

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324.63

Изменение площади и объёма ледников хр. Терской Ала-Тоо во второй половине XX в.

© 2012 г. С.С. Кутузов

Институт географии РАН, Москва

s.kutuzov@gmail.com

Статья принята к печати 4 мая 2011 г.

Дистанционные методы, изменение климата, ледники, Центральная Азия.
Central Asia, climate change, glaciers, remote sensing.

Анализируется изменение площади и объёма ледников хр. Терской Ала-Тоо во Внутреннем Тянь-Шане. Показано, что во второй половине XX в. эти параметры ледников непрерывно сокращались, при этом темпы деградации существенно увеличились с 1990 по 2006 г. В настоящее время объём ледников в основном изменяется в результате понижения поверхности льда. Рассмотрены также основные климатические параметры района исследования.

Введение

Темпы сокращения ледников существенно увеличиваются практически во всех районах земного шара [11, 21]. Относительно небольшие горные ледники часто более чувствительны к изменениям климата и реагируют на них быстрее, чем ледниковые покровы. Согласно выводам Межправительственной комиссии по изменениям климата, несмотря на полученные к настоящему времени результаты, каталогизация ледников и изучение особенностей динамики оледенения представляют собой, пожалуй, самые актуальные задачи современной гляциологии [13].

Тянь-Шань – один из самых обширных горных ледниковых районов мира. Здесь насчитывается около 16 тыс. ледников общей площадью 15,5 тыс. км² [6]. Во внутренних районах Тянь-Шаня, где в днищах долин количество атмосферных осадков составляет 300–400 мм/год, большое значение имеет ледниковое питание рек. При расчёте и моделировании стока необходимы точные сведения об изменении размеров оледенения, что позволит реально оценить вклад различных составляющих в уравнения водного баланса.

В последние несколько лет сильно возросло число публикаций по изменениям оледенения в Центральной Азии. В первую очередь, это связано с недостатком пресной воды в регионе, в связи с чем требуются самые современные оценки динамики оледенения. Для Северного Тянь-Шаня такие оценки

сделаны несколькими авторами [2, 9, 12]. Так, уменьшение площади ледников Заилийского Ала-Тоо с 1950 г. до конца XX в. оценивается в 30–35% [9]. Для китайской части Тянь-Шаня величины отступления несколько ниже: за последние 37 лет они составили 13% [14, 17]. Известны оценки изменения площади оледенения и для ледников Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня [8, 15, 17, 21]. Отметим, однако, что у разных авторов из-за использования разных методик результаты существенно отличаются. Поэтому наши знания об изменениях параметров ледников Тянь-Шаня всё ещё недостаточны.

Материалы и методы исследования

Основными объектами наших исследований были ледники, расположенные в хр. Терской Ала-Тоо (рис. 1, 2). Для анализа изменений ледников использованы: 1) аэрофотоснимки в цифровом формате TIFF высокого разрешения, охватывающие период с 1943 по 1988 г. (1943, 1956, 1959, 1977, 1980 и 1988 гг.); 2) топографические карты масштаба 1:25 000 для восточной части хр. Терской Ала-Тоо по состоянию на 1965 и 1977 гг.; 3) космические снимки Landsat TM 1990 г. и Landsat ETM+ 1999 г.; 4) набор снимков сенсора Aster 2003 и 2006 гг. Аэрофотоснимки и топографические карты получены автором в Институте геологии Национальной Академии наук Киргизской Республики и в Институте географии РАН, Москва. При оценке площади ледников в максимум послед-

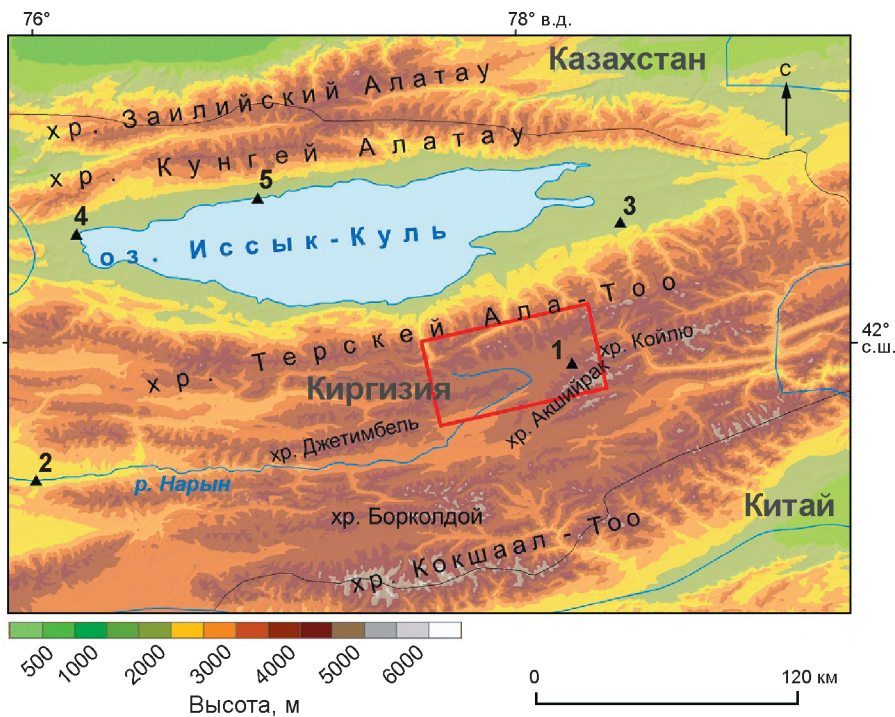


Рис. 1. Район исследования.

Контуром показаны границы рис. 2; метеостанции: 1 – Тянь-Шань; 2 – Нарын; 3 – Каракол; 4 – Балыкчи; 5 – Чолпон-Ата

Fig. 1. Study area.

The red outline on the figure shows the area depicted in Fig. 2. Triangles show locations of the weather stations: 1 – Tien Shan; 2 – Naryn; 3 – Karakol; 4 – Balykchi; 5 – Cholpon-Ata

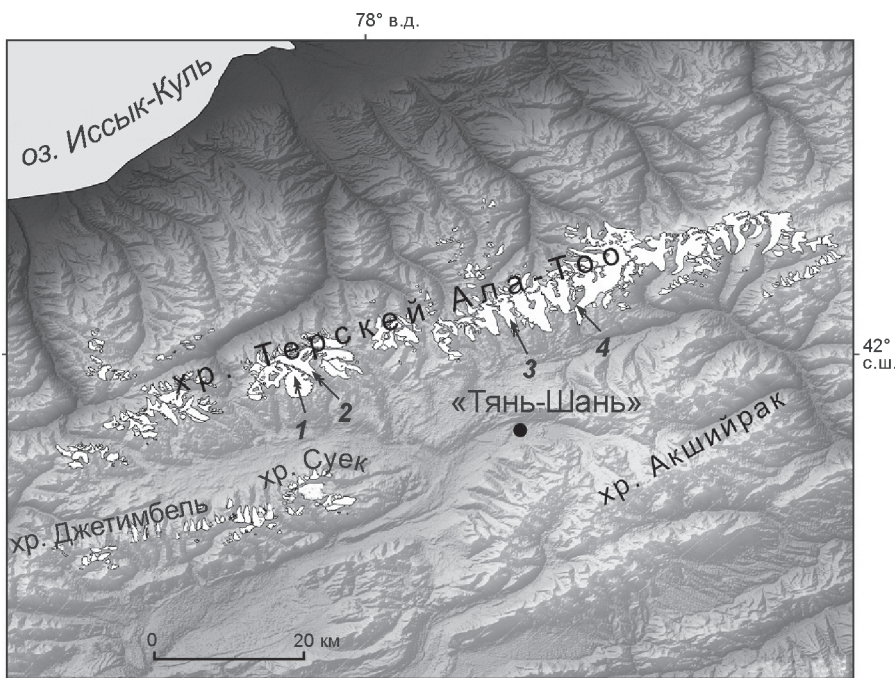


Рис. 2. Контуры исследуемых ледников по состоянию на 2003 г. по данным дешифрирования снимков ASTER.

Показано положение ледников: 1 – Григорьева; 2 – Попова; 3 – Южный Ашутор; 4 – Колпаковского

Fig. 2. The outlines of the studied glaciers derived from the 2003 ASTER imagery.

The location of glaciers: 1 – Gregoriev; 2 – Popov; 3 – South Ashutor; 4 – Kolpakovsky

него ледникового периода (около 150 лет назад) дополнительно изучены опубликованные материалы о возрасте и положении моренных комплексов.

Изменение высоты поверхности и объёма ледников определялось на основе материалов цифровых моделей рельефа (ЦМР), составленных по топографическим картам 1965 и 1977 гг. и радарной топографической съёмке земной поверхности SRTM 2000 г.

Картографирование пространственных изменений ледников включало в себя следующие этапы: привязку и трансформирование аэрофото- и космических снимков; перевод всех имеющихся снимков и карт в единую систему координат; построение ЦМР; дешифрирование ледников и моренных комплексов; сравнение разновременных ЦМР и расчёт изменения объёма ледников; оценку точности измерений.

Таблица 1. Сокращение числа и площади ледников в период 1965–2003 гг. в зависимости от их размера

Класс ледников по площади, км ²	Число ледников/площадь, км ²			Сокращение площади, %		
	1965	1990	2003	1965/1990	1990/2003	1965/2003
< 1	69/22,9	66/19,8	66/18,4	13,8	7,1	19,9
1–3	28/40,3	28/37,0	28/34,4	8,1	4,3	12,0
3–5	8/27,4	8/24,6	8/24,5	6,7	4,1	10,6
5–10	4/29,4	4/27,7	4/26,6	4,7	4,0	9,5
<i>Всего</i>	109/120,0	106/110,1	106/104,9	8,3	4,7	12,6

Получены данные об изменении границ 109 ледников для периодов 1965–1990 и 1990–2003 гг. Для десяти ледников южного склона хр. Терскей Ала-Тоо на основе исторической информации, топографических карт, аэрофото- и космических снимков, а также результатов полевых работ собраны материалы об их изменении на протяжении последних 150 лет. Совместный анализ топографических карт 1965 г. и SRTM 2000 г. позволил рассчитать изменение поверхности льда.

Чтобы определить точность ручного дешифрирования границ ледников, выполнена повторная обрисовка нескольких ледников с площадью более 0,1 км² на изображениях разного типа. Установлено, что погрешность определения площади отдельных ледников составляет менее 5%. Погрешность определения площади значительной выборки ледников (более 100) снижается до 3% и менее из-за компенсации положительных и отрицательных ошибок.

Точность построенных ЦМР оценивалась на основе точности исходных данных, а также путём сравнения двух ЦМР для неледниковых поверхностей. Номинальная вертикальная точность отображения поверхности на топографических картах масштаба 1:25 000 составляет 1/3 интервала между горизонталями рельефа (порядка 3,3 м); горизонтальная точность равна 5 м. Для однородных снежных поверхностей в областях аккумуляции ледников вертикальная точность снижается из-за отсутствия контрастности на аэрофотоснимках, поэтому размер этой ошибки оценивается только приблизительно. Вертикальная точность данных SRTM, в свою очередь, часто превышает 16 м [8]. В то же время известно, что точность ЦМР, полученных на основе данных интерферометрического радара (InSAR), существенно снижается в районах с сильно расчлнённым рельефом. Кроме того, в отличие от топографических карт, при составлении которых используется Балтийская система высот, для данных SRTM применяется ортометрическая система высот. Для оценки точности мы сравнили данные двух моделей рельефа для 500 точек на территории, свободной ото льда и с крутизной склона от 0° до 20°, характерной для ледников. Разница между двумя моделями соста-

вила –3,5 м при величине стандартного отклонения 5 м и диапазоне изменчивости от –18,9 м до 15 м, что подтверждает отсутствие значительного расхождения между высотными системами.

База данных по климату региона включает в себя показатели 35 метеорологических станций. Для анализа климатических изменений в районе исследования выбрано пять ближайших к ледникам станций, метеорологические параметры которых отличаются высоким коэффициентом корреляции (см. рис. 1). Проанализирована временная изменчивость температуры воздуха и количества осадков с 1880-х годов.

Результаты

Изменение площади ледников. Со времени малого ледникового периода и вплоть до середины XX в. 109 ледников восточной части хр. Терскей Ала-Тоо потеряли около 9,6% общей площади, которая уменьшилась с 132,8 до 120 км². В последующие 25 лет (с 1965 по 1990 г.) площадь оледенения этого района сократилась ещё на 8,3% (табл. 1, рис. 3). В период 1990–2003 гг. скорость сокращения ледников увеличилась: после 1990 г. общая площадь 109 ледников стала меньше на 4,7%, что составило 5,2 км².

В 1965 г. из 109 ледников 69 имели площадь меньше 1 км² и занимали 19% общей площади. Ввиду сокращения этих малых ледников общая площадь ледников уменьшилась на 27%. Однако вклад малых ледников в этом регионе оказался несколько меньше значений, полученных в результате исследований в Европейских Альпах, где малые ледники, занимая 18% общей площади оледенения, ответственны за 44% общего уменьшения площади между 1973 и 1999 г. [19].

С целью более детального анализа поведения ледников в условиях изменяющегося климата на протяжении последних 150 лет исследованы десять ледников южного склона хр. Терскей Ала-Тоо. Основные показатели при выборе ледников – значительный объём информации по ним, а также компактное их расположение в одних и тех же локальных климатических условиях. В результате были оценены пространственные изменения ледников на протяжении XX в. (табл. 2, рис. 4). Сравнение топо-

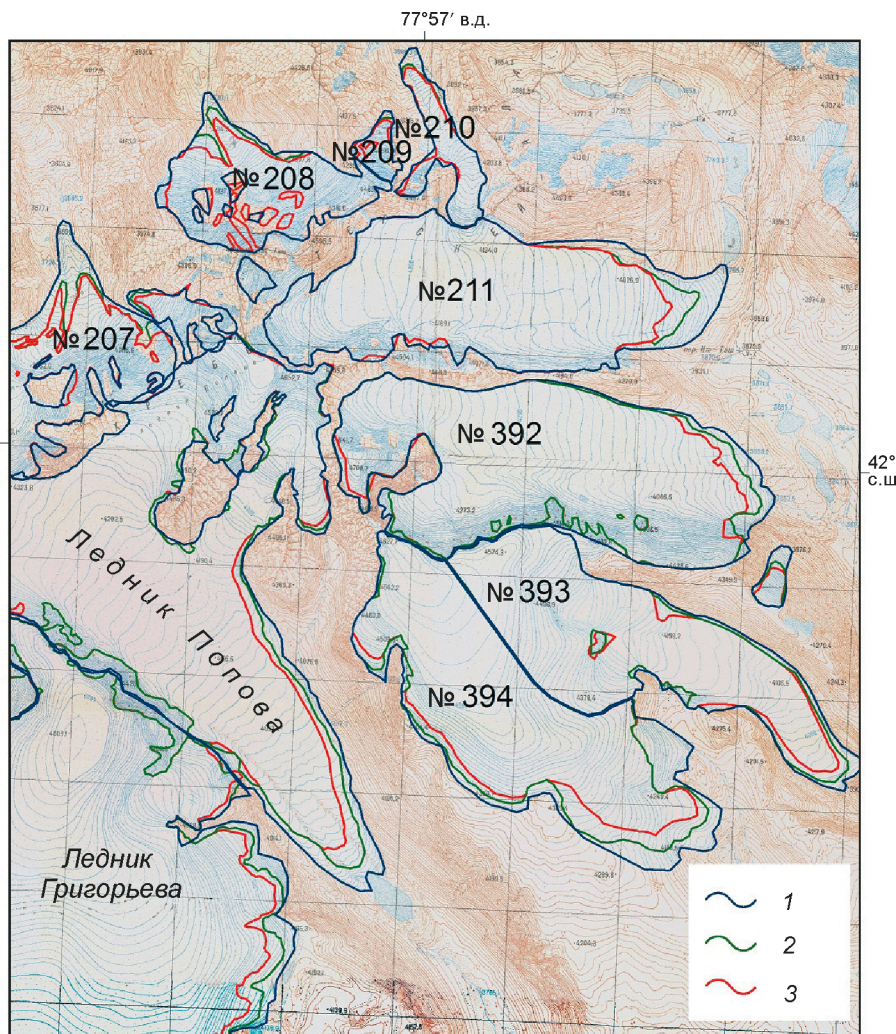


Рис. 3. Изменение размеров некоторых ледников восточной части хр. Терской Ала-Тоо (фрагмент): 1 – 1965 г.; 2 – 1990 г.; 3 – 2003 г. В качестве основы использованы топографические карты, составленные на основе съёмки 1965 г. в масштабе 1:25 000. Номера ледников даны в соответствии с КATALOGом ледников СССР

Fig. 3. Changes of several glaciers in eastern Terskey Ala-Too range (fragment):

1 – 1965; 2 – 1990; 3 – 2003

Glaciers are named and numbered as in the USSR Glacier Inventory

графических карт 1965 и 1977 гг. и данных SRTM 2000 г. позволило получить значения высоты нижней точки для каждого из ледников за разные периоды времени (табл. 3). Отметим, что полученные значения в ряде случаев существенно отличались от опубликованных [4, 7], так как в настоящее время можно получать массовые данные о высотных параметрах ледников, использовать материалы дистанционного зондирования Земли и ранее засекреченные крупномасштабные топографические карты. Это позволяет уточнять полученные ранее значения.

Обобщение сведений об изменении размеров ледников за последние 150 лет даёт возможность установить общие закономерности поведения ледников исследуемой территории. Значения скорости сокращения площади и отступления языков десяти выбранных ледников несколько выше, чем средние величины для 109 ледников, тем не менее, данные о характере изменения ледников для Внутреннего Тянь-Шаня можно считать репрезентативными, а скорость их деградации типична для долинных лед-

ников. После окончания малого ледникового периода (1860-е годы) ледники отступали сравнительно медленно (2–4 м в год) на протяжении нескольких десятилетий вплоть до 1943 г. Это подтверждают, кроме наших данных, различные исследования того времени между 1875 и 1947 г. [1, 3, 5]. В 1943–1956 гг. средняя скорость отступления ледников существенно возросла и достигла 14–17 м в год. На протяжении следующих 20 лет, вплоть до середины 1970-х годов, ледники продолжали отступать, правда темпы сокращения несколько снизились (8–10 м в год). Начиная с конца 1970-х годов и до настоящего времени отмечается постоянный рост скорости отступления долинных ледников хр. Терской Ала-Тоо. Так, в 1990–2006 гг. она была максимальной за последние 150 лет и составила 18–20 м в год.

Изменение объёма ледников. Для 13 крупных ледников южного склона хр. Терской Ала-Тоо на основе сравнения разновременных ЦМР проанализированы изменение высоты поверхности и объёма льда. Данные SRTM 2000 г. сравнивались с ЦМР, создан-

Таблица 2. Площадь (числитель, км²) и суммарная величина отступления (знаменатель, м) для десяти ледников между серединой XIX в. (окончание малого ледникового периода) и 2006 г.*

Ледник	Малый ледниковый период	1943 г.	1956 г.	1965 г.	1977 г.	1990 г.	2006 г.
Большой Чонтор SU5X14105397	6,9	—	6,6/320	6,5/390	6,4/540	6,3/670	6/980
Попова SU5X14105395	9,1	—	8,6/450	8,5/490	8,4/630	8/860	7,7/1075
Григорьева SU5X14105396	10	—	9,4/230	9,3/250	—	8,6/400	8/600
SU5X14205211	4,8	4,6/190	4,4/430	4,2/570	4,0/730	3,9/990	3,7/1290
SU5X14105392	4,7	4,0/480	4,9/560	4,85/600	4,8/660	4,6/760	4,4/890
SU5X14105393	4,5	4,2/520	4,1/800	4,0/820	—	3,9/840	3,7/980
SU5X14105394	3,9	3,4/130	3,3/180	3,2/230	—	2,8/360	2,4/460
Колпаковского SU5X14207317	27,5	26,8/600	26,2/1030	—	25,9/1300	25,5/1520	24,8/2030
SU5X14207324	6,3	6,1/80	5,9/240	—	5,8/400	5,5/540	5,3/770
Южный Ашутор SU5X14207326	6,5	6,3/270	6,0/490	—	5,9/560	5,7/720	5,3/1090

*Номера и названия ледников даны в соответствии с Мировым каталогом ледников; прочерки в табл. 2 и 3 означают отсутствие сведений.

ными по топографическим картам масштаба 1:25 000 1965 г. (семь ледников) и картами 1977 г. (шесть ледников) (табл. 4).

Средняя величина понижения высоты поверхности за 35 лет составила 21,6 м, или 0,6 м в год. Основные изменения происходят в области абляции ледников, где величина понижения поверхности достигает 60–80 м. Тем не менее, общее понижение поверхности характерно для большей части площади ледников; исключения составляют лишь самые верхние части областей аккумуляции (рис. 5). Среднее изменение высоты поверхности для шести ледников с 1977 по 2000 г. равно –12,8 м. На рис. 5 видны участки с явно завышенным изменением высоты поверхности в области аккумуляции ледников. Эти места приурочены к крутым склонам и исключались из анализа. Наибольшее изменение объёма характерно для ледника Колпаковского (№ 317), который вместе с притоком № 319 потерял с 1977 до 2000 г. 0,4 км³ льда (см. рис. 5 и табл. 4).

Изменение объёма ледников получено двумя способами: путём прямого сравнения ЦМР и используя среднюю величину понижения поверхности и изменения площади. Как видно из табл. 4, разница между двумя оценками изменения объёма льда ледников составляет 7–10%. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований во Внутреннем Тянь-Шане. Среднее понижение поверхности ледников Акшийрака с 1943 по 2000 г. составило 23,4 м, из них на период 1943–1977 гг. приходится 8,3 м, а на период 1977–2000 гг. – 15,1 м [8].

Таблица 3. Высота нижней точки ледников в разные периоды, м

Ледник	Малый ледниковый период	1965 г.	1977 г.	2000 г.
Большой Чонтор	3860	3880	—	3900
Попова	3800	3830	—	3850
Григорьева (выводной язык)	4110	4120	—	4145
№ 211	3750	3765	—	3890
№ 392	3850	3860	—	3900
№ 393	3800	3910	—	3940
№ 394	4050	4090	—	4120
Колпаковского	3510	—	3520	3550
№ 324	3870	—	3888.	3895
Южный Ашутор	3850	—	3864	3870

Климатические изменения в районе исследования.

Для анализа изменения температуры воздуха использовались данные пяти высокогорных метеостанций, расположенных в исследуемом районе и имеющих наиболее продолжительный период наблюдений. Четыре метеорологические станции на протяжении всего периода наблюдений работали по стандартной программе синоптических наблюдений и не меняли своего положения за весь период наблюдений. Метеостанция Тянь-Шань начала свою работу в 1930 г. и до 1996 г. также работала по стандартной программе. Однако 19 августа 1996 г. на высоте 3659,6 м была установлена и начала работать автоматическая метеостанция. Полгода наблюдения велись параллельно,

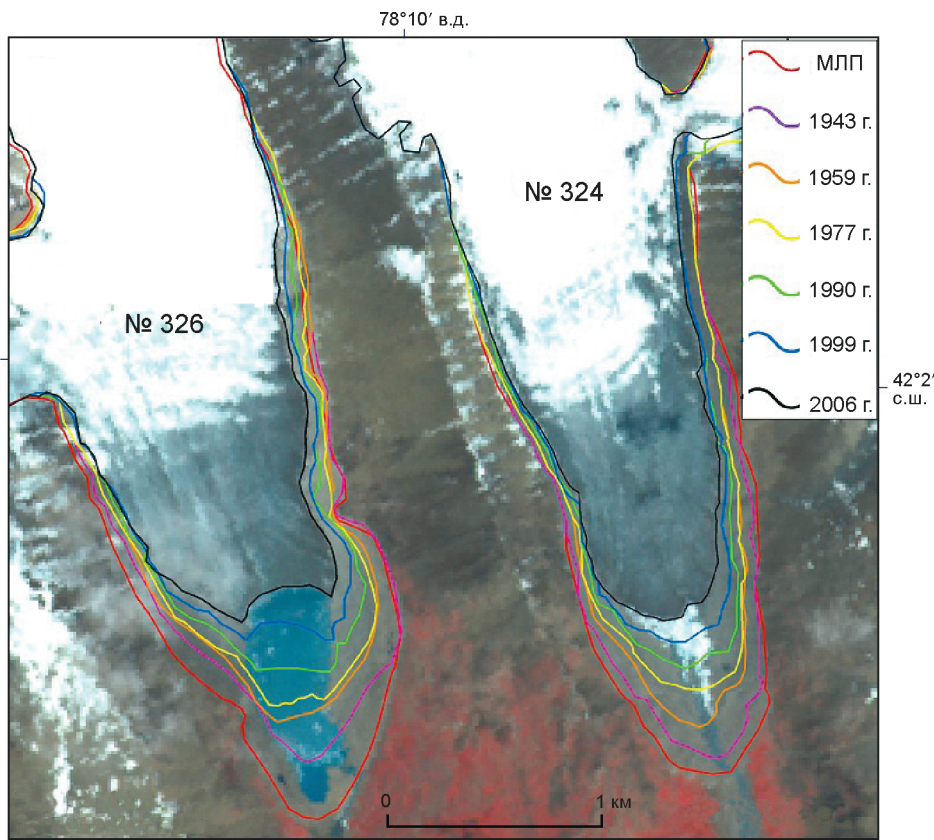


Рис. 4. Изменение размеров ледников № 326 и № 324. В качестве фона использован снимок ASTER 2006 г.; МЛП – малый ледниковый период
Fig. 4. Changes in glacier № 326 and № 324 surface area. ASTER image of 2006 were used as a background; LIA – little ice age

Таблица 4. Изменение высоты поверхности и объёма льда ледников

Ледник	Среднее понижение поверхности, м	Изменение объёма, км ³	Период, годы	Рассчитанное изменение объёма, км ³
№ 402	17,4	-0,025	1965–2000	-0,036
№ 198	23,4	-0,042		-0,033
Большой Чонтор	26,5	-0,179		-0,174
Попова	22,2	-0,188		-0,184
№ 211	10,0	-0,040	1977–2000	-0,037
№ 392	13,7	-0,063	1965–2000	-0,062
№ 394	23,2	-0,067		-0,071
№ 393	24,6	-0,087		-0,084
Колпаковского	13,2	-0,289	1977–2000	-0,336
№ 319	12,8	-0,094		-0,119
№ 321	13,0	-0,141		-0,157
№ 324	11,0	-0,060		-0,062
Южный Ашутор	15,8	-0,071		-0,090

но потом станция Тянь-Шань была закрыта. За период наблюдений выявлена высокая корреляция практически всех измеряемых метеопараметров: например, температура воздуха отличалась на 0,1 °С.

При анализе изменчивости температуры воздуха особое внимание уделялось колебаниям температуры тёплого периода, к которому относятся три

летних месяца, а также май и сентябрь, в течение которых на ледниках возможно таяние.

Используя высокий коэффициент корреляции между станциями Каракол и Балыкчи, ряд станции Каракол был продлён до 2005 г. (рис. 6). Согласно данным длиннорядных метеостанций Каракол и Нарын, на протяжении последних 120 лет, начиная

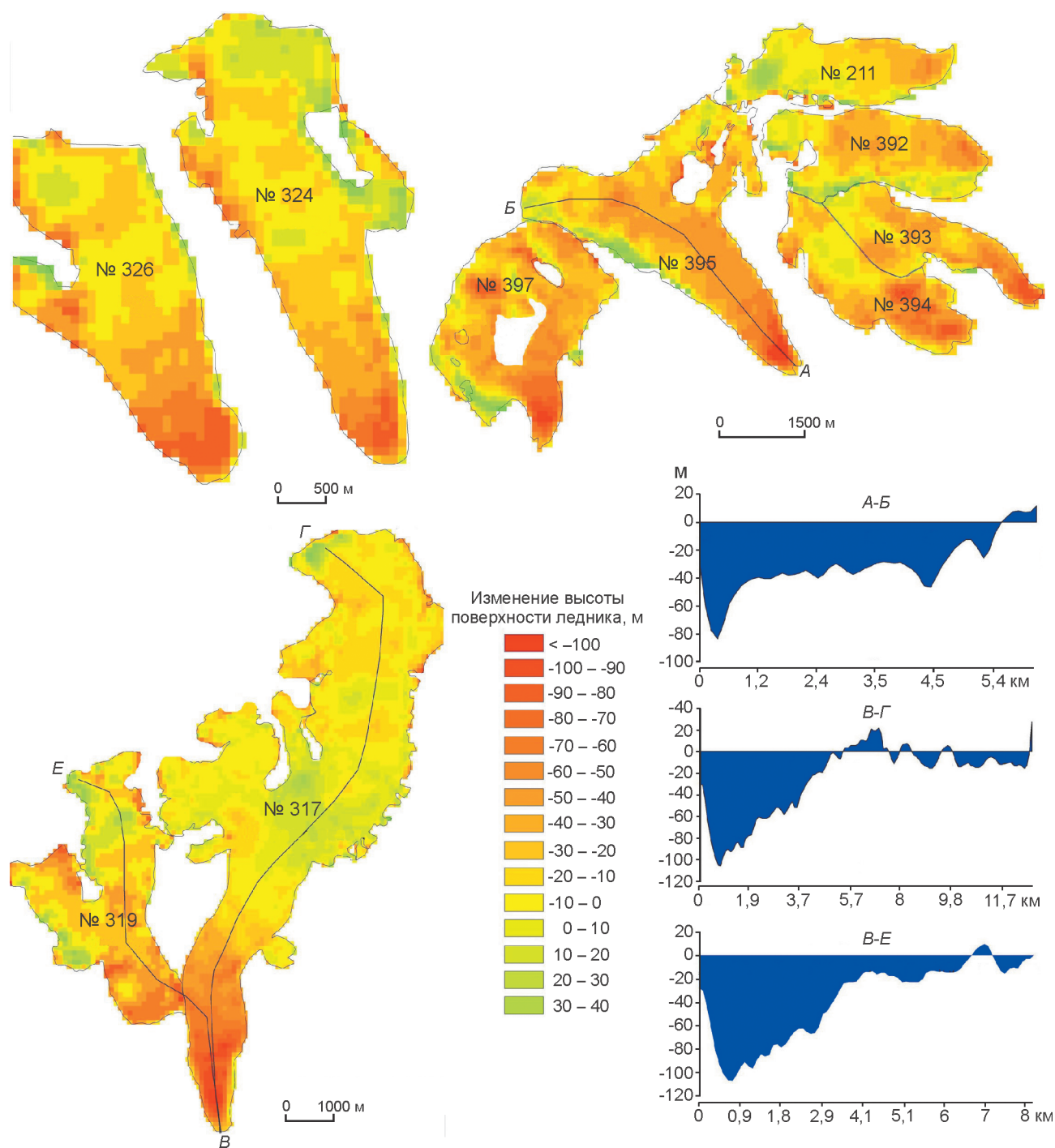


Рис. 5. Изменение высоты поверхности некоторых ледников южного склона хр. Терской Ала-Тоо с 1965 г. по 1977 и 2000 гг. (см. табл. 4).

Показаны продольные профили изменения высоты поверхности

Fig. 5. Glaciers surface elevation changes in Terskey Ala-Too between 1965, 1977 and 2000 (see Table 4).

Longitudinal profiles of the surface elevation changes are shown

с 1880-х годов, кратковременные периоды потепления и похолодания неоднократно сменяли друг друга без выраженного общего тренда вплоть до середины XX в.

С 1950-х годов до настоящего времени повсеместно наблюдается рост температуры тёплого периода (май–сентябрь). Аналогичные результаты для данной территории приводятся и другими исследо-

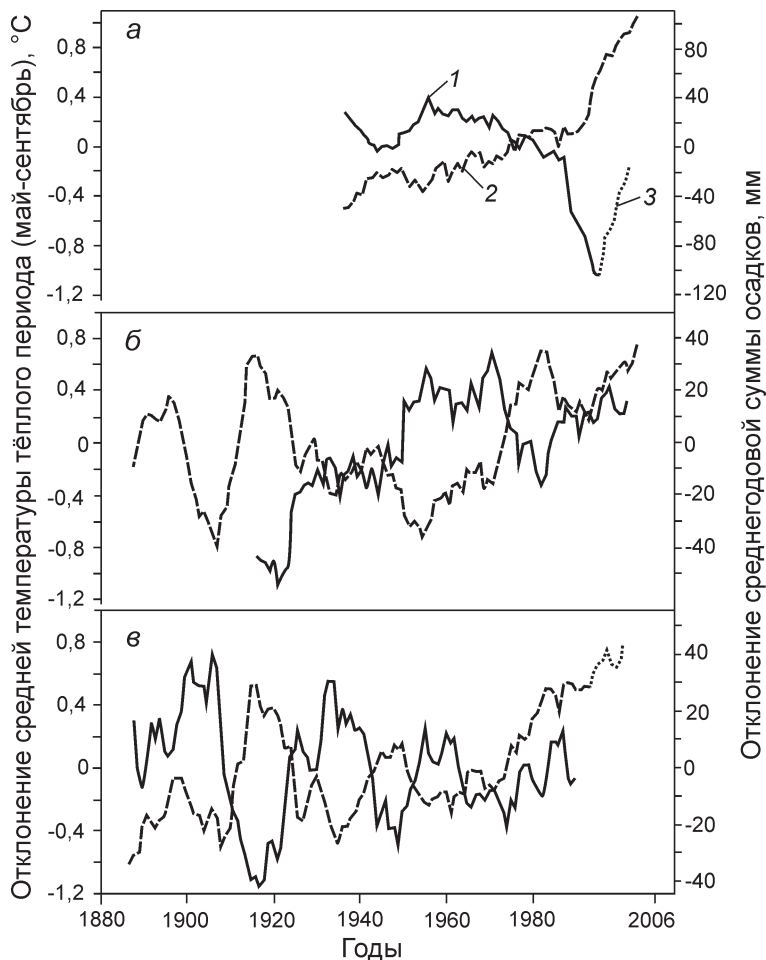


Рис. 6. 11-летнее скользящее среднее отклонений среднегодовой суммы осадков (1) и средней температуры (2) тёплого периода (май–сентябрь) по данным метеостанций Тянь-Шань (а), Нарын (б) и Каракол (в); данные автоматической метеостанции Тянь-Шань, а также данные станции Каракол, восстановленные по станции Балыкчи (3)

Fig. 6. 11 years moving average (1) of anomalies and (2) May–September mean monthly temperature precipitation for stations Tien Shan (a), Naryn (b), Karakol (v); the AWS data are shown for the Tien Shan station, and the Karakol station data extended using Balykchy station time series (3)

вателями [8, 9]. С 1956 по 2004 г. на всех станциях выявлен статистически значимый (уровень значимости 0,05) положительный тренд температуры тёплого периода (см. рис. 6). За 51 год (1956–2007) по данным метеостанции Тянь-Шань температура тёплого периода увеличивалась в среднем на 0,03 °C в год. На станциях Балыкчи, Чолпон-Ата и Тянь-Шань девять из десяти самых больших аномалий температуры тёплого периода наблюдались за последние 30 лет, причём шесть из них – в период с 1997 г. Таким образом, потепление во второй половине XX в. зафиксировано и в среднегорье (1000–2000 м над ур. моря), и в высокогорной зоне. За последние 20 лет температура летнего периода на метеостанции Тянь-Шань выросла на 1 °C.

По сравнению с относительно однородной изменчивостью температуры воздуха в регионе пространственное распределение и тренды в изменении атмосферных осадков менее однородны. Тем не менее, при анализе данных можно выделить периоды, имеющие общую направленность изменений. Установлена отрицательная корреляция между среднелетней (май–сентябрь) температурой воздуха и

годовым количеством осадков в регионе. Эту зависимость иллюстрирует совместный анализ аномалий средней температуры тёплого периода и годовой суммы осадков (см. рис. 6).

Противофазное поведение метеорологических параметров было характерным для высокогорной метеостанции Тянь-Шань вплоть до 1997 г. При этом годовая сумма осадков в 1956–1996 гг. уменьшалась в среднем на 4,6 мм в год. Минимальная сумма осадков за всю историю наблюдений зафиксирована в 1996 и 1997 (самый тёплый год) годах. Как уже отмечалось, 19 августа 1996 г. была установлена автоматическая метеостанция, а стандартный осадкомер Третьякова был заменён автоматическим осадкомером. Пока остаётся неясным – действительно ли в последнее время происходит рост осадков или это связано с использованием осадкомеров разного типа. Данные по количеству осадков на других метеостанциях района слабо коррелируют с данными метеостанции Тянь-Шань и не могут ни подтвердить, ни опровергнуть предположение о существенном изменении количества осадков в районе исследования. Согласно данным трёх метео-

станций, современное потепление сопровождается незначительным увеличением количества осадков.

Обсуждение

Климатические изменения влияют на поведение ледников через изменение составляющих баланса массы, которые, в свою очередь, приводят к колебанию размеров ледников. Полученные результаты сокращения площади и объёма ледников и изменения климата во Внутреннем Тянь-Шане согласуются с данными наблюдений за балансом массы ледников. В работе [11] проанализированы все ряды прямых измерений баланса массы ледников мира и показано, что с конца 1950-х до середины 1970-х годов в Центральной Азии ледники находились в квазистационарном состоянии. Баланс массы был относительно стабилен и близок к нулю, а положение фронтов менялось незначительно. С середины 1970-х годов годовые величины баланса ледников в Центральной Азии резко возросли в сторону отрицательных величин.

Основной процесс, контролирующей баланс массы ледников континентальных районов, — абляция, которая зависит от средней температуры воздуха сезона абляции [14]. В условиях наблюдаемого в районе исследования повышения среднелетней температуры воздуха отмечается общая тенденция к увеличению скорости отступления ледников. Согласно данным пяти горных метеостанций, а также исследованиям в других районах Тянь-Шаня, средняя температура воздуха сезона абляции (май–сентябрь) в горах Тянь-Шаня повышается со средней скоростью 0,02–0,03 °С в год. В работе [10] показано, что для компенсации повышения температуры воздуха на 1 °С и сохранения баланса массы, близкого к нулевому, необходимо увеличение количества осадков на 10% (другие авторы [19] считают, что эта величина составляет 25%). Вместе с тем данные по метеостанции Тянь-Шань указывают на существенное уменьшение осадков в конце XX в. Так, в 1990–1996 гг. среднегодовое количество осадков составляло 169 мм, что на 44% меньше средней величины за весь период наблюдений — 302 мм. Следовательно, фиксируется дефицит питания ледников. В других регионах Тянь-Шаня зарегистрирован некоторый рост количества осадков [8], однако и он не может компенсировать увеличение температуры воздуха в этих районах.

Заключение

Полученные данные дополняют существующие в настоящее время оценки изменения оледенения Внутреннего Тянь-Шаня. На протяжении всего XX в. уменьшались размеры ледников. Правда, ско-

рость сокращения была разной. После периода стабильного медленного отступления от морен малого ледникового периода в первой половине XX в. и увеличения темпов деградации в 1950-х годах процесс отступления ледников в 1960-х годах замедлился. С конца 1970-х годов скорость деградации ледников непрерывно возрастает. Несмотря на небольшую суммарную площадь малых ледников, сравнительно велик их вклад в общее сокращение (30%) площади оледенения, хотя это значение ниже по сравнению с другими горными регионами мира.

Показано, что объём льда значительно сокращается в основном за счёт понижения высоты поверхности. При этом в отличие от изменения площади оледенения, которое в континентальных районах происходит с явно меньшими темпами, чем в регионах с более умеренным климатом, изменение высоты поверхности и объёма льда во Внутреннем Тянь-Шане по своим масштабам вполне сопоставимо с соответствующими значениями в Северном Тянь-Шане или даже в Альпах.

Согласно данным длиннорядных метеостанций, начиная с 1950-х годов повсеместно наблюдается статистически значимое повышение температуры летнего периода, при этом тренд увеличения температуры воздуха зарегистрирован для всех месяцев. В то же время общего тренда в изменении осадков не установлено. При этом в высокогорной зоне в районе исследования с 1956 по 1996 г. наблюдалось существенное уменьшение осадков.

Благодарности. Автор выражает благодарность М. Шагедановой, В.Н. Михаленко, О.Н. Соломиной, В.А. Кузьмиченку и А.Ф. Глазовскому за многочисленные консультации, Р. Усубалиеву и Б. Абылмеизовой — за неоценимую помощь в проведении полевых работ на Тянь-Шане.

Работа поддержана проектом РФФИ № 11-05-91159-ГФЕНа.

Литература

1. Авсюк Г.А. Ледники плоских вершин // Тр. Института географии АН СССР. 1950. Т. 45. Вып. 1. С. 15–44.
2. Вилесов Е.Н., Уваров В.Н. Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX в. Алматы: изд. Казахского госуд. ун-та, 2001. 252 с.
3. Кассин Н. Гидрогеологические исследования, произведенные в бассейне озера Иссык-Куль в 1914 г. СПб., 1915. 268 с.
4. Каталог ледников СССР: Т. 14. Вып. 2. Ч. 5. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 80 с.
5. Корженевский Н.Л. Каталог ледников Средней Азии. Ташкент, 1930. 200 с.
6. Кузьмиченко В.А., Лю Шаохай. Распределение ледников и характеристика оледенения на Тянь-Шане // Оледене-

- ние Тянь-Шаня. М.: изд. Института географии РАН, 1995. С. 24–42.
7. Савоскул О.С. Колебания ледников периферийных и внутренних областей Тянь-Шаня в голоцене: Автореф. канд. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Институт географии РАН, 1994. 24 с.
 8. Aizen V.B., Kuzmichenok V. A., Surazakov A.B., Aizen E.M. Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data // *Annals of Glaciology*. 2006. V. 43. P. 202–213.
 9. Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan / Kyrgyzstan) using remote sensing data // *Global and Planetary Change*. 2007. V. 56. P. 1–12.
 10. Braithwaite R.J., Zhang Y., Raper S.C.B. Temperature sensitivity of the mass balance of mountain glaciers and ice caps as a climatological characteristic // *Zeitschrift für Gletcherkunde und Glazialgeologie*. 2002. V. 38. P. 35–61.
 11. Dyurgerov M.B., Meier M.F. *Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot*. Institute of Arctic and Alpine Research, Occasional Paper № 58. Boulder: University of Colorado, 2005. 117 p.
 12. Hagg W., Braun L., Uvarov V.N., Makarevich K.G. A comparison of three methods of mass balance determination in the Tuyuksu Glacier Region. Tien Shan // *Journ. of Glaciology*. 2005. V. 50. P. 505–510.
 13. IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
 14. Jing Z., Jiao K., Yao T., Wang N., Li Z. Mass balance and recession of Urumqi glacier No. 1. Tien Shan. China. over the last 45 years // *Annals of Glaciology*. 2006. V. 43. P. 214–217.
 15. Khromova T.E., Dyurgerov M.B., Barry R.G. Late-twentieth century changes in glacier extent in the Ak-shirak Range, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery // *Geophys. Research Letters*. 2003. V. 30. № 16. 1863 p.
 16. Kutuzov S., Shahgedanova M. Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey-Alatoo, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century // *Global and Planetary Change*. 2009. V. 69. P. 59–70. doi:10.1016/j.gloplacha.2009.07.001.
 17. Li B., Zhu A.X., Zhang Y., Pei T., Qin C., Zhou C. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan // *Journ. of Glaciology*. 2006. V. 52. P. 425–432.
 18. Narayana C., Shimamura Y., Nakayama D., Abdrakhmatov K. Recent changes of glacier coverage in the western Terskey-Alatoo range, Kyrgyz Republic, using Corona and Landsat // *Annals of Glaciology*. 2006. V. 43. P. 223–229.
 19. Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records // *Science*. 2005. V. 308. P. 675–677. 10.1126/science.1107046
 20. Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T.W., Haeberli W. Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data // *Geophys. Research Letters*. 2004. V. 31. L21402. doi: 10.1029/2004GL020816
 21. Raper S.C.B., Braithwaite R.J. The potential for sea level rise: New estimates from glacier and ice cap area and volume distributions // *Geophys. Research Letters*. 2005. V. 32. L05502. doi: 10.1029/2004GL021981

Summary

Changes in the extent of glaciers and rates of glacier termini retreat in the eastern Terskey-Alatoo Range, the Tien Shan Mountains, Central Asia have been evaluated using the remote sensing techniques. Changes in the extent of 109 glaciers between 1965, 1990 and 2003 have been estimated through the delineation of glacier outlines on the topographic maps, Landsat TM and ASTER imagery for 1965, 1990 and 2003 respectively. Glacier surface area has decreased by 12.6% of the 1965 value between 1965 and 2003. Detailed mapping of 10 glaciers using historical maps and aerial photographs from the 1943–1977 period, has enabled glacier extent variations over the 20th century to be identified with a higher temporal resolution. Glacial retreat was slow in the early 20th century but increased considerably between 1943 and 1956 and then again after 1977. The post-1990 period has been marked by the most rapid glacier retreat since the end of the LIA. For the selected 13 glaciers volume reduction has been evaluated using a time step digital elevation models. DEM obtained from the 1:25 000 topographic maps of 1965 and 1977 were compared to SRTM data. The observed changes in the extent of glaciers are in line with the observed climatic warming. The regional weather stations have revealed a strong climatic warming during the ablation season since the 1950s at a rate of 0.02–0.03 °C a⁻¹. At the higher elevations in the study area represented by the Tien Shan meteorological station, the summer warming was accompanied by negative anomalies in annual precipitation in the 1990s enhancing glacier retreat. However, trends in precipitation in the post-1997 period cannot be evaluated due to the change in observational practices at this station. Neither station in the study area exhibits significant long-term trends in precipitation.