

Мониторинг и изучение изменений границ и площади репрезентативных ледников Кыргызстана на основе результатов дешифрирования спутниковых снимков

А. Мандычев, Р. Усубалиев, Р. Кенжебаев, Э. Азисов, М. Есенаман

Для изучения изменения ледников широко используется дистанционный метод, который позволяет анализировать изменения границ и площади ледников по данным спутниковых снимков, на всей территории Кыргызстана. В результате, возможно, достаточно объективно, оценить общую многолетнюю тенденцию пространственного изменения ледников и выполнять их инвентаризацию.

В этом аспекте, на протяжении многолетнего периода, выполнялся анализ спутниковых снимков и результатов аэрофотосъемки с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА), репрезентативных ледников Кыргызстана, которые в данной статье представлены ледниками: Абрамова, Голубина, Петрова, Карабаткак, Западный Суек, № 354, №185, №120, №122, №282, №66 (рис.1), номера этих ледников приведены по Каталогу ледников Кыргызстана [1].

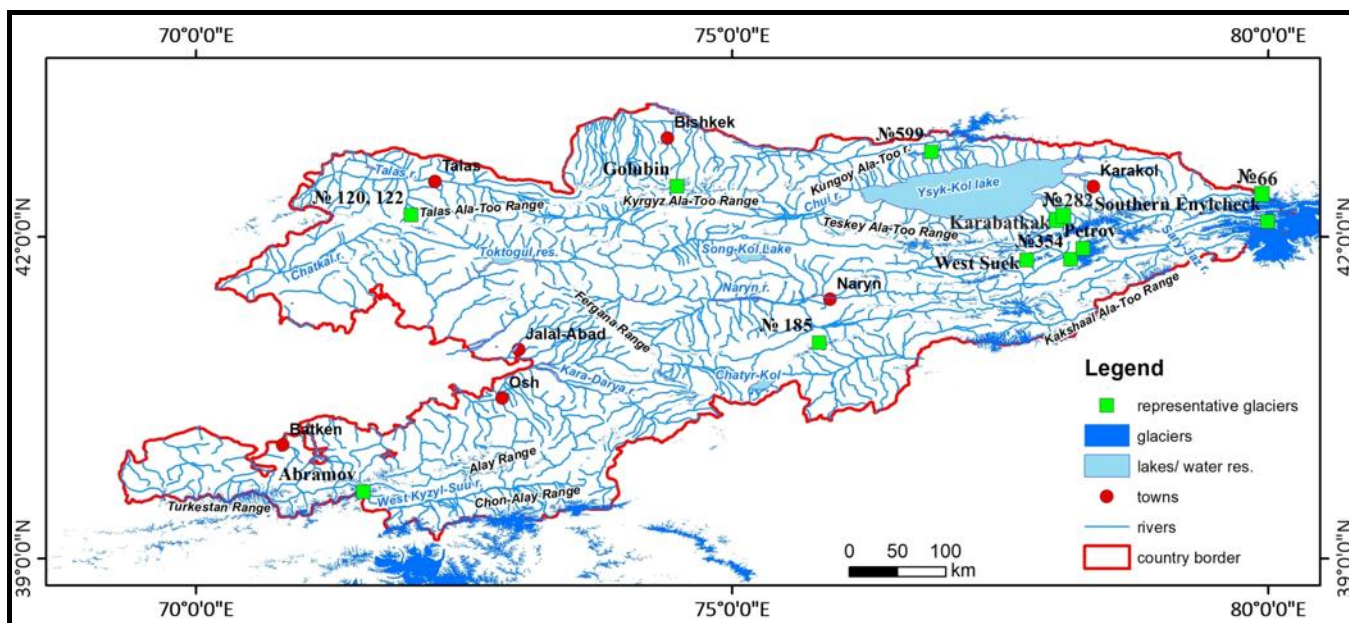


Рис.1 Расположение репрезентативных ледников Кыргызстана.

Для анализа изменения границ ледников использовались, в основном, оптические снимки спутников «Landsat 8,9», «Hexagon KH9», «CORONA KH-4B» (USGS EROS Archive), «Sentinel 2A,2B» (ESA, Copernicus Data Space Ecosystem), «PlanetScope» (Planet Labs, Inc.) с разрешением, соответственно, 15; 6 – 9; 1,8; 10; 3 м/ пиксель. Большинство снимков имеет стандартную геопривязку и коррекцию, включающую радиометрическую калибровку, геометрическую коррекцию и орторектификацию от производителя, это, в частности, продукты «L1T» «Landsat 8,9» и «L1C, L2A» «Sentinel 2A,2B». Для улучшения дешифрирования использовались различные комбинации спектральных каналов снимков. Точность дешифрирования в основном зависит от величины разрешения спутниковых снимков, для спутников «Sentinel 2A,2B», «Landsat 8,9», она, соответственно, составляет максимум 10 и 15 м., а точность геопривязки находится в диапазоне 10 - 30 м. Для спутниковых снимков без исходной геопривязки («Hexagon», «CORONA»), геопозиционирование выполнялось путем корегистрации по геопривязанным снимкам, по характерным, стабильным опорным точкам рельефа. Периодичность съемки, для рассматриваемого региона, спутников «Landsat 8,9» - 16 дней, со сдвигом относительно друг друга - 8 дней, «Sentinel 2A, 2B» - 10 дней, со сдвигом 5 дней. Дешифрирование выполнялось с помощью ГИС «MapInfo», «ArcGIS», «GlobalMapper» и других программ.

Изменение ледника Абрамова, расположенного на северном склоне Алайского хребта, за период с 1850 по 2014 годы, было ранее рассмотрено в публикации [2], где было установлено, что средняя скорость сокращения площади ледника за 164 года составила $0,02 \text{ км}^2/\text{год}$, при общем сокращении на $3,65 \text{ км}^2$, или на 14%. За этот же период времени длина ледника уменьшилась приблизительно на 2950 м., со средней скоростью порядка 18.1 м/год (рис.2). Анализ изменения ледника Абрамова за период 2013-2023 гг. выполнен на основе дешифрирования снимков спутников «PlanetScope» от 13/08/2018, 18/07/2022 г., «Sentinel 2» от 13/08/2019, 15/09/2020, 25/07/2021, 21/08/2023 г., «Landsat 8» от 12/09/2013, 30/08/2014, 17/08/2015, 3/08/2016, 9/07/2017, 25/08/2018 г., имеющих разрешение, соответственно 3, 10, 15 м/пиксель. Границы ледника на рисунке 2 проведены с интервалом 1 год. Ошибка дешифрирования и геопривязки составляла около 10-15 м. Уточнение границы языка ледника в 2013 г. было выполнено с помощью наземной GPS-съемки. Уточнение границы языка ледника на 23/08/2022 г., было осуществлено на основе аэрофотосъемки, с разрешением 0,05 м/пиксель, с помощью БПЛА и построения цифровой модели рельефа (DEM) конца языка ледника. Анализ изменения площади ледника Абрамова за период с 2013 по 2023 год, показал, что площадь языка ледника Абрамова сократилась на $0,177 \text{ км}^2$, а средняя скорость сокращения составила $0,017 \text{ км}^2/\text{год}$. Максимальное неравномерное линейное сокращение длины ледника составило около 230 м, со скоростью 23 м/год.

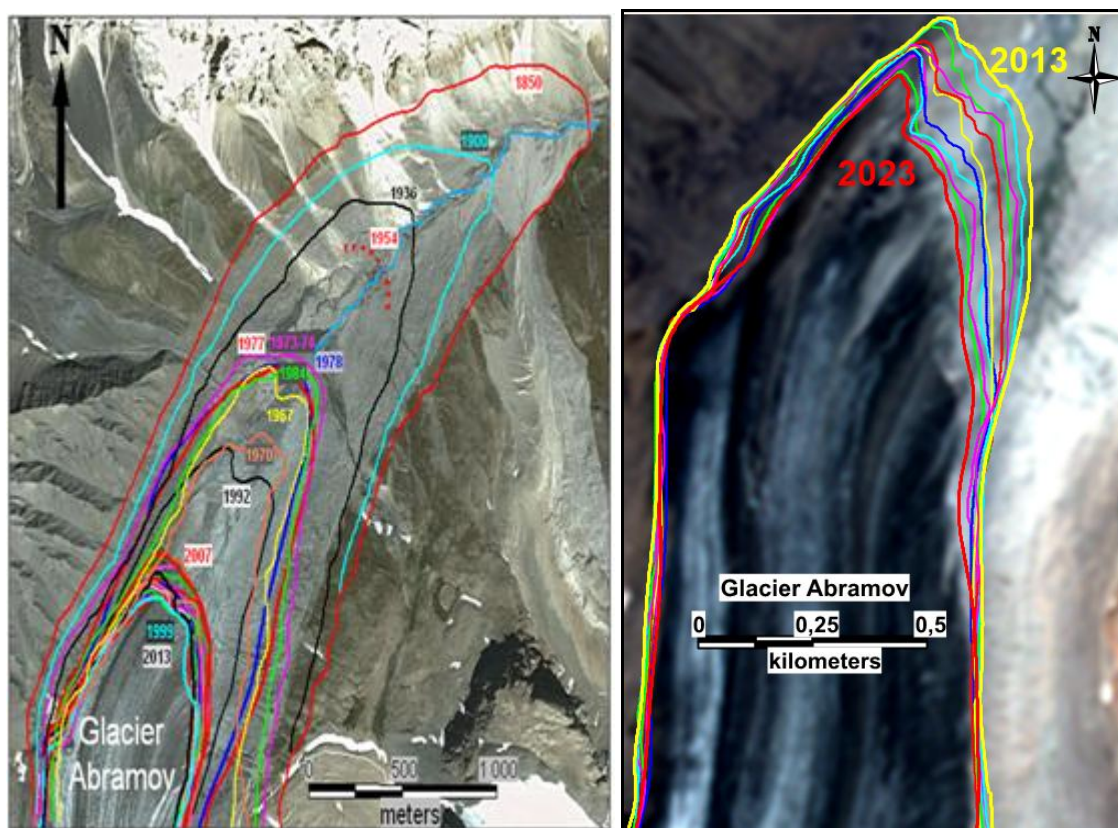


Рис. 2 Границы языка ледника Абрамова с 1850 по 2023 гг.
Фонем рисунков являются снимок спутника «Geo Eye 1» от 2007 г., слева и «Sentinel 2» от 2023 г., справа.

Таким образом, скорость сокращения ледника Абрамова за период 2013-2023 гг. имеет близкое значение к ранее полученной оценке за период с 1850 по 2013 год. Общее сокращение площади ледника с 1850 по 2023 год составило 14,5%. В настоящее время процесс деградации ледника Абрамова продолжается без значительных отклонений от средней скорости сокращения площади ледника. За последнее десятилетие на леднике не наблюдались наступательные подвижки (пульсации), аналогичные происходившим ранее, в 1972-1973 и 2001-2005 годах.

Анализ изменения ледника Петрова, расположенного в массиве Ак-Шийрак, выполнен с использованием данных Кузмиченка В.А.[3], а так же, на основе дешифрирования снимков спутников: «Hexagon KH9 » от 21/08/1980 г., с разрешением 6-9 м/пиксель, «Quick Bird» от 4/10/2002 г., « Spot 5 » от 22/08/2007г., «Landsat 8» от 2013г., с разрешениями соответственно 2, 3, 15 м/пиксель, «PlanetScope» от -/08/2018 г., с разрешением 3 м/пиксель и «Sentinel 2» от 15/08/2023г. с разрешением 10 м/пиксель, при ошибке дешифрирования и геопривязки порядка 15 м.. На рисунке 3 показаны границы языка ледника Петрова с 1869 по 2023г.. Сокращение площади за 154 года, произошло на 6,86 км², или на 10,2%, скорость сокращения площади 0,045 км²/год. Максимальное линейное отступление - 3300 м, при скорости 21,4 м/год. Особенностью ледника Петрова является разгрузка северного ледового потока непосредственно в одноименное приледниковое озеро, что способствует ускорению движения потока льда. Как и для всех ледников, для ледника Петрова основное сокращение площади происходит в концевой части языка ледника и в меньшей степени в боковых частях языка, в пределах зоны абляции. В зоне аккумуляции, боковые границы остаются практически постоянными в течение десятков лет.

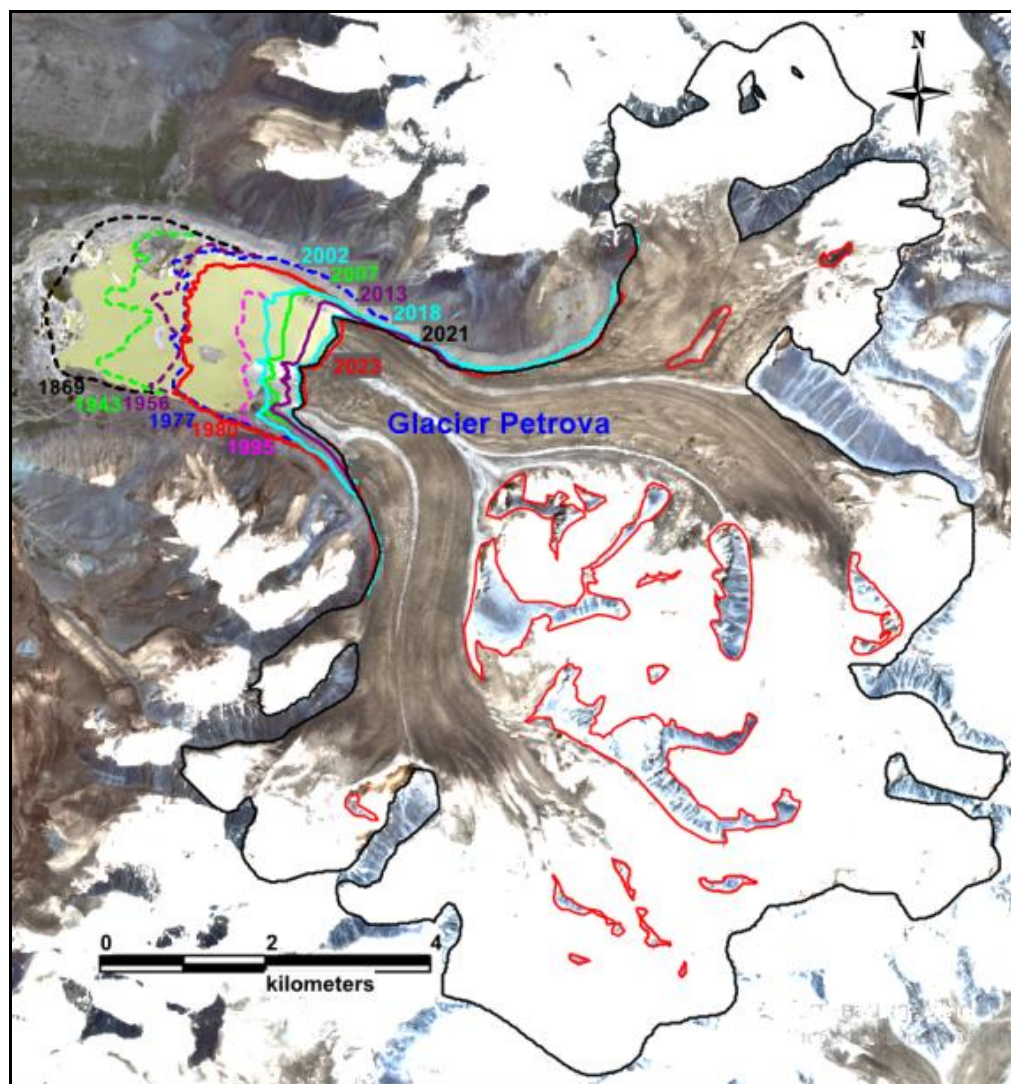


Рис. 3 Границы ледника Петрова с 1869 по 2023г.. Пунктирные границы - по данным Кузмиченка В.А., сплошные границы получены при дешифрировании спутниковых снимков. Границы выхода на поверхность скальных пород (красные контуры) на леднике показаны по состоянию на 2023г. Фоном является снимок спутника «Sentinel 2» от 2023г.

Анализ изменения границ ледников №120 и №122 (рис.4), расположенных в Таласском хребте, выполнен по спутниковому снимку от 18/08/1968 г., спутниковой системы «CORONA, миссии КН-4В», с разрешением около 1,8 м/пиксель, снимка спутника «Sentinel 2» от 21/08/2023 г. с разрешением 10 м/пиксель, а так же снимка спутника «GeoEye-1» от 15/08/2015 г. с разрешением 1,65 м/пиксель. Ошибка дешифрирования и геопривязки составляла около 10 м. Изменение площади ледников №120,122 за период 55 лет показано в таблице 1. Как видно из таблицы скорость сокращения площади рассматриваемых ледников за период с 1968 по 2023 гг. находится в диапазоне 0,003-0,012 км²/год.

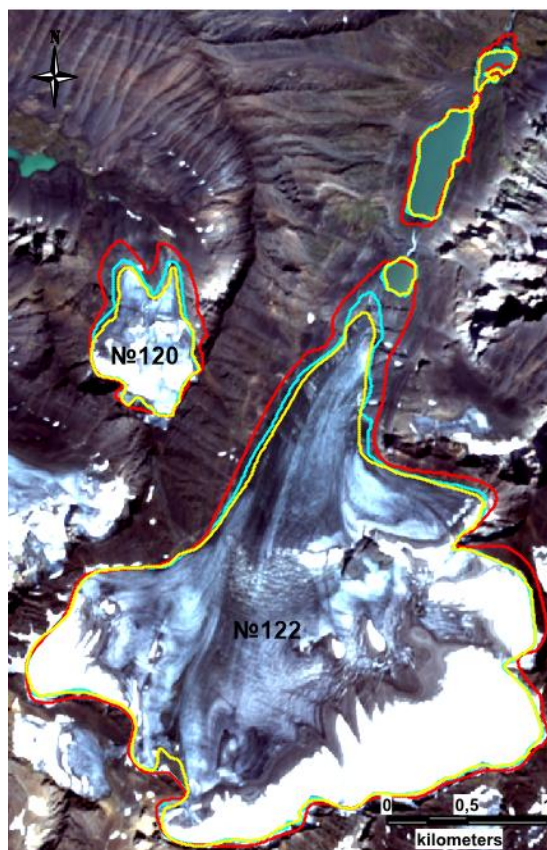


Рис. 4 Границы ледников №120 и №122 в 1968 г.(красная), в 2015 г.(голубая), в 2023г. (желтая) и границы приледниковых озер в эти же годы, по спутниковым снимкам. Фоном рисунка является снимок спутника «Sentinel 2» от 2023г.

В данном случае, обращает на себя внимание относительно небольшая абсолютная скорость сокращения площади ледников и зависимость относительной величины сокращения площади, выраженной в процентах, от размеров ледника. Максимальное линейное отступление, с 1968 по 2023 год, составило для ледника №120 около 170 м, а для №122 около 410 м при скоростях, соответственно, 3,1 и 7,5 м/год.

Таблица 1

№ ледника	Площадь ледника (км ²)			Сокращение площади, км ² 1968-2023г.	Скорость сокращения площади км ² /год	% сокращения площади
	1968г.	2015г.	2023г.			
120	0,56	0,42	0,38	0,18	0,003	32
122	5,9	5,42	5,26	0,64	0,012	11

Самое большое приледниковое озеро, расположенное севернее ледника №122, с площадью $0,19 \text{ км}^2$, имеет, практически, постоянную площадь, начиная с 1968 г.. Небольшое озеро, расположенное южнее, ближе к концу языка ледника, площадью порядка $0,034 \text{ км}^2$, образовалось при отступании края ледника после 1968 г.. Оно, так же имеет стабильную площадь, за счет формирования озерной впадины и озерной плотины на скальных породах.

Результат анализа изменения площади ледника №185, расположенного на северном склоне Атбашинского хребта, за период с 1968 по 2023 год показан на рисунке 5. Границы ледника определялись по дешифрированию снимков спутников: «CORONA KH-4B» от 19/08/1968 г., «QuickBird» от 21/09/2002 г., «Pleades» от 27/07/2013 г. и «Sentinel 2» от 13/08/2023г. с разрешением, соответственно, 1,8; 0,6; 0,7; 10 м/пиксель. Ошибка дешифрирования и геопривязки составляла около 10 м. По результатам анализа спутниковых снимков определено, что площадь ледника № 185, в 1968 г. составляла $0,44 \text{ км}^2$, а в 2023г. уменьшилась на $0,1 \text{ км}^2$ (23%), до $0,34 \text{ км}^2$. Скорость сокращения площади за 55 лет была около $0,002 \text{ км}^2/\text{год}$, при линейном отступании конца языка ледника на расстояние порядка 200 м, со скоростью 3,6 м/год. В этом случае, скорость сокращения площади близка к таковой у рассмотренного выше ледника № 120, расположенного в Таласском хребте и имеющего аналогичную общую площадь ледника. Приледниковое озеро, образованное при отступании языка ледника, имеет в последующие, после 2002-го, годы, относительно стабильную площадь около $0,03 \text{ км}^2$.

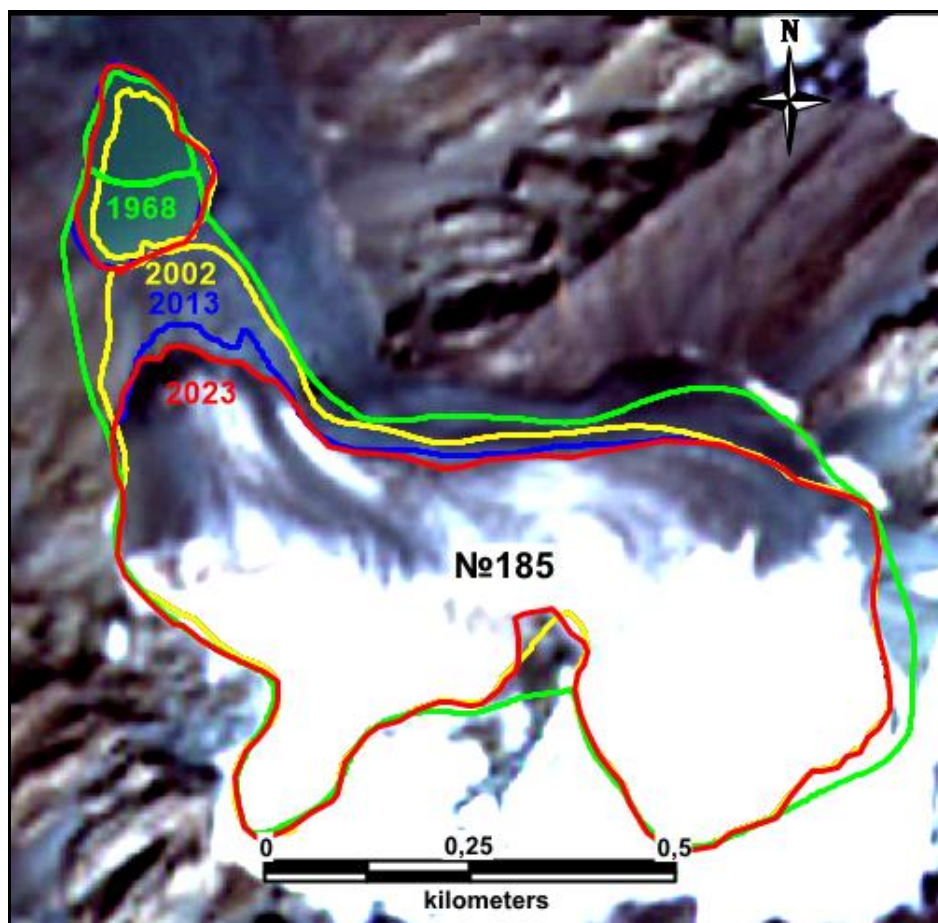


Рис. 5 Изменение площади ледника №185 с 1968 по 2023 год. Фоном рисунка является снимок спутника «Sentinel 2» от 2023г.

Изменение площади ледника Голубина, расположенного на северном склоне Кыргызского хребта, за период с 1861 по 2023 гг., показано на рисунке 6. В этом случае, границы языка ледника в 1861, 1949 и 1963 годах показаны по информации из статьи Айзена В.Б. и др. [3], другие границы получены путем дешифрирования снимков спутников: «Quick Bird» от 24/07/ 2006 г. с разрешением около 1м/пиксель, «Landsat 8» от 07/10/2013г. с разрешением 15 м/пиксель, «Planet Scope» от 15/07/2022 г. с разрешением 3 м/пиксель и «Sentinel 2» от 10/09/2023г. с разрешением 10 м/пиксель. Граница конца языка ледника в 2013 г. уточнена в процессе полевых исследований путем трассирования с помощью GPS приемника. Максимальная точность дешифрирования и геопривязки около 15м. При общей площади ледника на 1861 год, равной 6,05 км², сокращение площади в 2023 г. составило 0,485 км² или 8%, средняя скорость сокращения площади за 162 года оценивается в 0,003 км²/год. За период с 2013 по 2023 г. площадь сократилась на 0,03км² при скорости сокращения 0,003 км²/год. Линейное сокращение языка ледника с 1861 по 2023 год составило 839 м, со скоростью 5,2 м/год.

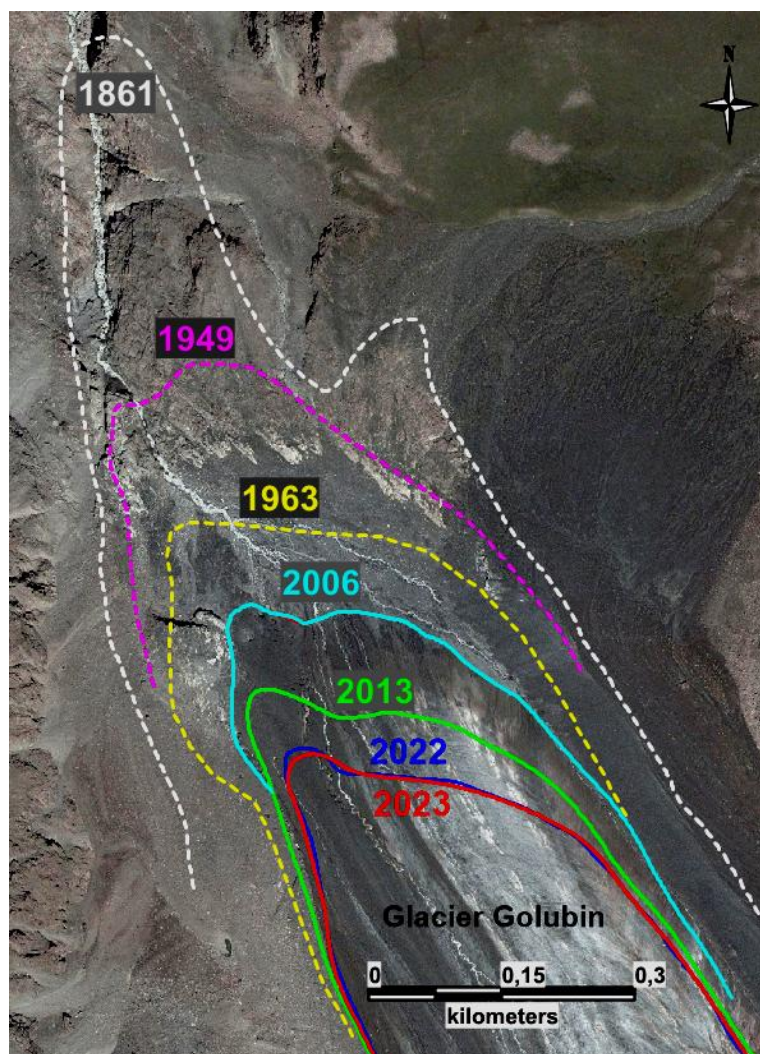


Рис. 6 Изменение границы языка ледника Голубина за 1861-2023 годы. Фоном является снимок спутника «Quick Bird» от 24/07/ 2006 г..

Изменение ледника Западный Суек (№419), расположенного на северном склоне хребта Суек, по результатам анализа спутниковых снимков, показано на рисунке 7. Здесь, границы ледника Западный Суек, с 1980 по 2023 гг., определены по данным спутников: «Hexagon KH9» от 1980 г., с разрешением 4 м/пиксель, «Sentinel 2» от 11/08/2019, 14/09/2020, 24/09/2021, 04/09/2022 и 15/08/2023г., с разрешением 10 м/пиксель, в комбинации

спектральных каналов В11, В8А, В02. Точность по геопозиционированию снимков, а так же по дешифрированию и трассированию границ ледников, порядка 10-20 метров. В этом случае, сокращения площади ледника с 1980 по 2023 гг. составило 0,26 км², а скорость сокращения площади ледника была 0,006 км²/год. Максимальное линейное отступление конца языка ледника за этот же период составило 340 м при средней скорости около 8 м/год. В целом, сокращение площади ледника Западный Суек (№419) с 1980 по 2023 год составило 19 %. Таким образом, в 2023 году продолжается неравномерное отступление, в основном в зоне абляции, края языка ледника Западный Суек.

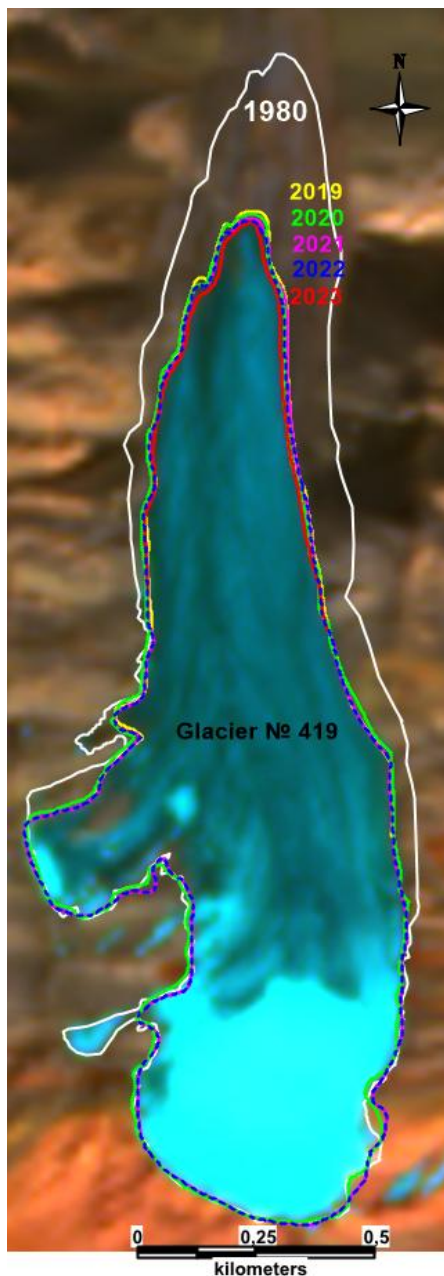


Рис. 7 Положение границ ледника Западный Суек (№419) в период с 1980 по 2023 год по снимкам спутника «Sentinel 2» полученным в 2019-2023 гг. и по данным спутника «Hexagon KH9» от 1980 г.. Фоном является снимок спутника «Sentinel 2» от 2023г.

Аналогично был выполнен анализ изменения границ ледника №354, расположенного в массиве Ак-Шийрак. На рисунке 8 показано положение границ ледника с 1980 по 2023 год по результатам дешифрирования снимков спутников: «Hexagon KH9» от 1980 г., с разрешением 4 м/пиксель, «Sentinel 2» от 11/08/2019, 21/07/2020, 19/09/2021, 26/07/2022,

15/08/2023 г., имеющих разрешение 10 м/пиксель. Ошибка геопозиционирования снимков и определения границ ледника порядка 10-20 метров. Сокращение площади ледника с 1980 по 2023 год составило 0,59 км² или 8,7%, средняя скорость уменьшения площади ледника в рассматриваемый период порядка 0,01 км²/год, при общем линейном отступании 585 м и средней скорости отступания 13,6 м/год.

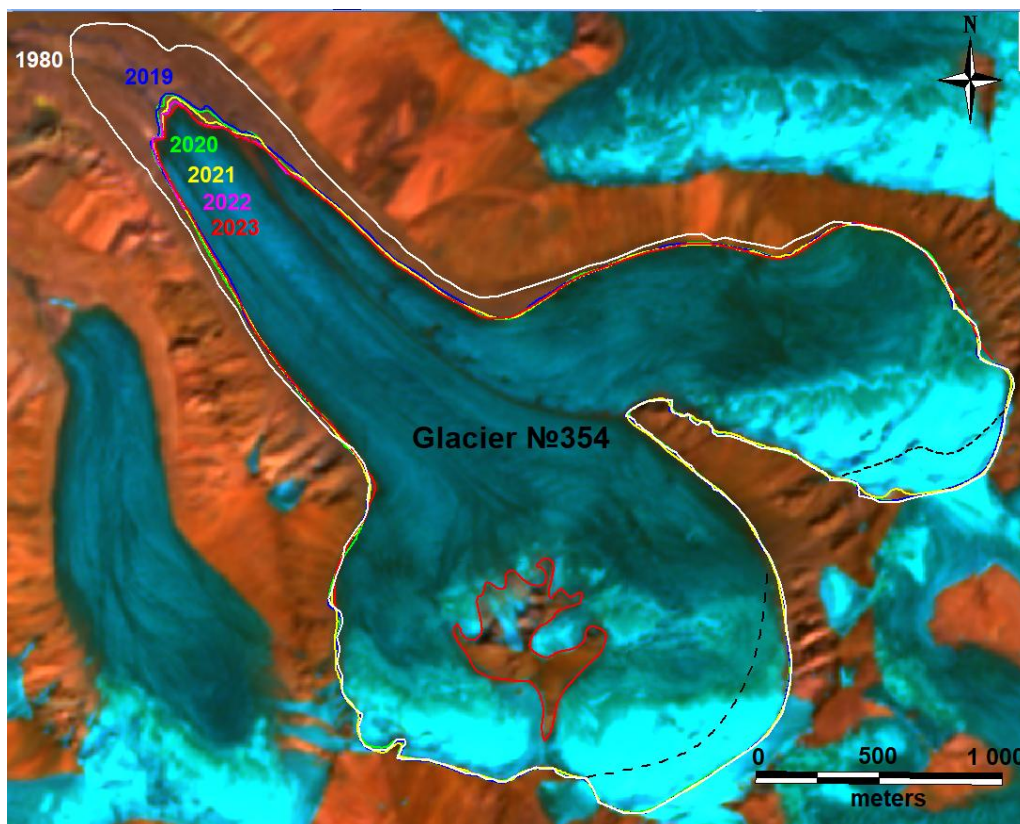


Рис. 8 Границы ледника №354 с 1980 г. по 2023 г.. Черная пунктирная линия – бергшруд. Граница выхода на поверхность скальных пород (красный контур) на леднике показана по состоянию на 2023г.. Фоном является снимок спутника «Sentinel 2» от 2023г..

Наблюдения за изменением ледника Карабаткак имеют длительную историю и отдельные моменты изменения его границы показаны на рисунке 9. Здесь, в частности, показана граница ледника в 1947 году по результатам фототеодолитной съемки масштаба 1:10000, выполненной Северо-Киргизской Экспедицией Института географии АН СССР. Как видно на рисунке, ледник в 1947 году занимал значительную площадь, которая впоследствии сокращалась по мере отступания нижней и боковых границ языка ледника. На рисунке 9 видно, что по результатам дешифрирования спутниковых снимков спутников: «Quick Bird» от 4/10/2002 г., «Pleiades» от 25/09/2013 и 07/11/2016 года, с разрешением 0,5 м/пиксель, а также снимков спутников «PlanetScore» от 09/2018 г. и «Sentinel 2» от 05/08/2023 г., с разрешением, соответственно, 3 и 10 м/пиксель, при ошибке геопозиционирования снимков и определения границ ледника порядка 10 метров, наблюдается продолжение многолетней тенденции сокращения площади ледника Карабаткак. Специфической чертой этого ледника является наличие, кроме центральной его части, свободной от моренного покрова, больших участков ледника покрытых боковыми моренами не позволяющими определить боковые границы языка ледника. По этой причине, в данном случае, определено лишь линейное изменение языка ледника Карабаткак. Так, с 1947 по 2023г. длина языка ледника сократилась на 970 м, а скорость линейного сокращения

за 76 лет составила 12,7м/год. За период с 2002 по 2023 г сокращение достигло 200м и в течение 21 года, средняя скорость сокращения была 9,5 м/год.

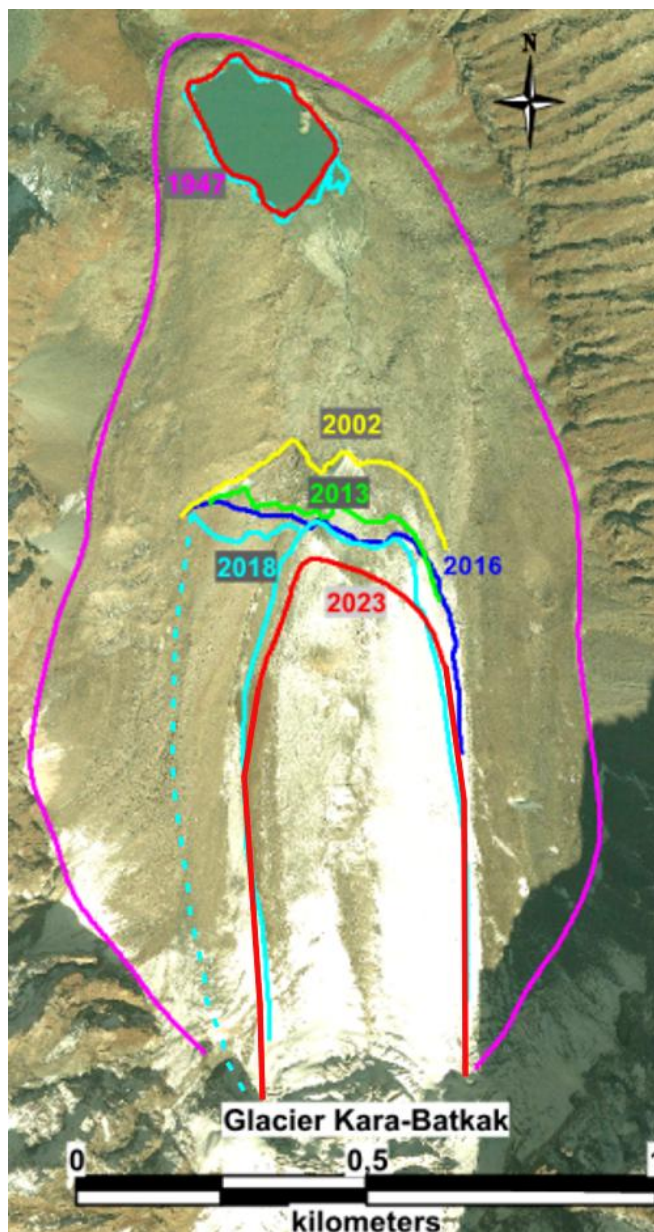


Рис.9 Изменение позиции края языка ледника Карабаткак с 1947 по 2023 г..

Пунктиром показана вероятная западная граница ледника.

Фоном является снимок спутника «Quick Bird» от 2002 г..

С целью уточнения характера изменения ледников в районе ледника Карабаткак, был использован ледник №282 (рис. 10), расположенный так же на северном склоне Терской хребта, в 7,4 км восточнее ледника Карабаткак. Он выбран, как аналог последнего, поскольку более удобен для дистанционного анализа изменений из-за свободного от моренных отложений языка ледника, в отличие от ледника Карабаткак, который в значительной степени перекрыт моренными отложениями, затрудняющими определение границ его языка. Границы ледника №282 определены при дешифрировании снимков спутников: «CORONA, KH-4B» от 23/09/1971г., «Pleiades» от 25/09/2013г. и «Sentinel 2» от 10/08/2023г. с разрешением соответственно 1,8; 0,5 и 10 м/пиксель и ошибкой геопозиционирования снимков и определения границ ледника порядка 10 метров. При общей площади ледника №282 в 1971г. равной 3,75 км², сокращение площади к 2023 году, за 52 года, составило 0,35 км² или 9,3%, при средней скорости сокращения площади

0,007 км²/год. Линейное сокращение языка ледника за этот же период составило 870 м, при скорости линейного сокращения 16,7м/год.

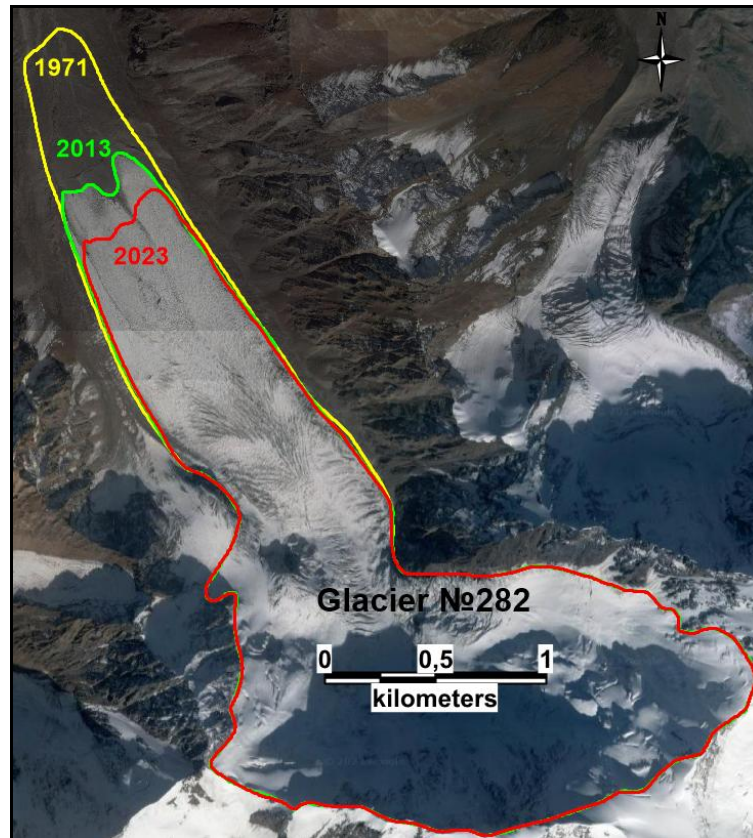


Рис.10 Изменение границ языка ледника №282 с 1971 по 2023 г..
Фоном является снимок спутника «Pleiades» от 2013 г..

Ледник №66 расположен в восточной части Кыргызстана, на северном склоне гор Адыртор, по южному борту долины реки Сары-Джаз. Анализ его изменения выполнен для периода 1984-2023гг. Для дешифрирования использовались снимки спутников: «Hexagon, КН-9» от 17/08/1984 г., «QuickBird-2» от 11/09/2005 г., «Landsat 8» от 25/09/2013, 01/09/2016 г., «Landsat 9» от 22/10/2023 г. с разрешением, соответственно, 1,2; 0,6 и 15м/пиксель, при ошибке геопозиционирования снимков и определения границ ледника порядка 15 метров. При общей площади ледника №66 в 1984г. равной 8,46 км², сокращение площади к 2023 году, за 39 лет, составило 0,59 км² или 7%, при средней скорости сокращения площади 0,015 км²/год. Линейное сокращение языка ледника за этот же период составило 630м, при скорости линейного сокращения 16,2 м/год..

В таблице 2 приведены некоторые основные параметры рассмотренных ледников. В целом, скорость сокращения площади рассмотренных выше ледников за многолетний период находится в двух диапазонах: 0,002 - 0,007 км²/год и на порядок больше 0,01-0,045 км²/год. Максимальные скорости сокращения, при прочих близких параметрах, характерны для ледников с большой площадью ледника. Кроме этого, вариации скорости сокращения площади ледника зависят от экспозиции, особенностей рельефа в месте их расположения, обеспечивающих характер и степень затенения, уклона поверхности ледника, абсолютной отметки конца языка, степени покрытия моренами, от характера питания атмосферными осадками и интенсивности абляции. У ледника Карабаткак, для которого рассмотрена только линейная скорость сокращения языка, последняя близка к скорости

сокращения языков всех остальных рассмотренных ледников, что указывает на сходство процесса сокращения ледников Кыргызстана, при наличии и индивидуальных особенностей.

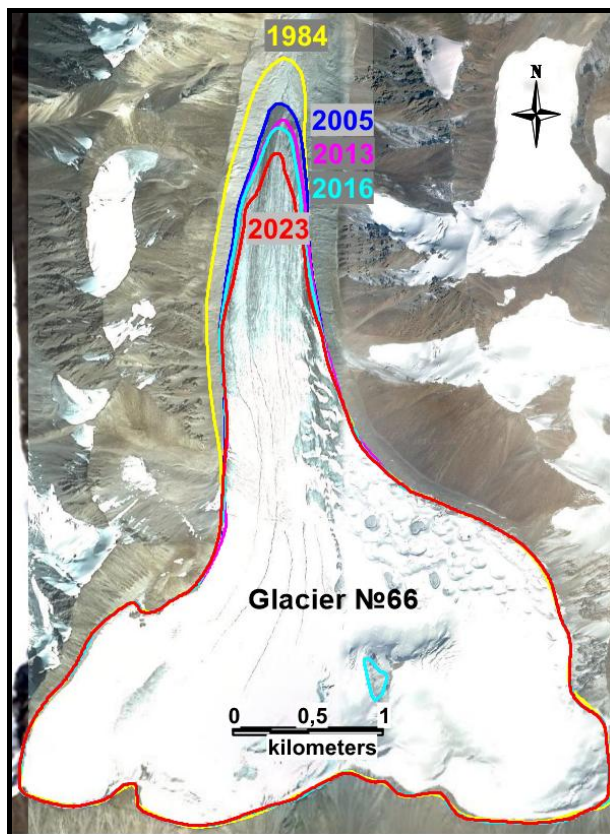


Рис. 11 Изменение границ языка ледника № 66 с 1984 по 2023 г..
Фоном является снимок спутника «QuickBird-2» от 2005 г..

Таблица 2

№ ледника, название	Экспозиция	Альтитуда конца языка на 2023 г (м)	Площадь ледника на 2023 г (км ²)	Сокращение площади ледника (км ²)	Скорость сокращения площади ледника (км ² /год)	Скорость линейного сокращения ледника (м/год)	% Сокращения площади	Период сокращения (годы)
№40, Абрамова	С	~3690	22,6	3,81	0,02	~18,3	14,5	1850-2023
№368 Петрова	С-З	~3840	60,4	6,86	0,045	~21,4	10,2	1869-2023
№120	С	~3520-3550	0,38	0,18	0,003	~3,1	32	1968-2023
№122	С-В	~3290	5,26	0,64	0,01	~7,5	11	1968-2023
№185	С-З	~3880	0,44	0,1	0,002	~3,6	23	1968-2023
№250 Голубина	С-З	~3400	5,57	0,49	0,003	~5,2	8	1861-2023
№419 Западный Суек	С	~4005	1,37	0,26	0,006	~8,0	19	1980-2023
№354	С-З	~3870	6,78	0,59	0,01	~13,6	8,7	1980-2023
№265 Карабаткак	С	~3385	2,3? по чистому льду	-	-	~12,7	-	1947-2023
№282	С-З	~3500	3,4	0,35	0,007	~16,7	9,3	1971-2023
№66	С	~3670	7,87	0,59	0,015	~16,2	7	1984-2023

Сходство процесса сокращения площади различных ледников Кыргызстана, видно на примере ледников №120 и 185, а так же № 354 и 66, имеющих близкие параметры и расположенных на значительном расстоянии друг от друга. При этом, скорость сокращения площади небольших ледников меньше, чем больших. Приблизительный вариант этой зависимости, по данным из таблицы 2, показан на рисунке 12.

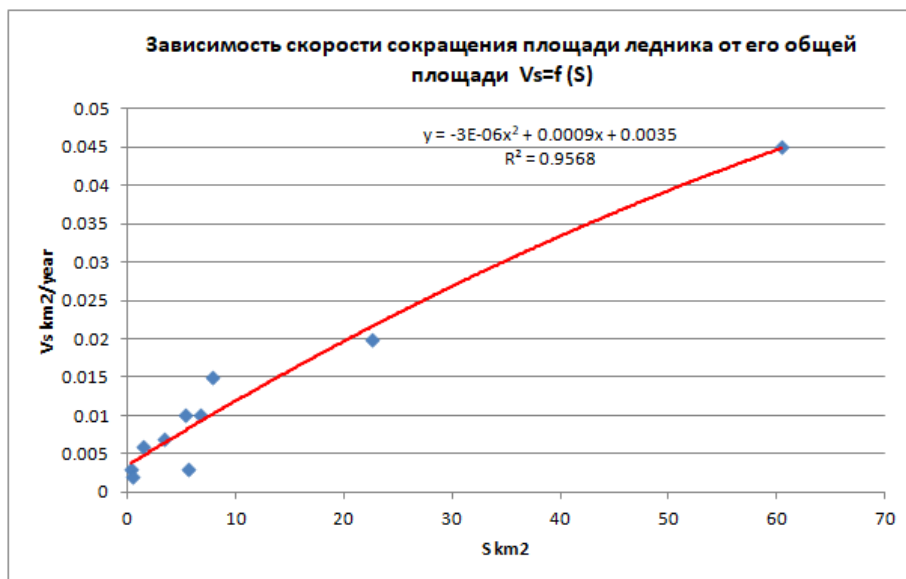


Рис.12

Необходимо отметить, что оценка сокращения ледников по линейному отступанию конца ледника, в рассмотренных выше случаях, имеет приблизительный характер и дает лишь общее представление о масштабах отступления ледника. Это связано с неравномерностью отступления края языков ледников по его периметру, как во фронтальной части, так и в боковых частях. По этой причине, наиболее объективную характеристику отступления, дает оценка изменения площади языка ледника, учитывающая все особенности его конфигурации. Использование параметра скорости изменения площади ледника, позволяет объективно сравнивать не только разные по площади ледники, но и их изменения за различные периоды времени. Относительно процентной оценки изменения, необходимо учитывать, что сравнение этих величин у разных ледников является некорректным в случае разницы их площадей и различных величин временных интервалов, используемых для оценки изменения площади ледников. Это видно по зависимости величины процентной оценки сокращения от величины площади ледника. Она, как видно, из таблицы 2, всегда меньше для крупных ледников и больше для небольших ледников.

Результаты дешифрирования спутниковых снимков, рассмотренных выше ледников, показывают, что в 2023 году продолжается их неравномерное отступление, за счет вариации интенсивности таяния, в основном, в зоне абляции, в пределах конца языка ледников. Эта тенденция наблюдается у всех без исключения ледников Кыргызстана, за счет продолжающегося глобального потепления и подъема вверх среднегодовой нулевой изотермы воздуха с начала 20-го века приблизительно на 100 -150 м. По оценке скорости сокращения общей площади всех ледников, приведенной в публикации [1], порядка 0,2%/ год, или, приблизительно, 16 км²/год, сокращение площади ледников Кыргызстана, в случае сохранения современного тренда потепления, может достигнуть около 30% к 2100 году.

Литература

1. Каталог ледников Кыргызстана. Редакция 01/2024. ЦАИИЗ. 709 с. Цифровой ресурс:
http://caiaag.kg/images/2%20Department/2022/Catalogue_of_glaciers_Kyrgyzstan_2018_Edition_01_2024_RU.pdf.

2. Мандычев А., Усубалиев Р., Азисов Э. Динамика изменения ледника Абрамова с 1850 по 2014 год по данным дистанционного зондирования, наземным измерениям и опубликованным данным. ЦАИИЗ. 2016. 21 с. Цифровой ресурс: http://caiag.kg/images/caiag/dep2/Glacier_Abramov_2016_fin.pdf
3. V. B. Aizen, V. A. Kuzmichenok, A. B. Surazakov, E. M. Aizen. 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, 2006. с.202-213