

УДК 528.946:528.72.551.324

## Эволюция оледенения Эльбруса после малого ледникового периода

© 2012 г. Е.А. Золотарев, Е.Г. Харьковец

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

*lakmmgu@yandex.ru*

*Статья принята к печати 12 октября 2011 г.*

Границы и площади оледенения, динамика ледника, оледенение Эльбруса, цифровая модель рельефа, цифровое картографирование

Borders and area of glaciation, digital elevation model, digital mapping, Elbrus glaciation, glacier dynamics.

Рассмотрены результаты дистанционного мониторинга горного оледенения Эльбруса за 120 лет инструментальных наблюдений (1887–2007 гг.), а также данные лихенометрической съёмки 1986 г. Материалы космической стереосъёмки с разрешением 2,5 м, выполненные в 2007 г. со спутника Cartosat-1 (IRS-P5), сравнивались с материалами фототеодолитной съёмки южного склона оледенения Эльбруса (всего шесть ледников), также выполненной в 2007 г. Сравнение показало, что стереоснимки со спутника Cartosat-1 можно использовать для мониторинга горных ледников с достаточно большим интервалом времени (10 лет и более). Установлена определяющая роль плато Джикюганкез в изменении оледенения Эльбруса. За последние 50 лет (1957–2007 гг.) 45% сокращения площади оледенения Эльбруса приходится именно на это плато. Предложен способ исследования динамики ледников, основанный на цифровых технологиях обработки снимков и названный авторами стереоскопическим моделированием динамики ледника. Количественные данные по сокращению оледенения Эльбруса с середины XIX в. не подтверждают гипотезу о глобальном потеплении климата вследствие парникового эффекта антропогенного происхождения со второй половины XX в. Оледенение сокращается равномерно с небольшими периодами стационарирования и наступания. Это позволяет сделать вывод, что глобальное потепление климата, сменяющееся кратковременными периодами похолоданий, началось после окончания малого ледникового периода и скорее имеет естественные причины, чем антропогенные.

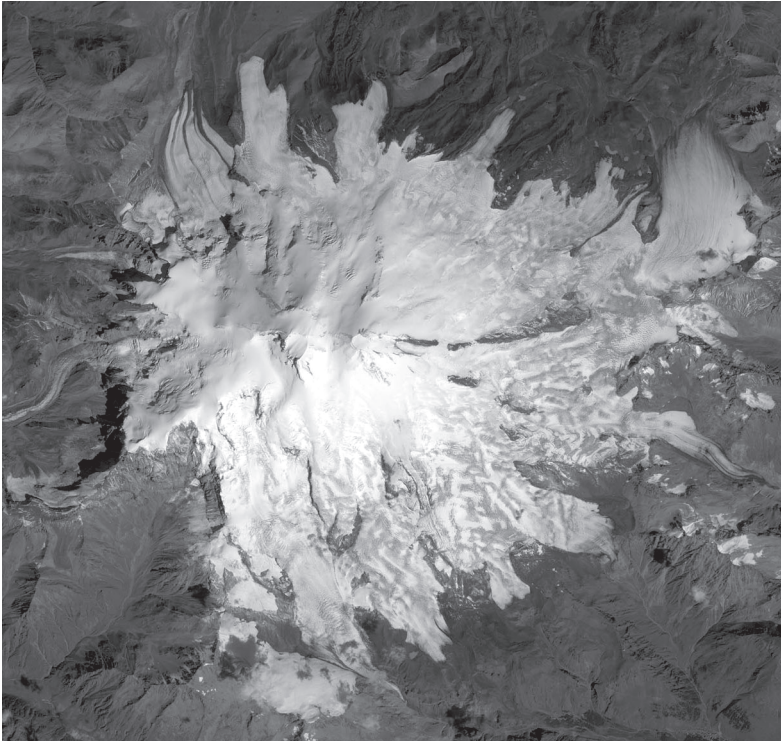
### Введение

Одной из приоритетных задач Международного полярного года 2007–2008 было получение количественных данных об изменениях полярных геосистем вследствие колебаний климата. Оледенение Эльбруса не относится к полярным районам, но горные ледники — чувствительные индикаторы изменений климата. В настоящее время широко известны выводы многих климатологов о глобальном потеплении климата в результате парникового эффекта уже со второй половины XX в. [22, 23]. Мы проверили эту гипотезу путём картографо-аэрокосмического мониторинга крупнейшего в Европе оледенения Эльбруса, площадь которого в 2007 г. составляла около 130 км<sup>2</sup>. Здесь уже более 100 лет — с конца XIX в. до настоящего времени — ведутся наблюдения. При проверке этой гипотезы предполагалось, что повышение глобальной температуры воздуха должно отражаться на размерах оледенения (особенно на его площади и объёме). Безусловно, такие изменения не могут быть мгновенными, но установить тенденцию за длительный период возможно.

### Материалы для исследования

Первая инструментальная (мензульная) съёмка оледенения Эльбруса выполнена отрядом Корпуса военных топографов в 1887–1890 гг., т.е. 120 лет назад. По её результатам составлена топографическая карта

масштаба 1:42 000 [15]. В 1957–1959 гг. во время проведения Международного геофизического года (МГГ) сотрудники лаборатории аэрофотометодов кафедры геодезии и картографии географического факультета МГУ (сейчас лаборатория аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики) выполнили фототеодолитную съёмку и составили карту в масштабе 1:10 000, которая стала базовой для дальнейшего картографо-аэрокосмического мониторинга оледенения Эльбруса [13]. В 1997 г. аэросъёмочным предприятием «Авиа-ФС» по нашему заказу выполнена аэрофотосъёмка оледенения Эльбруса в масштабе 1:50 000, и на основе цифровых технологий обработки снимков мы составили цифровую ортофотокарту всего оледенения в масштабе 1:10 000 [6]. В 2007 г. подобную съёмку из-за отсутствия средств провести не удалось. Вместо неё использовалась цифровая космическая стереосъёмка оледенения (рис. 1) со спутника Cartosat-1 (IRS-P5). Cartosat-1 производит стереосъёмку двумя камерами с одного витка орбиты, позволяя получить стереопары высокого разрешения (2,5 м) в полосе обзора около 30 км (способ одномаршрутной конвергентной съёмки) [20]. Таким образом, в нашем распоряжении оказались материалы только инструментальных съёмок оледенения Эльбруса за 120 лет. А если учесть результаты лихенометрической съёмки стадильных морен, выполненной нами в 1986–1988 гг.



**Рис. 1.** Космический снимок Эльбруса со спутника Cartosat-1 с разрешением 2,5 м, сделанный 12 сентября 2007 г.

**Fig. 1.** The Mt. Elbrus space image with 2.5 m resolution taken by Cartosat-1 satellite in September 12, 2007

[18], то мониторинг оледенения можно расширить до 160 лет. Это, с нашей точки зрения, вполне достаточный срок, чтобы заметить начало резкого усиления интенсивности сокращения оледенения, соответствующее повышению глобальных температур воздуха в середине XX в.

#### Методика исследований

Для получения данных об изменении основных параметров оледенения Эльбруса необходимо совместить и измерить исследуемые параметры разновре́менных съёмок. Сделать это можно разными способами. Традиционно для этих целей используются картометрические способы [1]. Однако трудоёмкость картографирования ледников на основе материалов фототеодолитной и аэрофотосъёмки, а также стремление повысить точность определения изменений за счёт использования материалов повторных съёмок без предварительного создания по ним карт вызвали необходимость непосредственного совмещения материалов повторных съёмок на универсальных приборах. Так, при измерении изменений ледников Эльбруса за 1957–1987 гг. использовался метод совмещения базовой карты 1957 г. и стереопар фототеодолитной съёмки 1987 г. на стереоавтографе [2]. Отметим, что сопоставление стереоскопического и картографического изображений более продуктивно, чем сравнение двух разновре́менных карт, так как обнаружить изменения можно непосредственно во время работы на прибо-

ре, а результаты можно многократно проверять. Недостаток заключается в высокой трудоёмкости и ограничениях, связанных с техническими возможностями совмещения повторных снимков и карт. В результате при изучении изменений ледников принята аналитическая обработка повторных снимков, которая на современном этапе трансформировалась в совмещение цифровых моделей рельефа (ЦМР) разновре́менных съёмок.

Применительно к оледенению Эльбруса это выглядело следующим образом. Базовая карта мониторинга оледенения Эльбруса, составленная во время МГГ, и карта Корпуса военных топографов (конец XIX в.) оцифровывались, а затем составлялись соответствующие ЦМР. Карту Корпуса военных топографов предварительно привели в более удобный для измерения масштаб (1:25 000); для неё применили также условную систему координат 1957 г., в которой представлены и все разновре́менные ЦМР оледенения. Измеренная нами площадь оледенения по вновь составленной карте 1887–1890 гг. отличается от площади, измеренной К.И. Подозерским [15] по оригиналу карты Корпуса военных топографов, менее чем на 1%, что укладывается в допустимые ошибки измерений.

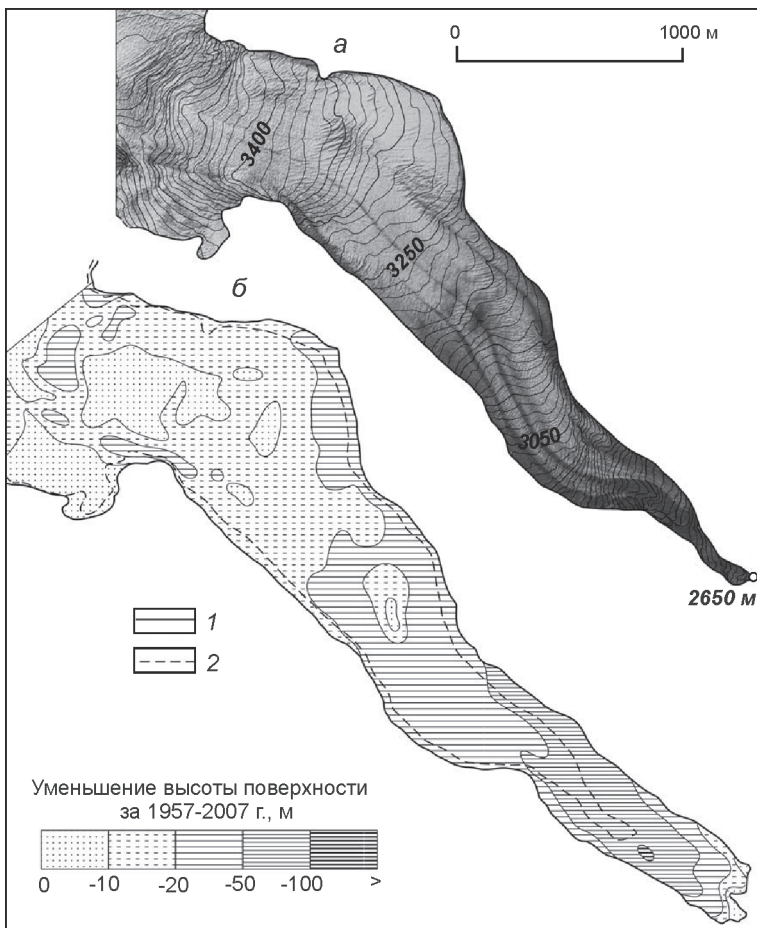
Сопоставление разновре́менных цифровых моделей (1887, 1957, 1997 гг.) позволило измерить изменение границ и высоты поверхности оледенения для каждого временного интервала. Заметим, что все три цифровые модели оледенения составлялись в единой

системе координат и опирались на одни и те же пункты съёмочного обоснования. Максимально возможная среднеквадратическая ошибка при совмещении разновременных цифровых моделей в плане и по высоте составила 2,5 м и рассчитывалась по 20 контурным точкам, опознанным на картах 1957, 1887 гг. и снимках 1997 г.

По материалам лихенометрической съёмки стадияльных морен были установлены границы распространения оледенения в середине XIX в. [18]. Основой для их определения служила крупномасштабная (1:10 000) топографическая карта оледенения Эльбруса съёмки 1957 г. с сечением горизонталей 10 м, на которой специальным условным знаком показывались практически все гребни стадияльных морен. В результате были определены не только площади, но и объёмы ледников во время их максимального распространения. Выполнена также координатная привязка стереопары космических снимков со спутника Cartosat-1 к системе координат цифровой ортофотокарты 1997 г. по 40 опорным точкам. Ошибка привязки по высоте и в плане не превышала 2,5 м. Таким образом, все использованные в исследовании материалы сопоставимы с приемлемой точностью.

К сожалению, пока полностью не обработаны материалы космической съёмки 2007 г., так как автоматическая обработка и составление точной ЦМР на всю площадь оледенения затрудняется недостаточным разрешением снимков, которое для горных районов должно быть хотя бы вдвое выше. Сопоставление результатов фототеодолитной съёмки 2007 г. и космической съёмки ледников южного склона Эльбруса свидетельствует о принципиальной возможности использования снимков со спутника Cartosat-1 для мониторинга ледников (рис. 2).

Как видно из табл. 1, линейные результаты – изменения высот окончания фронта ледников и их отступания – по материалам космической съёмки определяются с ошибкой около 1,5 м, а относительные ошибки определения изменений площади и высоты поверхности составляют 5–7%. Ошибки измерения высоты поверхности устанавливались по двум ледникам из пяти. На трёх ледниках в зоне обработки снимков со спутника Cartosat-1 невозможно было уверенно визировать на поверхность ледника из-за слабой облачности, которая, на первый взгляд, на снимке не заметна. Но в целом данные со спутника Cartosat-1 можно использовать при мониторинге



**Рис. 2.** Ледник Ирик:

*a* – ортофотоплан языка по состоянию на 12 сентября 2007 г.; *б* – пространственное изменение языка ледника Ирик за период 1957–2007 гг.; 1 – граница ледника в 1957 г.; 2 – граница ледника в 2007 г.

**Fig. 2.** Irik Glacier:

*a* – orthophoto plan of Irik Glacier tongue as of September 12, 2007; *b* – spatial changes of Irik Glacier tongue for the period 1957–2007; 1 – glacier border in 1957; 2 – glacier border in 2007

Таблица 1. Сравнение основных параметров изменения ледников южного склона Эльбруса за период 1997–2007 гг., полученных по материалам фототеодолитной съёмки (знаменатель) и космической стереосъёмки со спутника Cartosat-1 (числитель)\*

Ледник	Нижняя отметка фронта ледника в 2007 г. $H$ , м	Линейное отступление фронта ледника $\Delta L$ , м	Уменьшение площади ледника $\Delta S$ , км <sup>2</sup>	Среднее уменьшение высоты поверхности ледника $\Delta H$ , м
Большой Азау	2574,7/2576,0	232/230	0,20/0,19	-14,8/-15,6
Малый Азау	3120,1/3119,0	185/183	0,13/0,12	–
Гарабаши	3289,0/3290,0	81/83	0,06/0,07	
Терскол	2982,2/2983,5	152/154	0,19/0,21	
Ирик	2650,0/2651,3	133/135	0,29/0,30	-10,4/-9,8
Ирикчат	3299,0/2300,5	138/140	0,14/0,15	–

\*Прочерки в табл. 1, 2 означают отсутствие данных.

ледников с достаточно большим интервалом времени между повторными съёмками – от 10 лет и более. Например, цифровая модель динамики ледника Ирик, полученная с использованием данных космической съёмки, позволяет прогнозировать линейное сокращение ледника в ближайшие годы примерно на 250 м (см. рис. 2, а). Эти данные можно использовать и для обновления топографических карт горных территорий масштаба 1:25 000 и меньше.

#### Цифровая стереоскопическая модель динамики ледника

При изучении динамики ледников, с нашей точки зрения, сначала необходимо выполнить дешифрирование параметров динамики и только потом проводить их измерение с учётом особенностей изменений, установленных при дешифрировании. Этот способ мы назвали *стереоскопическим моделированием динамики ледника*. Под стереоскопической моделью динамики ледника мы подразумеваем двойную стереоскопическую модель, наблюдаемую при совмещении обычных стереоскопических моделей, отображающих поверхность ледников в разные сроки наблюдения. Такая стереомодель позволяет одновременно наблюдать две поверхности ледника, вести дешифрирование и измерять его изменения.

Проблема сопоставления разновременных стереоскопических изображений разрабатывается в лаборатории аэрокосмических методов уже давно. Идеи, высказанные в публикациях [8, 9, 11, 12], легли в основу разработки способа определения скоростей движения льда по аэрофотоснимкам, которые в данном случае обрабатывались в два этапа. На первом этапе проводилось ортофототрансформирование разновременных снимков, необходимое для получения неискажённой стереомодели смещения; на втором – одновременное дешифрирование и измерение полученной стереомодели смещения. Этот способ назван нами *стереоскопическим моделированием движения льда на поверхности ледников* – первой составляющей динамики ледника [5]. Вторая состав-

ляющая динамики ледника – *изменение высоты его поверхности* (основного параметра его пространственного изменения) – достаточно просто определяется при обработке материалов повторных наземных, аэро- и космических съёмок.

При наблюдении совмещённых стереомоделей на аналоговых стереоприборах была предпринята попытка одновременного наблюдения двух поверхностей, которая достигалась путём понижения оптической плотности фотоматериалов, но в то время она не увенчалась успехом [19]. В настоящее время при использовании цифровых технологий обработки снимков и построения моделей рельефа одна из наблюдаемых разновременных моделей может быть представлена в виде дискретной стереоскопически визуализируемой поверхности – например, изолинейной, полученной по предварительно составленной ЦМР. Возможность стереоскопического наблюдения изолиний, наложенных на изображения стереопары, существует во многих цифровых фотограмметрических системах для контроля построения горизонталей. Мы используем эту возможность с целью измерения изменений поверхности ледника.

Этот способ изучения и измерения высотной составляющей динамики ледника мы назвали *стереоскопическим моделированием изменения объёма ледника*. С его помощью составлена карта изменения высоты поверхности ледника Ирик (южный склон Эльбруса) с 1957 по 2007 г., т.е. за 50 лет (см. рис. 2, б). Способы стереоскопического моделирования движения льда и стереоскопического моделирования изменения объёма ледника – составляющие *способа стереоскопического моделирования динамики ледников*. По-видимому, данный способ можно применять и при исследовании динамики других объектов: например, при изучении движения оползня, оценивая при этом активную его часть, т.е. глубину оползающего склона, и определяя таким образом возможный объём при его катастрофической подвижке, а также при изучении динамики снега на лавиноопасных склонах, предшествующей сходу лавин.

**Темпы изменения оледенения Эльбруса за 50 лет (1957–2007 гг.) и с середины XIX в.**

В табл. 2 приведены площади ледников Эльбруса и оледенения в целом по состоянию на 1957, 1979, 1997 и 2007 гг., полученные инструментально, а также данные по линейному сокращению фронта ледников и изменению высотных отметок их окончаний. Видно, что в 2007 г. площадь оледенения Эльбруса в горизонтальной

проекции составляла 120 км<sup>2</sup>, или приблизительно 128 км<sup>2</sup> физической поверхности при средней крутизне склонов 20°. За 50 лет площадь Эльбруса сократилась на 12,5 км<sup>2</sup>, или в среднем на 0,25 км<sup>2</sup> в год. Интересны данные по интенсивности сокращения площади оледенения Эльбруса не только за последние 50 лет, но и за гораздо больший период – с середины XIX в. (табл. 3, рис. 3). Так, в 1850–2007 гг. интенсивность сокраще-

Таблица 2. Основные параметры изменения ледников Эльбруса за 50 лет (1957–2007 гг.)

Ледник	Площадь ледников в горизонтальной проекции, км <sup>2</sup>				Нижняя отметка фронта ледников, м 1957 г./ 2007 г.	Линейное отступление фронта ледников, м 1957–2007 г.
	1957 г.	1979 г.	1997 г.	2007 г.		
Вершины Эльбруса	4,818	4,818	4,818	4,818	–	–
Уллучиран	12,124	12,277	12,301	11,848	3006/3024	69
Карачаул	5,748	5,538	5,485	5,373	3070/3129	242
Уллукол и Уллумалиендерку	5,186	4,960	4,882	4,700	3136/3189	305
Микельчиран	4,834	4,670	4,604	4,460	3246/3254	198
Ледяное плато Джикиуганкез	29,042	27,295	25,581	23,409	3144/3182	770
Ирикчат	1,806	1,735	1,680	1,525	3190/3299	547
Ирик	10,995	10,763	10,671	10,477	2608/2651	578
Терскол	6,988	6,901	6,975	6,761	2925/2983	225
Гарабаши	4,911	4,744	4,689	4,544	3250/3290	152
Малый Азау	8,806	8,508	8,363	8,125	3020/3120	404
Большой Азау	21,032	20,677	20,460	20,228	2410/2575	1532
Уллукам	1,620	1,561	1,440	1,430	3080/3085	14
Кюкюртюлю	7,039	7,226	6,913	6,803	2770/2778	20
Битюктыбе	2,170	1,997	2,212	2,210	2309/2310	5
Висячие ледники № 1–9	5,395	4,058	3,783	3,292	–	–
Оледенение Эльбруса в целом	132,51	127,728	124,85	120,003	–	–

Таблица 3. Сокращение площади оледенения Эльбруса и плато Джикиуганкез с середины XIX в. по периодам

Параметры	Период, годы							
	1850–1887	1887–1957	1957–1979	1979–1997	1997–2007	1850–2007	1887–2007	1957–2007
Изменение площади оледенения в целом, км <sup>2</sup>	11,643	15,002	4,786	2,878	4,850	39,156	27,513	12,511
Изменение площади плато Джикиуганкез, км <sup>2</sup>	3,070	2,720	1,447	1,714	2,172	11,423	8,353	5,633
Соотношение изменений площадей плато и оледенения в целом, %	26,3	18	36,5	59,5	45,0	29,2	30,4	45,0
Интенсивность сокращения площади оледенения в целом, км <sup>2</sup> /год	0,315	0,214	0,217	0,159	0,479	0,249	0,228	0,249
Интенсивность сокращения площади оледенения без плато, км <sup>2</sup> /год	0,240	0,175	0,138	0,065	0,267	0,173	0,159	0,137
Интенсивность сокращения площади плато Джикиуганкез, км <sup>2</sup> /год	0,083	0,039	0,079	0,095	0,217	0,071	0,070	0,112

Таблица 4. Основные среднегодовые изменения объёма некоторых ледников южного склона Эльбруса с середины XIX в. по периодам, км<sup>3</sup>/год

Период, годы	Ледник		
	Большой Азау	Гарабаша	Джикиуганкез
1850–1887	–0,010	–0,001	–0,016
1887–1957	–0,008	–0,001	–0,016
1957–1979	–0,005	+0,002	–0,008
1979–1997	–0,011	–0,002	–0,018
1997–2007	–0,012	–0,007	–0,026

ния была такой же, как и за последние 50 лет. Правда, за 1997–2007 гг. данная цифра возросла (табл. 4). По-видимому, это связано с резко отрицательным балансом массы ледников на Центральном Кавказе в 1997–2001 [13] и 2005–2007 гг. [16, 21]. Однако если анализировать несколько больший период, например 1979–2007 гг., то интенсивность сокращения площади оледенения приблизительно соответствует начальному периоду наблюдений (1850–1887 гг.).

Необходимо отметить значительную роль плато Джикиуганкез в уменьшении площади оледенения Эльбруса. Под названием «плато Джикиуганкез» объединяются два ледника северо-восточного склона оледенения, которые невозможно строго разграничить: Чунгурчатчиран и Бирджалычиран. За последние 50 лет доля этого плато в изменении площади оледенения достигла 45%. Если рассматривать площадь оледенения без плато, то интенсивность его сокращения неуклонно снижалась с середины XIX в. и лишь в последнее десятилетие снова достигла величины периода 1850–1887 гг. (см. табл. 3).

Изменения объёмов оледенения анализировалось по тем же периодам, но было ограничено 1997 г. [7]. Окончательная обработка материалов космической съёмки со спутника Cartosat-1 позволит установить изменение объёма оледенения за последнее десятилетие. В настоящее время эти изменения установлены только для некоторых ледников южного склона (см. табл. 4).

За последние 10 лет (1997–2007 гг.) (см. табл. 4) темпы деградации ледников увеличились. По мнению О.В. Рототаевой с соавторами [17], во время трёх летних периодов (1998–2000 гг.) таяние на ледниках Эльбруса было поистине катастрофическим, что связано с высокими летними температурами. В.В. Поповнин и Д.А. Петраков также отмечают резко отрицательный баланс массы на леднике Джанкуат за 2005–2007 гг. [16, 21]. Кроме того, из табл. 4 видно, что на всех рассматриваемых ледниках южного склона Эльбруса темпы де-

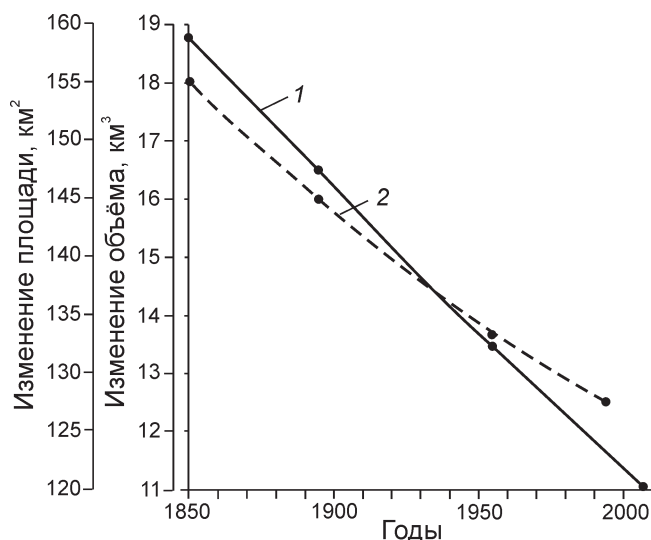


Рис. 3. Изменение площади и объёма оледенения Эльбруса: 1 – изменение площади оледенения за период 1850–2007 гг.; 2 – изменение объёма оледенения за период 1850–1997 гг.

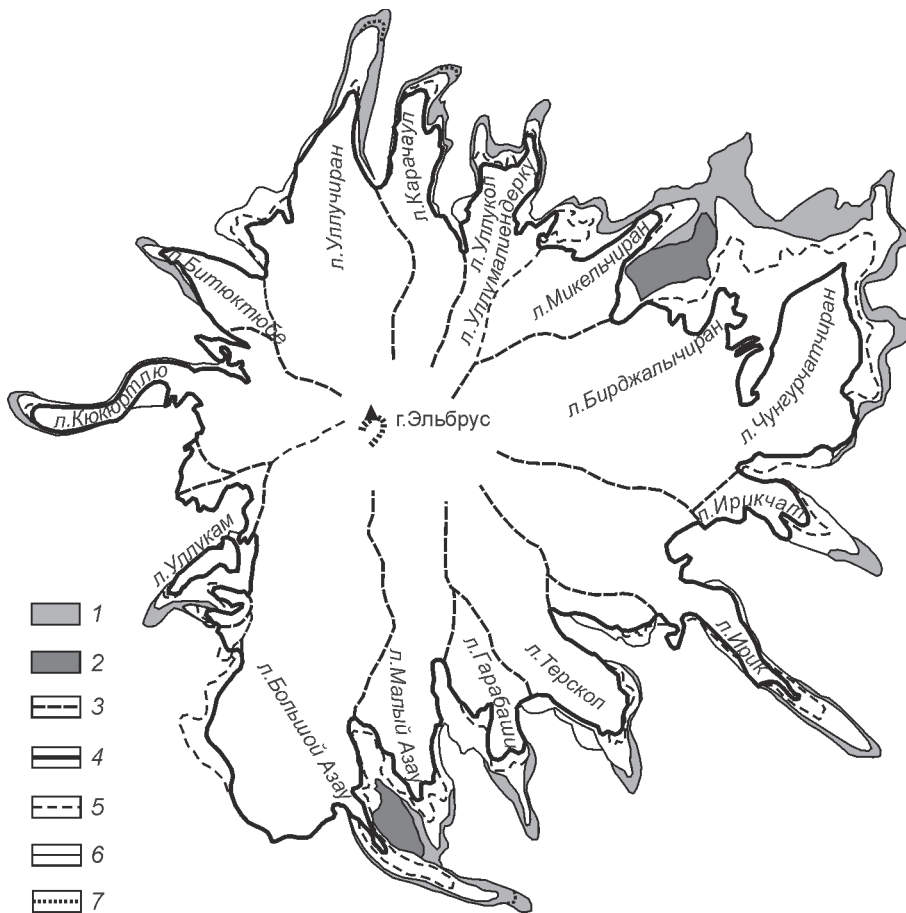
Fig. 3. Changes in the area and volume of the Elbrus glaciation: 1 – changes in the area for 1850–2007; 2 – changes in the volume for 1850–1997

градации в 1970-е годы снизились, что, очевидно, связано с общим понижением температуры воздуха в Северного полушария [10]. В.Д. Панов на основе инструментальных наблюдений определил, что наступание ледника Большой Азау в течение 1971–1979 гг. составило 120 м [14]. Общее снижение температуры воздуха отмечалось и в начале XX в. [10]. На основе многочисленных публикаций и материалов лихенометрической съёмки установлено практически синхронное наступание с последующим стационарированием ледников Джанкуат и Большой Азау в 1910–1920 гг. [3, 4].

32-летний ряд наблюдений (1968–2000 гг.) за балансом массы и пространственными изменениями на леднике Джанкуат показал, что температура воздуха – основная компонента, влияющая на абляцию ледника, а главная причина динамики его фронта – соотношение между поступлением льда на язык из области питания и его убылью на языке в результате абляции [4]. В этом и состоит основная причина разноплановости эволюции различных ледников, часто находящихся в одной ледниковой системе [2].

### Выводы

Материалы космической стереосъёмки со спутника Cartosat-1 с разрешением 2,5 м можно использовать для мониторинга горных ледников с достаточно большим интервалом времени – 10 лет и более. Установлена определяющая роль плато Джи-



**Рис. 4.** Изменение оледенения Эльбруса с конца XVII в.:

1 – площадь растаявших льдов за период 1700–1887 гг.; 2 – лавы; 3 – ледоразделы; границы ледника: 4 – 1997 г.; 5 – 1957 г.; 6 – 1887 г.; 7 – стадильные валы середины XIX в.

**Fig. 4.** Changes in the Elbrus glaciation from the end of the XVII century: 1 – area of ice that melted during 1700–1887; 2 – lava; 3 – glacial divides; glacier boundaries: 4 – 1997; 5 – 1957; 6 – 1887; 7 – stadal moraine line of the mid. XIX century

киуганкез в изменении масштабов оледенения Эльбруса. В последние 50 лет (1957–2007 гг.) 45% сокращения площади оледенения Эльбруса приходится на это плато. Количественные данные по изменению масштабов оледенения Эльбруса (рис. 3 и 4) показали, что на протяжении 150 лет уменьшение его площади и объёма было равномерным. Это позволяет сделать вывод, что глобальное потепление климата, сменяющееся кратковременными похолоданиями, началось ещё в середине XIX в., после окончания малого ледникового периода, и имеет не антропогенные, а естественные причины. Увеличение темпов деградации оледенения, которое отмечается в последнее десятилетие (1997–2007 гг.), по-видимому, связано с ростом летних температур воздуха и соответственно с отрицательным балансом массы ледников в Приэльбрусье вследствие резкого изменения соотношения между поступлением льда на ледник из области питания и его убылью на языке в результате абляции.

**Благодарности.** Авторы благодарят инженерно-технологический центр «СканЭкс» за предоставление материалов космической стереосъёмки Эльбруса со спутника Cartosat-1 в 2007 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 10-05-00453.

### Литература

1. Волков Н.М. Принципы и методы картометрии. М.: Изд-во АН СССР, 1950. 328 с.
2. Золотарёв Е.А. Изменение ледников Эльбруса в последнем столетии // МГИ. 1997. Вып. 83. С. 146–153.
3. Золотарёв Е.А. О конечной «морене 30-х годов» и размерах ледника Джанкуат // МГИ. 1999. Вып. 87. С. 146–153.
4. Золотарёв Е.А. Эволюция оледенения Эльбруса: Картографо-аэрокосмические технологии гляциологического мониторинга. М.: Научный мир, 2009. 238 с.
5. Золотарёв Е.А., Харьковец Е.Г. Стереоскопическое моделирование перемещения поверхности ледников по разновременным аэрофотоснимкам // МГИ. 1998. Вып. 84. С. 48–51.
6. Золотарёв Е.А., Харьковец Е.Г. Оледенение Эльбруса в конце XX в. (Цифровая ортофотокарта Эльбруса на 1997 г.) // МГИ. 2000. Вып. 89. С. 175–181.
7. Золотарёв Е.А., Харьковец Е.Г. Оценка деградации оледенения Эльбруса методами цифрового картографирования // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2007. № 5. С. 45–51.
8. Книжников Ю.Ф. Стереоскопический метод // Бюл. изобретений. 1971. № 15. С. 3.

9. Книжников Ю.Ф. Исследование движения льда горных ледников стереофотограмметрическим методом. М.: Наука, 1973. 120 с.
10. Котляков В.М. Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. 286 с.
11. Никулин Ф.В. Новый метод изучения механизма и скорости движения чехла обломков на крутых склонах // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1975. № 3. С. 82–88.
12. Никулин Ф.В., Федоренко В.С. Характерные особенности смещения крупных оползневых массивов // Формирование оползней, селей и лавин: Инженерная защита территорий. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 64–79.
13. Оледенение Эльбруса. М.: Изд-во МГУ, 1968. 344 с.
14. Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 429 с.
15. Подоцерский К.И. Ледники Кавказского хребта // Зап. Кавказского отдела Русского геогр. общества. 1911. Т. 29. Вып. 1. 200 с.
16. Поповнин В.В., Петраков Д.А. Ледник Джанкуат за минувшие 34 года (1967/68–2000/01) // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 167–174.
17. Ротомаяева 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. 2003. Вып. 95. С. 111–121.
18. Сейнова И.Б., Золотарёв Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья (Эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001. 203 с.
19. Склоновые процессы (Фотограмметрический метод изучения склоновых процессов): Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 1977. 167 с.
20. Цифровая стереоскопическая модель местности: Экспериментальные исследования. М.: Научный мир, 2004. 243 с.
21. Glacier Mass Balance Bulletin. 2009. № 10. P. 68–72.
22. Groverman B., Landsberg H. Reconstruction of Northern Hemisphere temperature: 1579–1980. Meteorology Program. Unit of Mariland. Publ. № 79–181. June 1979. 46 p.
23. Climate change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC. Cambridge University Press, 2001. 881 p.

## Summary

The results of remote monitoring of the greatest in Europe mountain glaciation of Elbrus are covered for 120 years by instrumental survey (1887–2007) and lichenometric survey in 1986. The materials of stereoscopic digital photo survey of the whole glaciation with terrain resolution of 2.5 meters produced by space imaging system Cartosat-1 (IRS-P5) in 2007 were compared with the same year materials of phototheodolite survey of south glaciation slope (6 glaciers in total). Results of comparison showed that the data received from Cartosat-1 can be used for monitoring of glaciers with long enough interval of time between repeated surveys (from 10 years and more), and also is suitable for updating 1:25 000 topographic maps of mountain areas. The leading role of Dzhikiugankez plateau in changes was revealed. Over the last 50 years (1957–2007) the Dzhikiugankez share in change of the glaciation area as a whole has reached 45%. The method of glacier dynamics research, based on digital technologies of image processing and assuming first of all visual deciphering of changes and in the second – measurement of parameters of changes is offered. The quantitative data of Elbrus glaciation reduction since the middle of the XIX century do not confirm the hypothesis of the global climate warming beginning just in the second half of XX century as a result of anthropogenic greenhouse gases effect. Contrarily in 1970s, many Elbrus glaciers advanced. Elbrus glaciation area reduction is occurring practically evenly through time and is alternated with short-term periods of stationary state and advance. These facts suggest that global climate warming, which alternated with short-term cooling periods, began after the end of the Little Ice Age and was most likely due to natural rather than anthropogenic causes.