Муканова, 2023: 37).

Как видно из таблицы, наибольшая площадь ледников сосредоточена в бассейне р. Он Талгар, где расположен и самый крупный ледник исследуемого района – ледник Дмитриева, (рисунок 5) площадь которого сократилась с 1990 по 2022 г на $2,9 \text{ км}^2$ и составила $9,7 \text{ км}^2$, а за весь период наблюдения, с 1955 по 2022 площадь сократилась на $7,3 \text{ км}^2$. Кроме того, ледник Дмитриева распался на 10 отдельных частей.

Таблица 2 – Площади оледенения (открытая часть) по бассейнам

Бассейн	Площадь открытой части ледника, км ²				
	1955	1990	2006	2014	2022
Узын-Каргалы	12,9	10,25 ±0,78	7,90 ±0,68	7,10 ±0,64	5,70 ±0,57
Шамалган	2,6	1,50 ±0,20	0,70 ±0,13	0,58 ±0,64	0,22 ±0,57
Каскелен	13,5	10,10 ±0,71	7,60 ±0,55	6,70 ±0,49	5,50 ±0,39
Аксай	13,5	10,90 ±0,79	9,10 ±0,71	8,20 ±0,67	6,60 ±0,58
Каргалы	3,9	2,90 ±0,08	2,20 ±0,07	1,90 ±0,07	1,60 ±0,05
Проходная	33,9	4,60 ±0,48	2,90 ±0,33	2,50 ±0,29	1,70 ±0,23
Улькен Алматы		18,40 ±0,13	15,40 ±0,13	13,80 ±0,12	11,60 ±0,12
Киши Алматы	9,3	7,18 ±0,56	5,90 ±0,49	5,05 ±0,43	3,95 ±0,36
Сол Талгар	112,5	57,50 ±3,62	50,80 ±3,61	46,50 ±2,97	41,20 ±2,76
Орта Талгар		24,80 ±1,64	22,77 ±1,52	20,90 ±1,55	18,70 ±1,48
Он Талгар		3,50 ±0,14	3,25 ±0,23	2,90 ±0,21	2,60 ±0,19
Есик	49,5	37,95 ±2,34	34,24 ±2,60	31,09 ±2,12	28,03 ±1,97
Турген	35,7	26,60 ±1,66	23,71 ±1,54	21,28 ±1,46	19,50 ±1,34
Сумма	287,3	216,18 ±14,57	186,47 ±13,79	168,50 ±12,54	146,90 ±11,37



Рисунок 5 – Ледник Дмитриева в верховьях р. Он Талгар (Фото В.П. Капица 2014 г.)

Наибольшие потери площади наблюдаются в бассейнах, где сосредоточены небольшие по размерам ледники. Так, например, ледники бассейна р. Шамалган с 1955 по 2022 год сократились более чем на 90% с 2,6 до 0,22 км² (рисунок 6). Обратная картина наблюдается в бассейнах с крупными по площади ледниками (таблица 2, рисунок 6). Если в бассейне р. Шамалган средняя площадь ледника, по состоянию на 2022 год составляла около 0,03 км², то в бассейнах рек Талгар, Есик и Турген – 0,61; 0,6 и 0,7 км² соответственно, при этом ледники сократились на 44% в Талгаре, на 43% в Есике и на 45 % в Тургене (рисунок 6).

В целом, за исследуемый 67-и летний (1955-2022) период, ледники по площади сократились более чем на 140 км², что составляет около 49% или 0,73% в год.

На рисунке 7 приведены графики изменения площади оледенения по полученным данным (точки красного цвета, график а), и с учетом данных предыдущих исследований (точки синего цвета, график б). Одной из задач данного исследования являлось сопоставление данных, полученных разными методами и на основе различной исходной информации (топографические

карты, аэрофотосъемка, космические снимки). Для этого, по состоянию на 1990 г была определена площадь оледенения северного склона Иле Алатау по космическим снимкам Landsat TM 5 с разрешением 30 м. В результате сравнения с каталогом А.П. Черкасова, составленным на основе аэрофотосъемки, разница составила около 6% (график б), что находится в пределах ошибки измерения. Причины отклонения точек от прямой на графике б могут быть связаны с: качеством исходной информации (облачность на снимках, степень покрытости снегом, разрешение); методом определения границ ледников (ручной, полуавтоматический); субъективной оценкой исполнителя.

Таким образом, новые данные по площади оледенения Иле Алатау, полученные нами на основе дешифрирования космических снимков Landsat, подтверждают ранее выявленную тенденцию сокращения площади оледенения и увеличение темпов деградации при этом пока не наблюдается. Сделанный на основе графиков прогноз показывает, что при сохранении условий деградации, оледенение Иле Алатау практически исчезнет к концу столетия (к 2095 году).

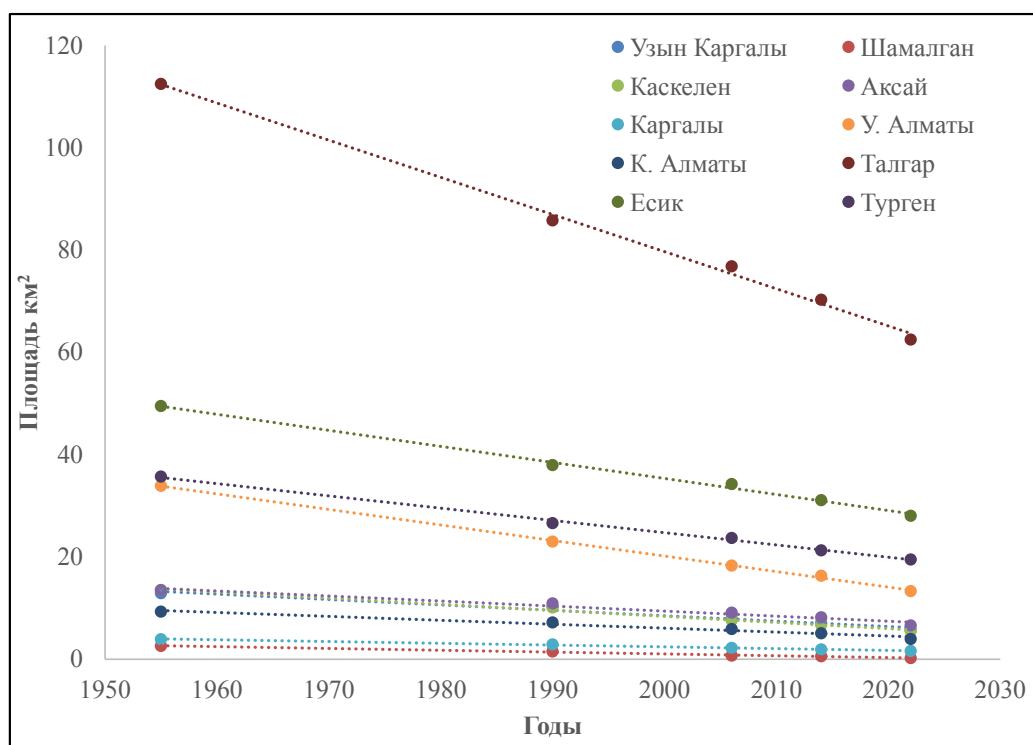


Рисунок 6 – Динамика сокращения оледенения по бассейнам (по данным первого Каталога и нашим исследованиям)

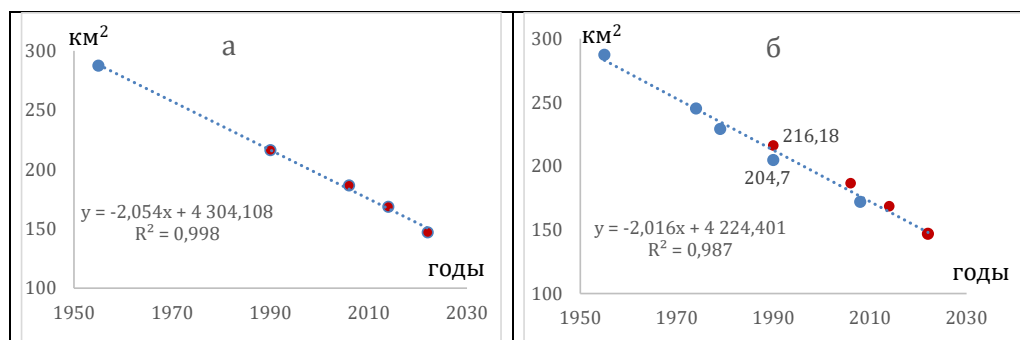


Рисунок 7 – Динамика оледенения северного склона Иле Алатау:
а) по данным 1955, 1990, 2006, 2014, 2022 гг., б) все каталоги

Заключение

Работы по мониторингу оледенения необходимо проводить на постоянной основе, совершенствуя методологические подходы дистанционных методов исследования, которые в совокупности с полевыми данными позволят грамотно подойти к оценке водных ресурсов в условиях изменения климата Казахстана. Полученные в данной работе результаты подтверждают сведения о продолжающемся сокращении оледенения Земли, что в условиях изменения климата может привести к дефициту пресной воды. Сокращение оледенения приведет к изменению годового стока. Сезонное распределение стока из гляциальной области, наблюдаемое в настоящее время в вегетационный

период, вероятно сместится на более ранние (весенние) месяцы.

Благодарность

Данная работа выполнена в рамках проекта ПЦФ Комитета науки МНВО Республики Казахстан «Ледниковые системы трансграничных бассейнов Центральной Азии: состояние, современные и прогнозные изменения, роль в обеспечении водной безопасности стран региона» ИРН BR 18574176, при участии Б. А. Мукановой, проходившей производственную практику в Центрально-Азиатском Региональном Гляциологическом Центре 2 категории под эгидой ЮНЕСКО (ЦАРГЦ).

Литература

1. Aizen, V., Kuzmichenok, V., Surazakov, A., & Aizen, E. (2006). Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 43: 202-213. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756406781812465>
2. Bolch T. (2007). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote-sensing data. *Global and Planetary Change*, 56(1–2): 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>
3. Bolch, T. and U. Kamp. (2006). Glacier Mapping in High Mountains Using DEMs, Landsat and ASTER Data. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*. Band 41: 37-48. DOI: <https://unipub.uni-graz.at/download/pdf/5992310.pdf>
4. Cogley, J. (2016). Glacier shrinkage across High Mountain Asia. *Annals of Glaciology*, 57(71), 41-49. DOI:10.3189/2016AoG71A040
5. Granshaw, F., & G. Fountain, A. (2006). Glacier change (1958–1998) in the North Cascades National Park Complex, Washington, USA. *Journal of Glaciology*, 52(177): 251-256. DOI:10.3189/172756506781828782
6. Hoelzle M., Barandun M., Bolch T., Fiddes J., Gafurov A., Muccione V., Saks T. & Shahgedanova M. The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia. In: *The Aral Sea Basin: Water for sustainable development in Central Asia*. Xenarios S., Schmidt-Vogt D., Qadir M., Janusz-Pawletta B. & Abduallev I. (eds.). Abingdon, Oxon: Routledge, 2020: 100–121. DOI:<https://doi.org/10.4324/9780429436475-8>
7. Li, B., Zhu, A., Zhang, Y., Pei, T., Qin, C., & Zhou, C. (2006). Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan. *Journal of Glaciology*, 52(178): 425-432. DOI:10.3189/172756506781828557
8. Liu, S., Ding, Y., Shangguan, D., Zhang, Y., Li, J., Han, H., ... Xie, C. (2006). Glacier retreat as a result of climate warming and increased precipitation in the Tarim river basin, northwest China. *Annals of Glaciology*, 43: 91-96. DOI:10.3189/172756406781812168
9. Narama, C., Shimamura, Y., Nakayama, D., & Abdrakhmatov, K. (2006). Recent changes of glacier coverage in the western Terskey-Alatau range, Kyrgyz Republic, using Corona and Landsat. *Annals of Glaciology*, 43: 223-229. DOI:10.3189/172756406781812195

10. Niederer P, Bilenko V, Ershova N, Hurni H, Yerokhin S and Maselli D. (2007). Tracing glacier wastage in the Northern Tien Shan (Kyrgyzstan/Central Asia) over the last 40 years. *Climate Change*, 86: 227–234. DOI:10.1007/s10584-007-9288-6
11. Paul, F., Barrand, N., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., . . . Winsvold, S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 54(63): 171-182. DOI:10.1016/j.rse.2017.08.038
12. Paul, F., Barry, R., Cogley, J., Frey, H., Haerberli, W., Ohmura, A., . . . Zemp, M. (2009). Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*, 50(53): 119-126. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756410790595778>
13. Racoviteanu, A., Paul, F., Raup, B., Khalsa, S., & Armstrong, R. (2009). Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: Results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology*, 50(53), 53-69. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756410790595804>
14. Severskiy, I., Vilesov, E., Armstrong, R., Kokarev, A., Kogutenko, L., Usmanova, Z., . . . Raup, B. (2016). Changes in glaciation of the Balkhash–Alakol basin, central Asia, over recent decades. *Annals of Glaciology*, 57(71): 382-394. DOI: <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A575>
15. Shangguan, D., Liu, S., Ding, Y., Ding, L., Xiong, L., Cai, D., . . . Zhang, Y. (2006). Monitoring the glacier changes in the Muztag Ata and Konggur mountains, east Pamirs, based on Chinese Glacier Inventory and recent satellite imagery. *Annals of Glaciology*, 43: 79-85. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756406781812393>
16. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M., Eds. (2013) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
17. Вилесов Е.Н., Макаревич К.Г., Поляков В.Г. (1993). Пространственно-временная изменчивость ледниковой системы Заилийского Алатау. Материалы гляциологических исследований, 76: 90–95.
18. Вилесов Е.Н., Уваров В.Н. Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX веке. Алматы, 2001. 252 с.
19. Восьмое национальное сообщение и пятый двухгодичный доклад Республики Казахстан Рамочной Конвенции ООН об изменении климата. Астана, 2022. 491 с. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/8NC_Kazakhstan_2022v1.0.pdf.
20. Ерисковская Л. Климатические условия ледника Туйыксу. Saarbücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 76 с.
21. Кокарев А.Л., Шестерова И.Н. (2011). Изменение ледниковых систем северного склона Заилийского Алатау во второй половине XX и начале XXI вв. Лед и снег, 4 (116): 39-46.
22. Котляков В.М. Ресурсы льда, сток с ледников и уровень Мирового океана /Достижения в области гидрометеорологии и контроля природной среды. Л.: Гидрометеоиздат. 1987. С. 280-305.
23. Муқанова Б.А. Оценка влияния деградации ледников Заилийского Алатау на экологическое состояние водных ресурсов Алматинской области. Дипломная работа. 2023. 55 с.
24. Пальгов Н.Н. Современное оледенение в Заилийском Алатау. Алма-Ата, 1958. 313 с.
25. Пивень Е.Н. Климат гляциально-нивальная зоны Юго-Восточного Казахстана, его современные изменения и возможное влияние на водные ресурсы региона / Географические проблемы устойчивого развития: теория и практика: Мат. межд. н-п конф. к 70-лет. ИГ АО ЦНЗМО РК 27-29 авг. 2008 г. Алматы, 2008. С. 112-123.
26. Ресурсы поверхностных вод СССР. Каталог ледников СССР. Т. 13. Центр. и Южный Казахстан. Вып. 2. Ч. 1. Составители – Вилесов Е.Н., Хонин Р.В. Бассейны левых притоков р. Или от устья р. Курты до устья р. Тургень. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 78 с.
27. Современное экологическое состояние бассейна озера Балхаш / Под ред. Т.Д. Кудекова. Алматы, 2002. 388с.
28. Черкасов П.А., Ерисковская Л.А., Каймулдаева К.М., Кусайнова Н.М., Путилина Н.М. Новый Каталог ледников Заилийско-Кунгейской ледниковой системы / Географические основы устойчивого развития Республики Казахстан. Алматы, 1998. С. 8–16.

References

1. Aizen, V., Kuzmichenok, V., Surazakov, A., & Aizen, E. (2006). Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 43: 202-213. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756406781812465>
2. Bolch T. (2007). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote-sensing data. *Global and Planetary Change*, 56(1–2): 1–12 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>
3. Bolch, T. and U. Kamp. (2006). Glacier Mapping in High Mountains Using DEMs, Landsat and ASTER Data. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*. Band 41: 37-48. DOI: <https://unipub.uni-graz.at/download/pdf/5992310.pdf>
4. Cherkasov P.A., Eriskovskaja L.A., Kajmuldaeva K.M., Kusainova N.M., Putilina N.M. Novyj Katalog lednikov Zailijsko-Kungejskoj lednikovoj sistemy [New Catalog of glaciers of the Zailiysko-Kungei glacial system] / Geograficheskie osnovy ustojchivogo razvitiya Respubliki Kazahstan. Almaty, 1998. P. 8–16. (In Russian)
5. Cogley, J. (2016). Glacier shrinkage across High Mountain Asia. *Annals of Glaciology*, 57(71), 41-49. DOI:10.3189/2016AoG71A040
6. Eriskovskaja L. Klimaticheskie usloviya lednika Tuiyksu. [Climatic conditions of the Tuuyksu glacier]. Saarbücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 76 p. (In Russian)

7. Granshaw, F., & G. Fountain, A. (2006). Glacier change (1958–1998) in the North Cascades National Park Complex, Washington, USA. *Journal of Glaciology*, 52(177): 251-256. DOI:10.3189/172756506781828782
8. Hoelzle M., Barandun M., Bolch T., Fiddes J., Gafurov A., Muccione V., Saks T. & Shahgedanova M. The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia. In: The Aral Sea Basin: Water for sustainable development in Central Asia. Xenarios S., Schmidt-Vogt D., Qadir M., Janusz-Pawletta B. & Abduallev I. (eds.). Abingdon, Oxon: Routledge, 2020: 100–121. DOI:https://doi.org/10.4324/9780429436475-8
9. Kokarev A.L., Shesterova I.N. (2011). Izmenenie lednikovyh sistem severnogo sklona Zailijskogo Alatau vo vtoroj polovine XX i nachale XXI vv. [Changes in the glacial systems of the northern slope of the Zailiysky Alatau in the second half of the 20th and early 21st centuries]. *Led i sneg*, 4 (116): 39-46. (In Russian)
10. Kotljakov V.M. Resursy l'da, stok s lednikov i uroven' Mirovogo okeana. [Ice resources, runoff from glaciers and the level of the World Ocean]/Dostizhenija v oblasti gidrometeorologii i kontrolja prirodnoj sredy. L.: Gidrometeoizdat. 1987.P. 280-305. (In Russian)
11. Li, B., Zhu, A., Zhang, Y., Pei, T., Qin, C., & Zhou, C. (2006). Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan. *Journal of Glaciology*, 52(178): 425-432. DOI:10.3189/172756506781828557
12. Liu, S., Ding, Y., Shangguan, D., Zhang, Y., Li, J., Han, H., . . . Xie, C. (2006). Glacier retreat as a result of climate warming and increased precipitation in the Tarim river basin, northwest China. *Annals of Glaciology*, 43: 91-96. DOI:10.3189/172756406781812168
13. Mukanova B.A. Ocenka vlijanija degradacii lednikov Zailijskogo Alatau na jekologicheskoe sostojanie vodnyh resursov Almatinskoj oblasti. [Assessment of the regional dynamics of glaciation degradation of the northern slope of the Ile Alatau and the impact of climate change on this process.] Diplomnaja rabota. 2023. 55 p. (In Russian)
14. Narama, C., Shimamura, Y., Nakayama, D., & Abdrakhmatov, K. (2006). Recent changes of glacier coverage in the western Terskey-Alatau range, Kyrgyz Republic, using Corona and Landsat. *Annals of Glaciology*, 43: 223-229. DOI:10.3189/172756406781812195
15. Niederer P, Bilenko V, Ershova N, Hurni H, Yerokhin S and Maselli D. (2007). Tracing glacier wastage in the Northern Tien Shan (Kyrgyzstan/Central Asia) over the last 40 years. *Climate Change*, 86: 227–234. DOI:10.1007/s10584-007-9288-6
16. Pal'gov N.N. Sovremennoe oledenenie v Zailijskom Alatau. [Modern glaciation in the Zailiyskiy Alatau]. Alma-Ata, 1958. 313 p. (In Russian)
17. Paul, F., Barrand, N., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., . . . Winsvold, S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 54(63): 171-182. DOI:10.1016/j.rse.2017.08.038
18. Paul, F., Barry, R., Cogley, J., Frey, H., Haeberli, W., Ohmura, A., . . . Zemp, M. (2009). Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*, 50(53): 119-126. DOI: https://doi.org/10.3189/172756410790595778
19. Piven' E.N. Klimat gl'cial'no-nival'noj zony Jugo-Vostochnogo Kazahstana, ego sovremennye izmenenija i vozmozhnoe vlijanie na vodnye resursy regiona. [The climate of the glacial-nival zone of South-Eastern Kazakhstan, its current changes and possible impact on the region's water resources] / Geograficheskie problemy ustojchivogo razvitija: teorija i praktika: Mat. mezhd. n-p konf. k 70-let. IG AO CNZMO RK 27-29 avg. 2008. Almaty, 2008. P. 112-123. (In Russian)
20. Racoviteanu, A., Paul, F., Raup, B., Khalsa, S., & Armstrong, R. (2009). Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: Results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology*, 50(53), 53-69. DOI: https://doi.org/10.3189/172756410790595804
21. Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Katalog lednikov SSSR. T. 13. Centr. i Juzhnyj Kazahstan. Vyp. 2. Ch. 1. Sostaviteli – Vilesov E.N., Honin R.V. Bassejny levyh pritokov r. Ili ot ust'ja r. Kurty do ust'ja r. Turgen'. [Resources of surface waters of the USSR. Catalog of glaciers of the USSR. T. 13. Center. and South Kazakhstan. Issue. 2. Part 1. Compilers - Vilesov E.N., Khonin R.V. Basins of the left tributaries of the river Ile from the mouth of the river Kurty to the mouth of the river Turgen]. L.: Gidrometeoizdat, 1967. 78 p. (In Russian)
22. Severskiy, I., Vilesov, E., Armstrong, R., Kokarev, A., Kogutenko, L., Usmanova, Z., . . . Raup, B. (2016). Changes in glaciation of the Balkhash–Alakol basin, central Asia, over recent decades. *Annals of Glaciology*, 57(71): 382-394. DOI: https://doi.org/10.3189/2016AoG71A575
23. Shangguan, D., Liu, S., Ding, Y., Ding, L., Xiong, L., Cai, D., . . . Zhang, Y. (2006). Monitoring the glacier changes in the Muztag Ata and Konggur mountains, east Pamirs, based on Chinese Glacier Inventory and recent satellite imagery. *Annals of Glaciology*, 43: 79-85. DOI: https://doi.org/10.3189/172756406781812393
24. Sovremennoe jekologicheskoe sostojanie bassejna ozera Balhash. [Current Ecological State of the Balkhash Lake Basin] / Pod red. T.D. Kudekova. Almaty, 2002. 388p. (In Russian)
25. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M., Eds. (2013) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
26. Vilesov E.N., Makarevich K.G., Poljakov V.G. (1993). Prostranstvenno-vremennaja izmenchivost' lednikovoj sistemy Zailijskogo Alatau. [Spatio-temporal variability of the glacial system of the Zailiyskiy Alatau]. *Materialy gl'ciologicheskikh issledovanij*, 76: 90–95. (In Russian)
27. Vilesov E.N., Uvarov V.N. Jevoljucija sovremennogo oledenenija Zailijskogo Alatau XX veke. [Evolution of modern glaciation of the Zailiyskiy Alatau in the 20th century]. Almaty, 2001. 252 p. (In Russian)

28. Vos'moe nacional'noe soobshhenie i pjatyj dvuhgodichnyj doklad Respubliki Kazahstan Ramochnoj Konvencii OON ob izmenenii klimata. [Eighth National Communication and Fifth Biennial Report of the Republic of Kazakhstan to the UN Framework Convention on Climate Change]. Astana, 2022. 491 p. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/8NC_Kazahstan_2022v1.0.pdf. (In Russian)

Сведения об авторах:

Северский Игорь Васильевич – академик НАН РК, доктор географических наук, профессор, ТОО «Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр (категории 2) под эгидой ЮНЕСКО» (г. Алматы Казахстан, эл.почта: iseverskiy@gmail.com)

Муканова Бэлла Алмасовна – студент кафедры ЮНЕСКО по устойчивому развитию, Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби; инженер ТОО «Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр (категории 2) под эгидой ЮНЕСКО» (г. Алматы Казахстан, эл.почта: bellamukanova8@gmail.com)

Капица Василий Петрович – СИС, ТОО «Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр (категории 2) под эгидой ЮНЕСКО» (г. Алматы Казахстан, эл.почта: vasil.geo@mail.ru)

Таткова Мария Евгеньевна (корреспондентный автор) – PhD-докторант кафедры Географии, землеустройства и кадастра, Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби; МНС ТОО «Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр (категории 2) под эгидой ЮНЕСКО» (г. Алматы Казахстан, эл.почта: tatkova_m@mail.ru)

Кокарев Александр Леонидович – кандидат географических наук, ВНС ТОО «Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр (категории 2) под эгидой ЮНЕСКО» (г. Алматы Казахстан, эл. почта: kokarev60@mail.ru)

Шестерова Ирина Николаевна – кандидат географических наук, ВНС ТОО «Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр (категории 2) под эгидой ЮНЕСКО» (г. Алматы Казахстан, эл.почта: irina_shesterova@mail.ru)

Information about authors:

Severskiy Igor – Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Doctor of Geographical Sciences, Professor, LLP “Central Asian Regional Glaciological Centre (category 2) under the auspices of UNESCO” (Almaty Kazakhstan, email: iseverskiy@gmail.com)

Mukanova Bella – student on the UNESCO Chair in Sustainable Development, Al-Farabi Kazakh National University; engineer, LLP «Central Asian Regional Glaciological Centre (category 2) under the auspices of UNESCO» (Almaty Kazakhstan, e-mail: bellamukanova8@gmail.com)

Kapitsa Vassiliy – Senior Researcher, LLP “Central Asian Regional Glaciological Centre (category 2) under the auspices of UNESCO” (Almaty Kazakhstan, e-mail: vasil.geo@mail.ru)

Tatkova Mariya (corresponding author) – PhD- student, Department of Geography, Land Management and Cadastre, Al-Farabi Kazakh National University; Junior researcher ,LLP «Central Asian Regional Glaciological Centre (category 2) under the auspices of UNESCO» (Almaty Kazakhstan, e-mail: tatkova_m@mail.ru)

Kokarev Alexander – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, LLP “Central Asian Regional Glaciological Centre (category 2) under the auspices of UNESCO” (Almaty Kazakhstan, email: kokarev60@mail.ru)

Shesterova Irina – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, LLP “Central Asian Regional Glaciological Centre (category 2) under the auspices of UNESCO” (Almaty Kazakhstan, email: irina_shesterova@mail.ru)

Поступила: 26 июня 2023 года

Повторна загружена: 18 января 2024 года

Принята: 10 мая 2024 года