

УДК 551.324

Реакция ледников Центрального Кавказа в 2001–2010 гг. на изменения температуры и количества осадков

© 2013 г. Г.А. Носенко¹, Т.Е. Хромова¹, О.В. Рототаева¹, М.В. Шахгеданова²

¹Институт географии РАН, Москва; ²Университет г. Рединг, Великобритания
gnosenko@gmail.com

Статья принята к печати 7 августа 2012 г.

Баланс массы, космические снимки, сокращение площади ледников, Центральный Кавказ.
Central Caucasus, mass balance, shrinkage of glaciers, space images.

Оценено изменение размеров ледников Центрального Кавказа с 2001 по 2010 г. Для количественной оценки сокращения площади ледников Центрального Кавказа в бассейнах рек Баксан и Ингури за этот период использованы материалы повторной космической съёмки. В среднем эта величина составила 5%. По сравнению с предыдущим периодом наблюдений (1987–2001 гг.) средняя скорость отступления языков ледников увеличилась. Причины сокращения площади ледников анализировались на основе данных непрерывного многолетнего ряда балансовых наблюдений на леднике Гарабаши (Эльбрус), а также материалов наблюдений за изменениями температуры и количества осадков на метеостанции Терскол. Сокращение размеров оледенения хорошо коррелирует с ростом летних температур в высокогорье Кавказа, несмотря на увеличение количества зимних осадков.

Введение

В последние десятилетия наблюдаются рост изменчивости основных климатических параметров (температуры воздуха и количества осадков) и ускорение таяния ледников во многих горных районах мира. Такие выводы делаются на основе результатов продолжающихся наблюдений на отдельных репрезентативных ледниках или количественных оценок по некоторым горным системам в целом, выполненных путём сравнения исторических материалов (карты, аэрофотоснимки, данные каталогов), и данных, полученных с помощью современных дистанционных методов [1, 11, 12]. Как правило, в таких работах рассматриваются изменения, которые произошли за несколько десятилетий [3, 8, 12], т.е. они охватывают большой временной интервал, однако информация об эволюции ледников внутри этого периода не всегда доступна. Однако динамичность современной ситуации предполагает и более высокую детальность исследований нивально-гляциальных процессов во времени. Авторы настоящей работы попытались оценить изменения, произошедшие с ледниками Центрального Кавказа за сравнительно короткий период 2001–2010 гг., и проанализировать их в контексте современных колебаний климатических показателей в высокогорной зоне. Выбранный временной интервал особенно интересен, так как он характеризуется интенсивным таянием ледников и активизацией стихийных процессов в высокогорье Кавказа, т.е. увеличением числа и мощности

снежных лавин, а также возникновением ряда крупных гляциальных селей, в число которых вошла и Кармадонская катастрофа 2002 г. [4, 9].

Для решения этой задачи использованы материалы съёмки из космоса с помощью аппаратуры ASTER, выполняемой в рамках проекта GLIMS с 2000 г. по настоящее время. Они обеспечили однородность разновременных условий получения данных о состоянии ледников и их сопоставимость, а наличие в высокогорной зоне действующей метеостанции Терскол позволило выполнить сравнительный анализ изменчивости основных метеопараметров за исследуемый период.

Район исследований, используемые данные и методы обработки

Основное условие при выборе района исследований – наличие материалов повторной съёмки в конце периода абляции 2001 и 2010 гг. Такому требованию удовлетворял участок Главного Кавказского хребта между 43,05–43,35° с.ш. и 42,34–42,83° в.д., где расположены ледники верховьев бассейнов рек Баксан и Ингури, в том числе и ледники юго-восточного склона Эльбруса (рис. 1). Согласно данным Каталога ледников СССР [2], на исследуемой территории находился 181 ледник, площади которых превышали 0,1 км². Такие ледники по форме и размерам типичны для Центрального Кавказа. К ним относятся также ледники Гарабаши и Джанкуат, на которых ведутся ежегодные наблюдения за динамикой границ и балансом массы.

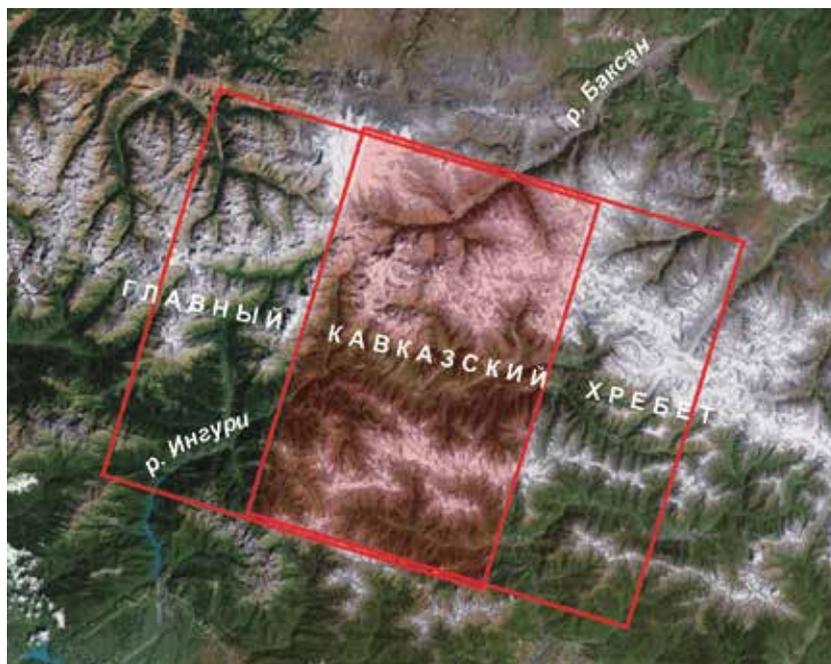


Рис. 1. Район исследований в зоне перекрытия снимков ASTER 2001 и 2010 гг.
Fig. 1. Study area in frame ASTER images 2001 and 2010

В качестве исходной информации использованы два снимка ASTER 2001 и 2010 гг.; выборка из аэрофотоснимков 1987 г. для 28 ледников, данные Каталога ледников СССР по бассейнам рек Баксан и Ингури, результаты GPS-съёмки контрольных участков исследуемой территории, материалы многолетних балансовых наблюдений на леднике Гарабаши и данные наблюдений за температурой воздуха и количеством выпавших осадков на метеостанции Терскол.

Снимки ASTER (29 сентября 2010 и 15 сентября 2001 гг.) использовались для дешифрирования границ ледников. Снимки сделаны в конце периода абляции, до начала выпадения нового снега, поэтому погрешности дешифрирования, обусловленные влиянием этого фактора, можно считать равными нулю. Снимки прошли предварительную обработку в архиве NASA LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center), где они были орторектифицированы в картографической проекции UTM WGS 84 с использованием программного обеспечения PCI OrthoEngine [6]. Проверка точности совмещения разновременных снимков ASTER выполнена с использованием сети из 12 наземных контрольных точек (GCP), координаты которых предварительно определяли с помощью GPS-съёмки. Величина среднеквадратичной ошибки ($RMSE_{x,y}$) находилась в пределах разрешения снимка и не превышала 8,1 м. Вклад этой ошибки в подсчёт площадей ледников

оценивался путём построения буферной зоны вдоль границ ледников. Ширина зоны составляла половину максимальной величины $RMSE_{x,y}$. Полученная величина ошибки зависела от размеров ледника и лежала в диапазоне 2–0,5% для ледников площадью 0,5–9,8 км² соответственно. С учётом распределения исследуемых ледников по размерам ошибка составила $\pm 1,2\%$.

Векторизация границ ледников по состоянию на два срока выполнялась вручную с использованием программы GLIMSVIEW по синтезированному из трёх каналов изображению ASTER (0,52–0,6, 0,63–0,69 и 0,78–0,86 нм) для территории, попадающей в область их перекрытия. Если дешифрирование границ ледников осложняли тени от горного обрамления, то применялась функция выравнивания контраста программы ENVI 3.5. При определении положений ледоразделов (особенно для ледников Эльбруса) использовалась цифровая модель рельефа (ASTER DEM). При оцифровке положений границ ледников погрешность, обусловленная субъективным фактором, принята равной $\pm 1,1\%$, исходя из опыта предыдущих работ [3, 12].

Моренный покров на поверхности ледников – распространённое явление для Центрального Кавказа. На отдельных ледниках его площадь составляет от 3 до 25% и может служить причиной ошибок, возникающих при определении положения их границ. Для количественной

оценки погрешности, обусловленной наличием моренного покрова, мы использовали данные GPS-съёмки на десяти ледниках, расположенных на склонах Эльбруса и в прилегающих к Главному Кавказскому хребту долинах бассейна р. Баксан. Измерения выполнены вдоль границ языков ледников во время балансовых наблюдений (вторая половина сентября 2010 г.) в конце периода абляции и по срокам практически совпадали со съёмкой ASTER 2010 г. Сравнение результатов дешифрирования границ ледников по снимку ASTER и данных наземных измерений показало, что наличие моренного покрова на языках вносит дополнительно $\pm 0,3\%$ в погрешность оценки изменений площадей ледников. С учётом погрешности от совмещения снимков ASTER итоговая среднеквадратичная погрешность при подсчёте площадей составила $\pm 1,6\%$.

Материалы аэрофотосъёмки 25–26 сентября 1987 г. использованы для оценки скорости отступления фронтальных частей ледников в предыдущий период (1987–2001 гг.). Этот показатель – более чувствительный индикатор изменения внешних условий на таком относительно коротком временном интервале, как десятилетие. Была сделана выборка из 28 долинных ледников, расположенных на северном и южном склонах Главного Кавказского хребта, а также на юго-восточном склоне Эльбруса. В неё вошли в основном долинные и сложные долинные ледники протяжённостью от 2 до 12 км. Фрагменты аэрофотоснимков, которые содержат изображения языков ледников, интерактивно трансформированы с использованием наземных контрольных точек, опознаваемых на снимках ASTER 2001 г., и программного обеспечения ERDAS 8.7 (RMSE_x = 6,5 м). Величина отступления языка ледника определялась по результатам измерений этого параметра в нескольких точках линии фронта вдоль линий тока. Для сравнения использовалось среднее значение.

При анализе изменений климатических условий использовались ряды среднемесячных температур и осадков с 1951 по 2010 г. по метеостанции Терскол (43,26° с.ш.; 42,51° в.д.; высота 2141 м), расположенной близко от объектов исследований.

Результаты и обсуждение

Общее число ледников, оцифрованных по снимкам 2001 и 2010 гг. и использовавшихся для сравнения, составило 181, в том числе 103 – на северном склоне Главного Кавказского хребта, 71 – на южном склоне и семь ледников на юго-восточном склоне Эльбруса. Суммарная площадь этих ледников в 2001 г. составляла 221,05 км². К 2010 г. она уменьшилась на 10,29 км², или на

4,65%. При этом ледники южного склона хребта (в бассейне р. Ингури) сократились на 5,6%, а северного – на 4,6%. Наименьшие потери площади произошли у ледников Эльбруса, относящихся к бассейну р. Баксан: её суммарная величина составила 2,8%. Возможная причина меньшего сокращения площади этих ледников обусловлена тем, что ледники Эльбруса отличаются от ледников Главного Кавказского хребта большими высотой и протяжённостью области аккумуляции, открытой навстречу влагонесущим потокам юго-западных циклонов. Средняя высота ледников Эльбруса, вошедших в выборку, – 3980 м, в то время как у ледников северного и южного склонов Главного Кавказского хребта – 3130 и 2810 м соответственно. Этот фактор, по-видимому, влияет на увеличение таяния поверхности и скорость сокращения размеров ледников на южном склоне хребта, несмотря на то, что количество осадков здесь больше.

Восемь ледников сократились более чем на 20%. В их число вошли каровые ледники, площадью менее 1 км², расположенные как на северных, так и на южных отрогах Главного Кавказского хребта. 11 ледников потеряли от 10 до 20% площади. Изменения 59 ледников приняты равными нулю по двум причинам: либо определение границ было затруднено моренным покровом, либо изменения границ этих ледников находились в пределах разрешения снимков. Площадь преобладающего большинства ледников, не изменившихся свои размеры, – менее 1 км², и относятся они к каровым или висячим ледникам (рис. 2). Наибольшие потери площади наблюдаются у ледников долинного и присклонового типов: они сократились на 5,2 и 5,5% соответственно. Каровые и висячие ледники потеряли соответственно 4,1 и 4,2% своей площади.

Измерение положений концов языков с использованием АФС 1987 г., а также ASTER 2001 и 2010 гг. показало, что все 28 ледников, вошедших в выборку, в эти промежутки времени отступали (таблица). Суммарное отступление с 1987 по 2010 г. в зависимости от размеров, морфологии и высоты положения языка ледника лежит в диапазоне от 50 до 500 м. Сложные долинные и крупные долинные ледники с низко спускающимися по долинам языками сократились наиболее заметно. Так, конец ледника Большой Азау отступил на 500 м (рис. 3). Отчленение притоков у сложных ледников лишает основной поток части питания, что усиливает его деградацию (Шхельда – 300 м, Чалаат – 240 м, Лекзыр – 490 м). На концах таких языков образуются большие массивы мёртвых льдов, при таянии которых ледник может быстро потерять значительную часть площади. Рис. 4 иллю-

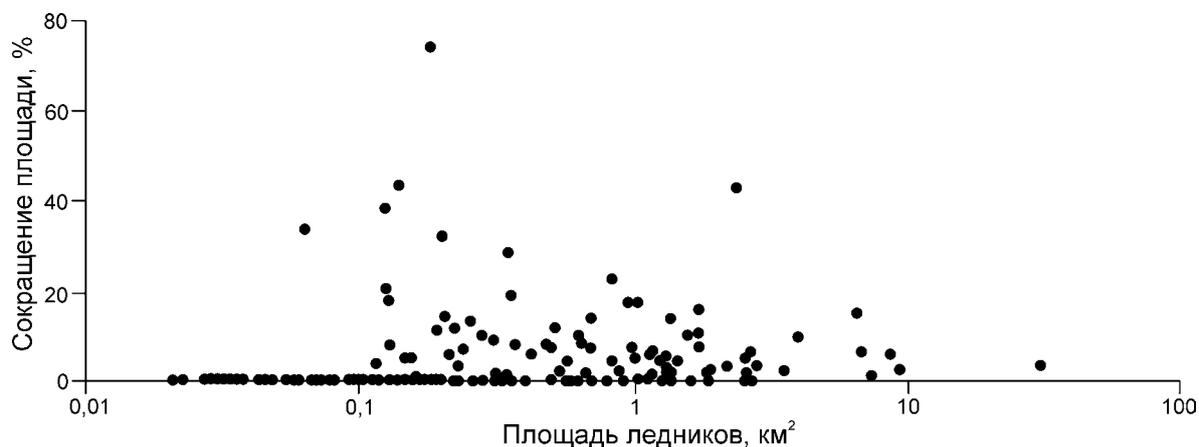


Рис. 2. Сокращение площади ледников в зависимости от их размеров, %
Fig. 2. Reduction in glacier area depending on their size, %

стрирует снижение активности центральной ветви и притоков ледника Лекзыр и распад ледника на отдельные составляющие. За последнее десятилетие центральный поток прямой южной экспозиции отступил от прежнего места слияния на 460 м.

В то же время у ледников, языки которых расположены на больших высотах, отступление линии фронта более равномерно. Пример тому – ледник Гарабаши, непрерывно отступающий в последние десятилетия и в настоящее время оканчивающийся на высоте 3250 м. Каровые и висячие ледники относительно устойчивы: первые – за счёт постоянства метелевого и лавинного питания, вторые – из-за преимущественно высокого расположения. В годы интенсивного таяния они также теряют свой объём, хотя из-за особенностей морфологии их границы изменяются менее заметно.

При сравнении средних скоростей отступления языков ледников внутри всего рассматриваемого временного интервала установлено, что с 1987 по 2001 г. ледники бассейна р. Баксан отступали со средней скоростью 6,4 м/год, а с 2001 по 2010 г. скорость возросла вдвое и составила 13,0 м/год. На южном склоне Главного Кавказского хребта в бассейне р. Ингури ледники отступали в целом медленнее, но соотношение скоростей отступления в эти два периода было более значимым – 2,9 и 9,9 м/год.

Для выяснения причин ускоренного сокращения ледников в последнее десятилетие проанализировано изменение основных климатических показателей – температуры и осадков, а также баланса массы ключевого ледника Гарабаши, для которого существует непрерывный ряд наблю-

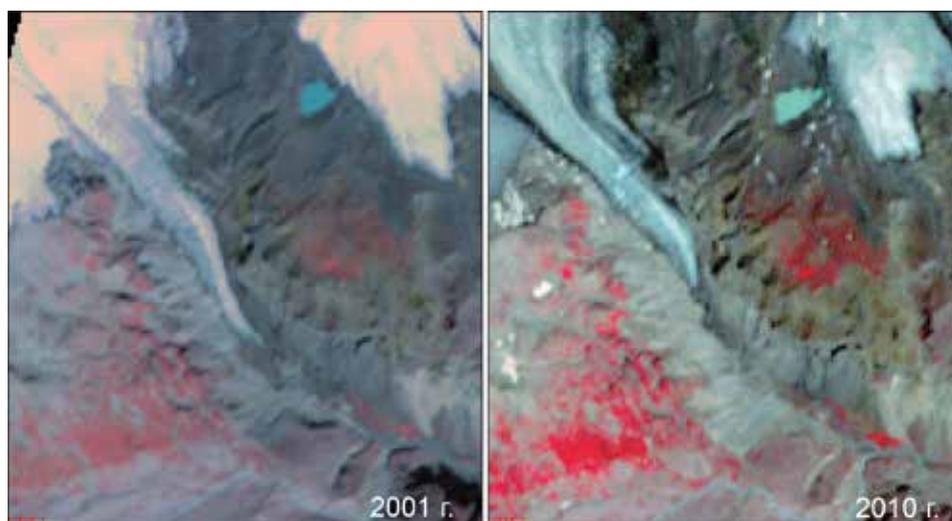


Рис. 3. Положения языка ледника Большой Азау в 2001 и 2010 гг. на снимках ASTER
Fig. 3. The provisions of the snout Bolshoi Azau in 2001 and 2010 on ASTER images

Изменения длины отдельных ледников (ΔL) в бассейнах рек Баксан и Ингури в 1987–2001 и 2001–2010 гг.*

Название ледника/номер WGI	S_{2001} , км ²	L_{2001} , км	$\Delta L_{1987-2001}$, м	$\Delta L_{2001-2010}$, м/%
<i>Бассейн р. Баксан</i>				
Ирикчат/SU4G08005018	1,89	2,60	85	100/3,85
Ирик/SU4G08005020	9,98	9,80	75	120/1,22
Терскол/SU4G08005026	7,39	7,20	80	90/1,25
Гарабаши/SU4G08005027	3,70	3,90	85	100/2,56
Малый Азау/SU4G08005028	9,49	8,20	70	150/1,83
Большой Азау/SU4G08005029	16,58	10,20	300	200/1,96
SU4G08005037	2,62	1,80	20	30/1,67
SU4G08005044	2,71	4,60	40	80/1,74
SU4G08005049	2,22	3,30	50	100/3,03
Шхельда SU4G08005050	6,83	9,70	150	150/1,55
SU4G08005056	1,92	2,80	140	120/4,29
Кашкаташ/SU4G08005057	2,85	4,60	60	90/1,96
Башкара/SU4G08005059	4,06	4,30	60	180/4,19
Джанкуат/SU4G08005062	2,41	3,10	40	130/4,19
<i>Бассейн р. Ингури</i>				
SU5T09105177	1,21	2,40	50	70/2,92
SU5T09105178	1,61	2,50	20	70/2,80
SU5T09105179	0,43	0,80	20	50/6,25
SU5T09105210	1,47	3,00	20	80/2,67
Северный Лядешт/SU5T09105211	3,61	2,60	30	60/2,31
SU5T09105214	0,84	2,00	10	40/2,00
Лядвал/SU5T09105225	1,88	3,60	20	30/0,83
Тсалгмил/SU5T09105226	2,40	2,50	60	90/3,60
Лакра/SU5T09105227	2,63	3,10	65	160/5,16
Квиш/SU5T09105229	7,42	6,10	150	200/3,28
Долра/SU5T09105234	6,59	5,50	15	60/1,09
Ушба/SU5T09105241	8,78	5,80	30	80/1,38
Чалаат/SU5T09105245	9,42	7,30	40	200/2,74
Лекзыр/SU5T09105247	31,38	8,30	40	200/2,42

*Последние три цифры в номере ледника по WGI (Международному каталогу ледников) соответствуют номеру ледника по Каталогу ледников СССР [2].

дений с 1983 г.; использована и реконструкция за предыдущий период с 1905 г. [7]. Изменение кумулятивного баланса массы ледника Гарабаши (рис. 5) показало рекордно низкие значения годового баланса в первом десятилетии XXI в. Подобная ситуация наблюдалась и в 1950-х годах. По данным метеостанции Терскол и других кавказских станций, это вызвано особо высокими температурами воздуха и малым количеством осадков в летние месяцы (рис. 6).

С 1960-х годов значительное увеличение снежности и падение летних температур воздуха определили более благоприятные для ледников

Кавказа условия (см. рис. 6). По наблюдениям на Эльбрусе, в 1960–70-е годы годовой баланс массы ледника Гарабаши был близок к нулю. Ледники южного склона Эльбруса получали много осадков, ледники Гарабаши и Терскол с 1960 по 1990 г. почти не отступали.

В целом в 1965–1990 гг. на фоне продолжающегося сокращения ледников Кавказа средняя скорость отступления ледников замедлилась. По данным В.Д. Панова [5], в центральной части Северного Кавказа в 1930–60-е годы она превышала 14 м/год, однако в 1970–80-е годы составляла менее 6 м/год. Для крупных слож-

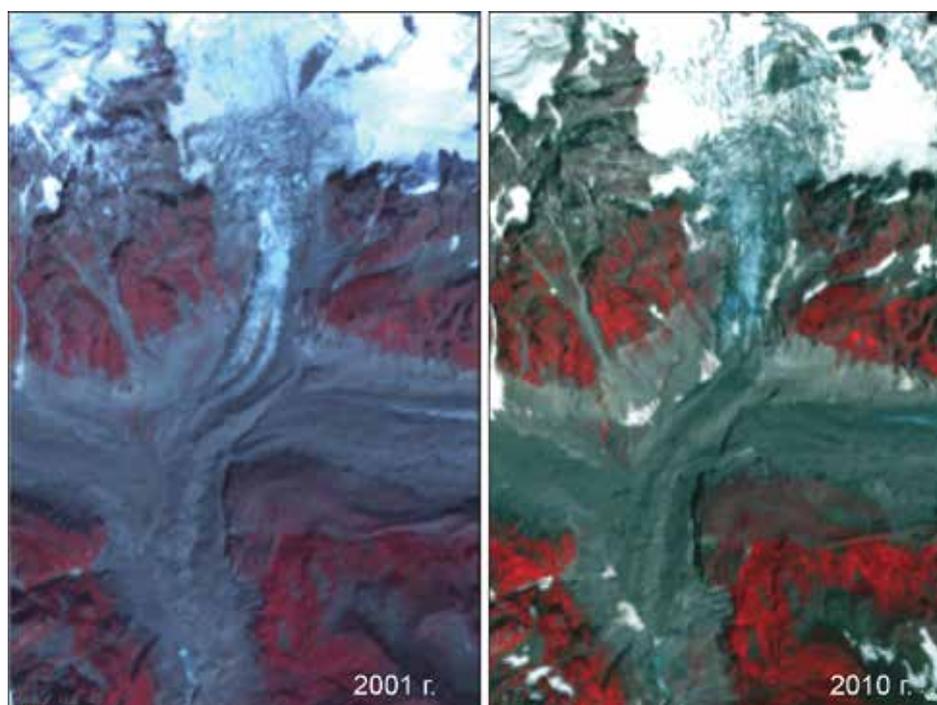


Рис. 4. Изменения состояния притоков в сложной системе ледника Лекзыр в 2001 и 2010 гг. на снимках ASTER
Fig. 4. State changes in a complex system of tributaries of the Lekzyr Glacier 2001–2010 on ASTER images

ных долинных ледников вследствие замедленной реакции на улучшение условий питания снижение скорости отступления отмечалось несколько позже – в 1980–90-е годы.

К концу 1987–2002 гг. измерения по космическим снимкам ASTER и Международной космической станции показали значительное отступление языков ледников не только Эльбруса, но и ещё 65 крупных ледников Центрального Кавказа. Наиболее сильно сократились языки следующих ледников: Караугом – почти на 600 м; Шаурту, Рцывашки, Мидаграбин – около 300 м; Шхельды и Башиль – более 200 м, Цея и Сказка – 160 м. В этот период было четыре аномальных года 1998–2001 гг., которые отличались катастрофическим таянием ледников на всём Кавказе и огромными потерями вещества на ледниках Эльбруса [5] (см. рис. 5). Четыре года подряд устойчивые антициклоны вызывали особенно высокие летние температуры воздуха в горах Кавказа. В среднем в 1998–2001 гг. летняя температура в Терсколе достигала 12,5 °С, что сравнимо лишь с 1950-ми годами. Ледник Гарабаша за эти четыре года потерял слой в 4 м в.э., причём на языке – больше 8 м. Период катастрофического таяния был ненадолго прерван более снежными годами с холодным летом (2002–2005 гг.), которые обеспечили, хотя и близкий к нулю, но всё же положительный баланс массы ледника. Однако в следующее пятилетие

(2006–2010 гг.) вернулись условия аномального таяния ледников. Снова летняя температура на метеостанции Терскол повысилась в среднем до 12,4 °С; ежегодная потеря массы ледника Гарабаша составила 66,4 см в.э., а в экстремальном 2010 г. – 124 см в.э. Баланс ледника продолжал оставаться отрицательным. В настоящее время величина кумулятивного баланса опустилась ниже минимального за последнее столетие значения, наблюдавшегося в 1950-е годы. Поверхность

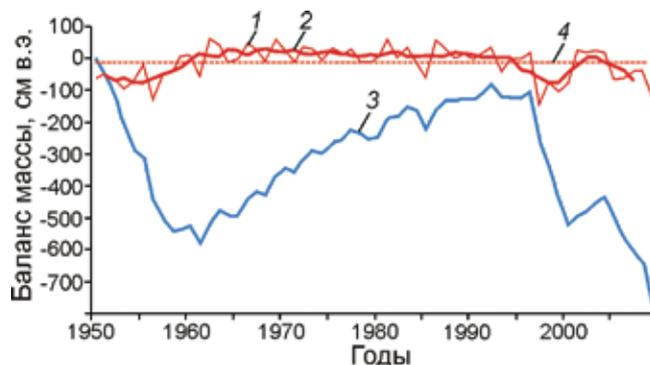


Рис. 5. Баланс массы ледника Гарабаша в 1951–2010 гг.:
 1 – годовой баланс; 2 – скользящий за 5 лет; 3 – кумулятивный баланс; 4 – средний баланс

Fig. 5. Mass balance of Garabashy Glacier, 1951–2010:
 1 – annual balance; 2 – 5 years running balance; 3 – cumulative balance; 4 – average balance

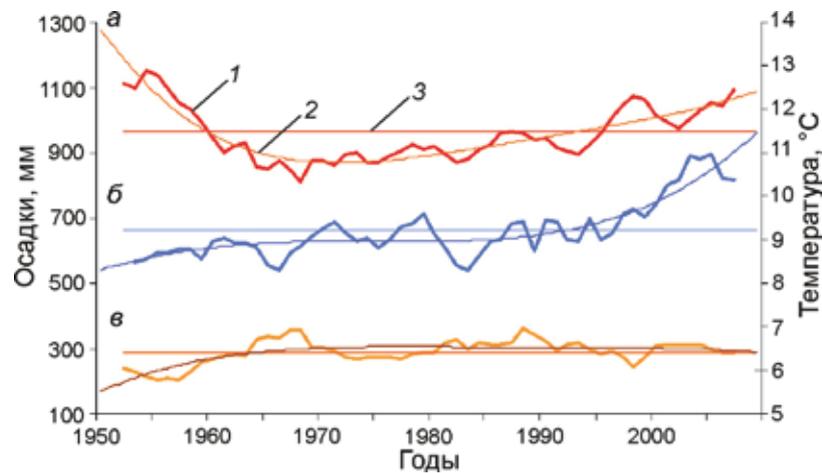


Рис. 6. Летние температуры, зимние осадки, летние осадки (5-летние скользящие) на метеостанции Терскол: *a* – летняя температура; *б* – зимние осадки; *в* – летние осадки; 1 – текущие изменения параметра; 2 – линия тренда; 3 – среднее значение

Fig. 6. Summer temperature, winter precipitation, summer precipitation (5 year roll) Terskol meteorological station: *a* – summer temperature; *б* – winter precipitation; *в* – summer precipitation; 1 – current parameter change; 2 – the average value of parameter

ледника в области границы питания за последние 10 лет понизилась на 3,2 м.

В целом в последнее десятилетие средняя летняя температура воздуха в Терсколе увеличилась на 0,5 °C по сравнению с 1987–2001 гг. (с 11,5 до 12,0 °C). Количество зимних осадков за тот же период возросло на 20%, в то время как летние осадки остались на том же уровне. Но, несмотря на рост зимнего накопления, баланс массы ледника продолжает оставаться отрицательным, так как в отдельные годы абляция превышает аккумуляцию в 1,5–2 раза.

Закключение

Обработка снимков позволила установить, что в пределах исследуемой территории Центрального Кавказа площадь ледников в 2001–2010 гг. сократилась почти на 5%. Результаты полевых исследований подтверждают эту оценку. Процесс сокращения ледников Кавказа наблюдается уже не первое десятилетие и происходит с разной степенью интенсивности. Полученные результаты позволяют предположить, что последние десять лет были самыми неблагоприятными за весь период инструментальных наблюдений за ледниками Кавказа. Период 1990–2000 гг. был самым тёплым десятилетием в Северном полушарии [9]. В эти годы повсеместно отмечалось интенсивное отступление ледников Кавказа. Однако по сравнению с ним скорость сокращения ледников в 2001–2010 гг. возросла более чем вдвое. Существенный рост зимних осадков не способен компенсировать

повышение летних температур, которое относится к основному фактору, определяющему сокращение размеров современных ледников Центрального Кавказа. Наблюдаемые вариации сокращения зависят от размеров, морфологии и высоты положения конкретных ледников.

Современная реакция ледников на изменение внешних условий содержит в себе и временную составляющую, обусловленную инерционностью процессов оборота массы. В настоящее время мы ещё не располагаем достаточной информацией о времени отклика ледников Кавказа на изменения условий питания, но для его предварительной оценки можно воспользоваться простым методом, рекомендованным в работе [10]. Т. Johannesson и др. предложили использовать аппроксимацию, основанную на соотношении толщины ледника на высоте границы питания и величины абляции на языке. Для ледника Гарабаши (при соответствующих значениях толщины порядка 75 м и годовой абляции в среднем 4 м) мы получаем около 20 лет. Эта величина хорошо согласуется с тенденцией роста летней температуры воздуха с начала 1990-х годов (см. рис. 6) и наблюдаемым ускорением темпов сокращения ледников Кавказа в последние два десятилетия. Полученные результаты свидетельствуют также, что космические снимки ASTER представляют собой достаточно эффективный инструмент для оценки климатически обусловленных изменений, происходящих с ледниками за такой сравнительно короткий период, как десятилетие. Интенсивность этого процесса достаточно высока, что позволяет уверенно выде-

лить основную тенденцию на фоне неизбежных погрешностей измерений и локальных особенностей объектов исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №11-07-00389-а и при поддержке гранта НШ-479.2012.5 ведущей научной школы.

Литература

1. Золотарев Е.А., Харьковец Е.Г. Оледенение Эльбруса в конце XX в. (цифровая ортофотокарта Эльбруса на 1997 г.) // МГИ. 2000. Вып. 89. С. 175–181.
2. Каталог ледников СССР. Л.: Гидрометеоздат. Т. 8. Ч. 5. 1970. 145 с. Т. 9. Ч. 5. 1975. 86 с.
3. Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Муравьев А.Я., Нарожный Ю.К., Шахгеданова М.В. Использование исторических данных и современных космических изображений для оценки изменений ледников на Алтае // Лёд и Снег. 2010. № 2 (110). С. 19–25.
4. Носенко Г.А., Рототаева О.В., Носенко О.А. Возможности мониторинга из космоса опасных гляциальных процессов в труднодоступных горных районах (на примере Кармадонской катастрофы 2002 г.) // Исследование Земли из космоса. 2005. № 1. С. 75–81.
5. Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 430 с.
6. Рототаева О.В., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф., Тарасова Л.Н. Балансовое состояние ледника Гарабаши (Эльбрус) в 80-х и 90-х годах XX столетия // МГИ. Вып. 95. 2003. С. 111–121.
7. Рототаева О.В., Носенко Г.А., Тарасова Л.Н., Хмелевской И.Ф. Кавказ. Изменения размеров ледников. Колебания баланса массы ледников // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. С. 145–162.
8. Dyurgerov M.B., Meier M.F. Year-to-year fluctuations of global mass balance of small glaciers and their contribution to sea-level changes // Arctic and Alpine Research. 1997. V. 29. № 4. P. 392–402.
9. IPCC, Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group 1 to the 4th Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
10. Johannesson T., Raymond C.F., Waddington E.D. Time-scale for adjustment of glacier changes in mass balance // Journ. of Glaciology. 1989. V. 35. № 121. P. 355–369.

11. Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A. Caucasus and gora El'brus (with a subsection of the glaciological disaster in North Osetiya) // Satellite Image Atlas of Glaciers of the World, Asia. USGS, 2010. P. 59–76.
12. Shahgedanova M., Nosenko G., Bushueva I., Ivanov M. Changes in area and geodetic mass balance of small glaciers, Polar Urals, Russia, 1950–2008 // Journ. of Glaciology. 2012. V. 58. № 211. P. 953–964.

Summary

This paper examines changes in surface area and terminus retreat of glaciers in the Greater Caucasus Mountains between 2001 and 2010 using ASTER imagery. The use of consistent high-resolution imagery such as ASTER significantly reduces uncertainties in measurements of glacier shrinkage and retreat and enables assessments at decadal intervals which are important for both scientists and regional decision-makers. Two ASTER images acquired on 15 September 2001 and 29 September 2010 covering central sector of the Greater Caucasus Ridge and the Elbrus glaciated massif were used for glacier mapping. Outlines of 179 glaciers were mapped of which 108 glaciers are located on the northern macroslope of the Greater Caucasus and on Mt Elbrus in the Baksan River catchment (Russia) and 71 are located on the southern macroslope in the Inguri River catchment (Georgia). In total, glaciers lost 5% of their area. Glacier wastage was higher in the Inguri catchment at 5.6%; in the Baksan catchment, glaciers lost 4.3% of their area. Termini positions of 28 valley glaciers were measured on ASTER and aerial photographs to compare rates of glacier retreat in 2001–2010 and 1987–2001. The rate of this recession increased, this fact confirmed by field studies in Baksan basin. Glacier mass balance observations at Garabashi glacier indicate strong reduction in cumulative mass balance since 1998 providing further evidence on glacier wastage. The observed shrinkage of Caucasus glaciers is mainly connected with increasing in summer temperatures. Increase in precipitation has not compensated for an increase in temperature between 1987–2001 and 2001–2010 periods.