

# Экспресс-информация

УДК 551.321.61

## Изменение ледника Марух с 1945 по 2011 г.

© 2012 г. С.С. Кутузов<sup>1</sup>, И.И. Лаврентьев<sup>1</sup>, Ю.Я. Мачерет<sup>1</sup>, Д.А. Петраков<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва; <sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
*s.kutuzov@gmail.com*

Статья принята к печати 15 ноября 2011 г.

Изменение объёма и площади, Кавказ, ледник, радиозондирование, толщина льда.  
Caucasus, glacier, ice thickness, radio-echo sounding, surface area and volume change.

Летом 2011 г. проведены полевые исследования на леднике Марух в западной части Северного Кавказа. Работы включали в себя наземные радиолокационные измерения толщины льда и съёмку поверхности ледника с помощью двухчастотного дифференциального GPS-приёмника. Анализ аэрофото- и космических снимков, а также топографических карт позволил оценить изменение площади и объёма ледника с 1945 по 2011 г. Установлено, что ледник находится в стадии отступления и за последние 66 лет сократил свою площадь на 17%. В настоящее время объём ледника Марух составляет 0,276 км<sup>3</sup> льда, что меньше на 0,06 км<sup>3</sup> по сравнению с 1967 г.

Горно-долинный ледник Марух находится на северном склоне Главного Кавказского хребта, в его западной части (рис. 1). В 1966/67–1981/82 гг. на леднике проводились исследования балансов тепла, льда и воды по программе Международного гидрологического десятилетия (МГД). Работы вели сотрудники Института географии АН СССР (сейчас Институт географии РАН) и Ростовской гидрометеорологической обсерватории СКГМУ. Кроме изуче-

ния водно-ледового и теплового балансов, в 1967 и 1977 гг. на леднике были выполнены повторные фототеодолитные съёмки, а в 1967 г. – дополнительно гравиметрические и радиолокационные измерения толщины льда. Итоги этих работ опубликованы в монографии «Ледник Марух» [3]. В дальнейшем исследования на леднике ограничились наблюдениями за изменением конца ледника, проводившимися с 1964 г. СКГМУ [6].



**Рис. 1.** Ледник Марух.  
На врезке показано положение ледника  
**Fig. 1.** Marukh Glacier.  
Glacier location is shown in the box

Цель наших исследований – оценка изменений площади и объёма ледника Марух с 1945 по 2011 г. Для этого летом 2011 г. проведены топографическая съёмка поверхности ледника и наземные радиолокационные измерения толщины льда, проанализированы также имеющиеся аэрофото-, космические снимки и топографические карты.

### Полевые исследования

Полевые исследования на леднике Марух с 22 по 25 августа 2011 г. вели сотрудники Института географии РАН и МГУ имени М.В. Ломоносова. Выполнялись наземные радиолокационные измерения и съёмка поверхности ледника с помощью двухчастотного дифференциального GPS-приёмника (DGPS) Topcon GB 500 (рис. 2). Радиолокационные измерения проводились в течение двух дней по сети профилей общей протяжённостью 14,3 км, в том числе 0,8 км – на отделившемся леднике, названном нами «ледник Марушонок». Использован моноимпульсный радиолокатор ВИРЛ-6 (20 МГц) с цифровой регистрацией радарных и GPS-данных с интервалом 0,2–1 с. Съёмка DGPS выполнена вдоль сети профилей в кинематическом режиме с интервалом 10 м. Горизонтальная и вертикальная ошибки не превышали 0,15 м. Общая протяжённость профилей – 14,6 км (около 1460 точек измерений). Кроме съёмки ледниковой поверхности, проведены измерения на освобожденных ото льда участках – в точках, маркирующих положение конца языка, а также сделана геопривязка характерных контрольных точек.

Ледник Марух покрыт сетью поперечных (а в центральной части и продольных) трещин и разломов шириной до 3–5 м, что существенно затрудняло передвижение по его поверхности. Фирновая линия в конце августа находилась на высоте 2930–2940 м, а толщина снега в шурфе вблизи неё составляла 85 см. В предполье ледника отмечена серия моренных гряд высотой до 1,5 м, предположительно фиксирующих положение конца языка в разные годы.

### Методика обработки данных

Радиолокационные данные обрабатывались с помощью пакета программ RadexPro 3.1 [2]. На большинстве профилей получены идентифицируемые отражения от ложа (рис. 3, б), однако наличие многочисленных трещин на поверхности ледника и сильное рассеяние в толще, типичное для тёплых ледников, насыщенных талой водой, в ряде случаев затрудняло интерпретацию радарных записей. Данные по десяти пересечениям профилей радиозондирования показали хорошее соответствие – среднеквадратическое отклонение для толщины льда составляло  $\pm 2$  м. Для пересчёта измеренных времён запаздывания сигналов, отражённых от ложа, в толщину льда использовалась средняя скорость распространения радиоволн в тёплом льду, равная 168 м/мкс.

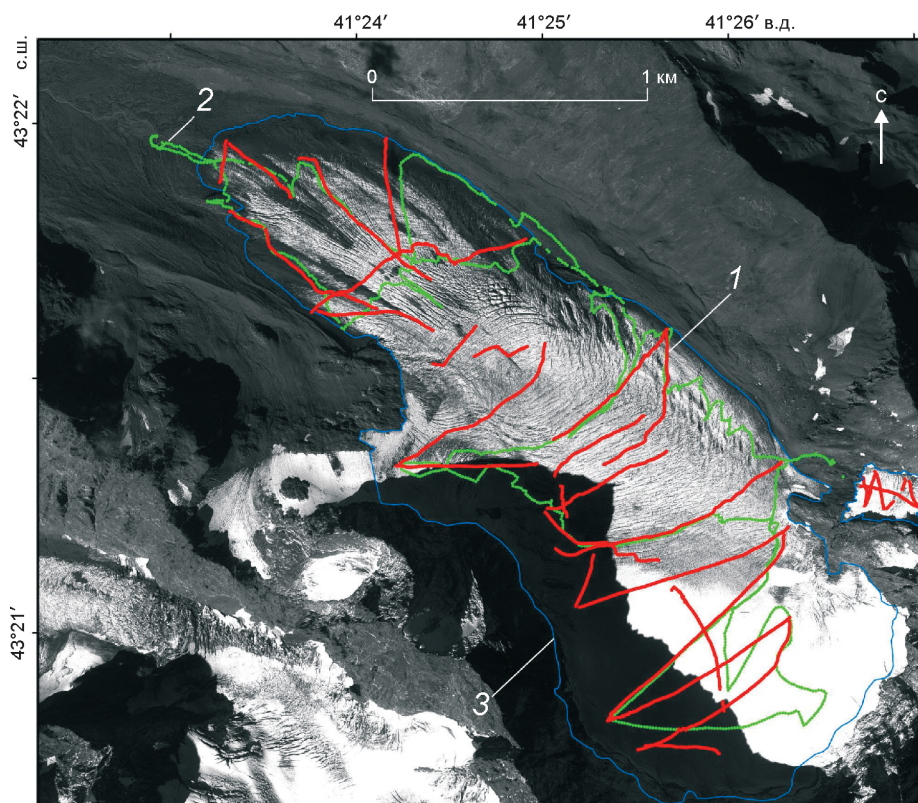
Для оценки пространственных изменений ледника Марух с 1945 по 2011 г. использованы: аэрофото-

снимки 1945, 1955 и 1987 гг.; данные фототеодолитных съёмок 1967 и 1977 гг.; космические изображения со спутников Terra (ASTER) 2006 г. и EROS-B 2011 г. В нашем распоряжении была также топографическая карта масштаба 1:25 000, составленная по материалам аэрофотосъёмки 1958 г. Однако анализ её показал, что карта содержит большие ошибки по высоте, особенно в области аккумуляции, поэтому использовать её для оценки изменений исследуемых параметров ледника нельзя. Привязку снимков вели по стандартной методике в программной среде ERDAS Imagine 9.1. Она включала в себя следующие процедуры: перевод всех изображений в прямоугольную проекцию UTM WGS 1984 zone 37; привязку снимка EROS-B 2011 г. (разрешение 0,7 м) с использованием интерактивных и наземных контрольных точек; последовательную привязку остальных изображений. Погрешность привязки аэрофотоснимков не превышала 10 м. При дешифрировании границы ледника возможные изменения в верхней части области аккумуляции мы не учитывали, так как верхняя граница проходит вдоль крутых склонов г. Кара-Кая и меняется мало.

Для определения изменений высоты поверхности ледника использовались цифровые модели рельефа (ЦМР) поверхности ледника, построенные по материалам фототеодолитной съёмки 1967 г. и DGPS-съёмки 2011 г. При построении ЦМР применяли программу ArcGIS 9.2. Основой для ЦМР 1967 г. служила картосхема масштаба 1:50 000 с сечением рельефа 20 м [1]. Если покрытие точек съёмки 2011 г. было недостаточным, то брали данные GPS-измерений, записанные в процессе радиолокационной съёмки. При этом в результаты GPS-измерений вводили поправки, полученную при сравнении с данными DGPS-съёмки в точках пересечения профилей. Поправка зависела от расположения точки измерения. Её величина не превышала 12 м и в среднем составляла 5,6 м. Чтобы оценить точность, мы сравнили разновременные ЦМР для участков, свободных ото льда в предполье ледника. Расхождения в высотах поверхности в среднем были равны 3 м. Однако в верхней части ледника, на крутых склонах, эти расхождения были значительно больше, в первую очередь из-за мелкого масштаба картосхемы 1967 г.

### Полученные результаты

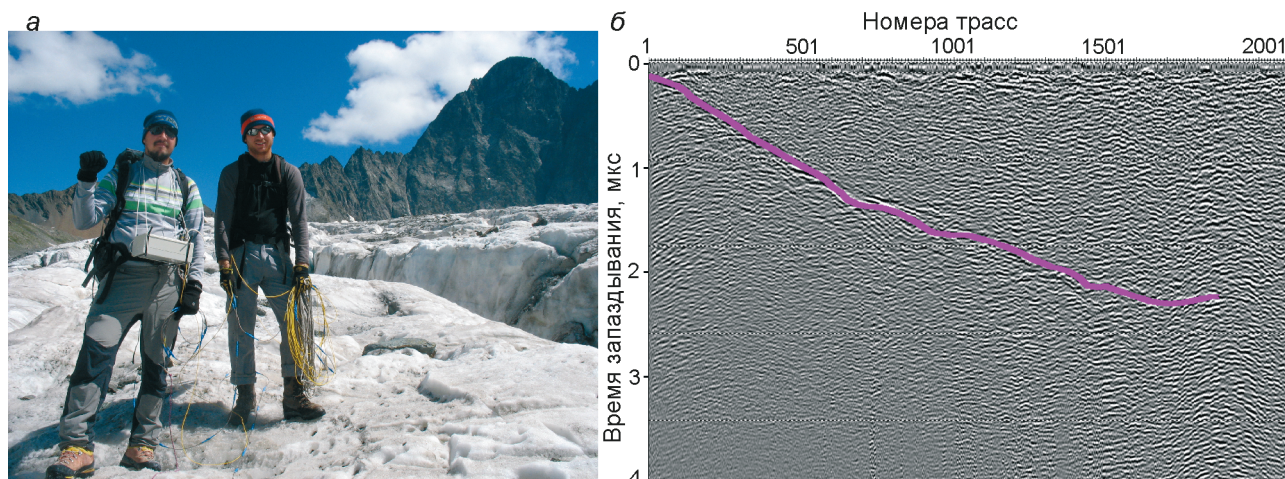
**Изменение площади ледника.** В результате сравнения аэрофото- и космических снимков установлено, что за 66 лет (с 1945 по 2011 г.) площадь ледника Марух уменьшилась на 0,57 км<sup>2</sup> (17%), при этом за последние 5 лет (2006–2011 гг.) она сократилась на 0,067 км<sup>2</sup> (2,3%) (таблица, рис. 4, б). В 1990-х годах от ледника Марух окончательно отделился его верхний правый приток (рис. 5). В настоящее время площадь ледника Марух составляет 2,76 км<sup>2</sup>, площадь отделившегося от него ледника Марушонок – около 0,043 км<sup>2</sup>. Перепад высот ледника Марух – 642 м (2518–3160 м), средний уклон поверхности 13°. Полученные результаты совпадают с данными преды-



**Рис. 2.** Профили наземного радиолокационного зондирования (1) и съёмки DGPS (2) на леднике Марух и отделившемся от него леднике Марушонок в 2011 г.

Показана граница ледника в 2011 г. (3). На заднем плане – космический снимок EROS-B от 14 сентября 2011 г.

**Fig. 2.** Ground based radar (1) and DGPS (2) profiles at the Marukh Glacier and at its separated part (Marushonok Glacier) are shown. Marukh Glacier boundary of 2011 is also shown (3). EROS-B 14.09.2011 г. used as a background



**Рис. 3.** Радиолокационные измерения на леднике Марух с локатором ВИРЛ-6 (а) и пример радиолокационной записи (б)

дущих исследований ледников Северного Кавказа [6, 7] и свидетельствуют о замедлении темпа отступления ледников Кавказа в конце 1980-х годов и последующем росте в начале XXI в.

**Изменение объёма и толщины ледника.** Изменение объёма определялось путём сравнения ЦМР 1967 и 2011 гг. Установлено, что на всей площади ледника происходило понижение его поверхности

Изменение размеров ледника Марух за 1945–2011 гг.

Год	Площадь, км <sup>2</sup>	Объём, км <sup>3</sup>	Источник
1945	3,37	Не определялся	Аэрофотосъёмка
1955	3,3		
1967	3,26	0,272; 0,333**	Фототеодолитная съёмка, гравиметрия [3]
1977	3,2	0,325***	Фототеодолитная съёмка [3]
1987	3,03	Не определялся	Аэрофотосъёмка
2006	2,82; 2,87*		ASTER
2011	2,76; 2,803*	0,276	EROS-B, радиозондирование

\*С учётом отделившегося ледника Марушонок.

\*\*Измеренное нами значение с учётом изменений объёма за 1967–2011 гг.

\*\*\*Данные об изменении объёма за 1967–1977 гг. взяты из работы [3].

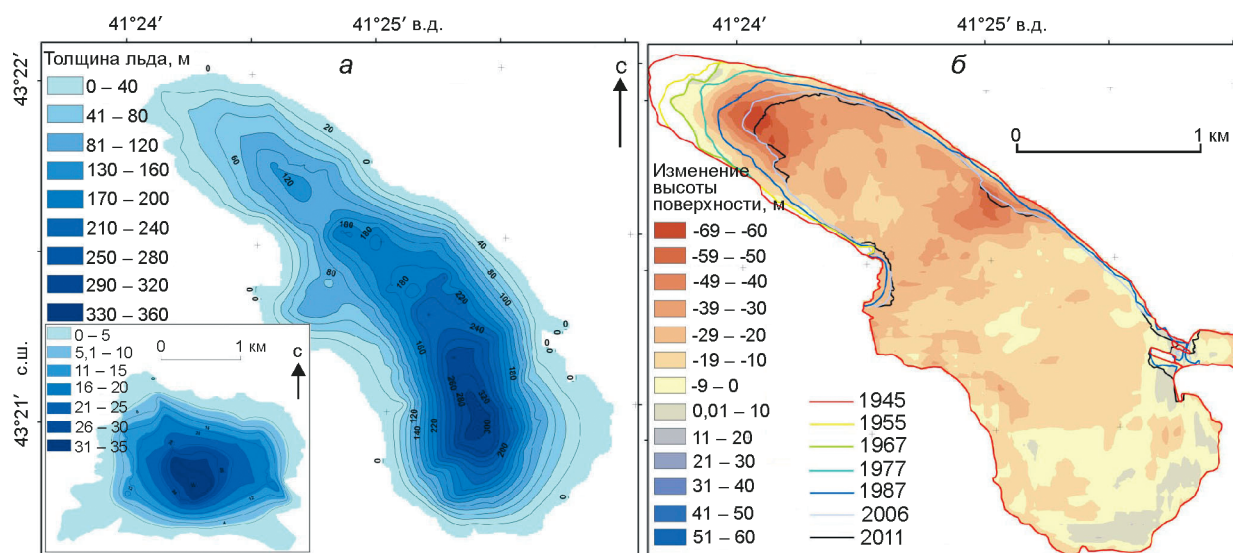


Рис. 4. Толщина льда ледников Марух и Марушонок по данным радиозондирования 2011 г. (а); границы ледника Марух в 1945–2011 гг. и изменение высоты поверхности за 1967–2011 гг. (б)

Fig. 4. Ice thickness of Marukh and Marushonok glaciers by radio-echo sounding data of 2011 (a); glacier outlines in 1945–2011 and surface elevation changes in 1967–2011 (b)

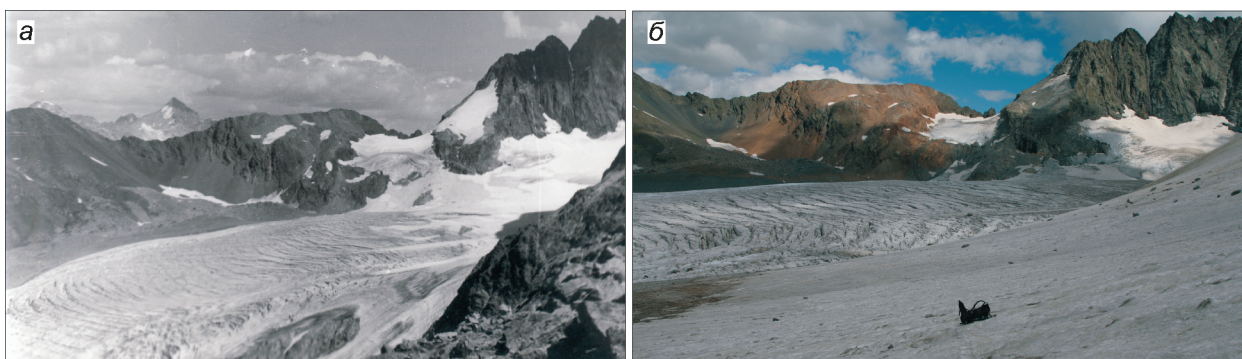
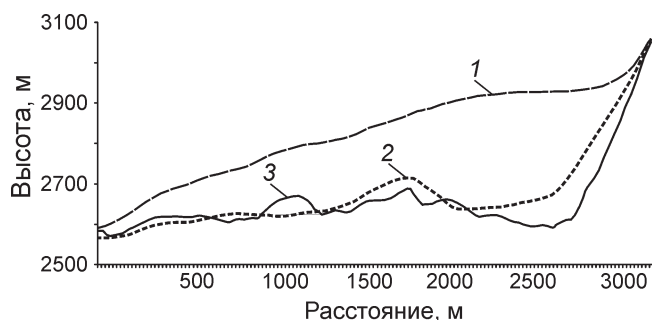


Рис. 5. Верхняя часть ледника Марух: а – 1971 г. (фото К.Е. Смирнова); б – 2011 г. (фото И.И. Лаврентьева).

Видно, что приток ледника отделился (отделившаяся часть названа нами «ледник Марушонок»)

Fig. 5. Upper part of the Marukh Glacier: a – 1971 г. (photo by K.E. Smirnov); б – 2011 г. (photo by I.I. Lavrentiev. Note glacier tributary separation (separated part is named «Marushonok»)



**Рис. 6.** Продольный профиль ледника Марух:  
1 – поверхность ледника в 1967 г.; 2 – результаты гравиметрических измерений 1967 г. [3]; 3 – данные радиозондирования 2011 г.

**Fig. 6.** Marukh Glacier longitudinal profile:  
1 – glacier surface of 1967; 2 – gravity measurements completed in 1967 [3]; 3 – radio-echo sounding data of 2011

со средней скоростью 0,4 м/год. При этом максимальные изменения характерны для области абляции (ниже 2800 м), где поверхность понизилась в среднем на 30 м, а максимально – на 70 м. По нашим данным, объём ледника Марух за 44 года уменьшился на 0,06 км<sup>3</sup> льда.

В результате радиолокационных измерений на леднике Марух создана карта толщины льда (см. рис. 4, а). Максимальная и средняя толщина льда равны 333 и 97 м соответственно, объём ледника – 0,276 км<sup>3</sup>. Толщина льда максимальна в области аккумуляции; в средней части ледника находятся два ригеля. Максимальная и средняя толщина льда отделившегося ледника Марушонок составляет 35 и 11 м соответственно, а его объём – 0,0005 км<sup>3</sup> (см. таблицу).

В целом полученные данные согласуются с гравиметрическими измерениями 1967 г. При этом максимальная толщина льда отличается на 19% (270 м), что почти на порядок больше точности измерения толщины льда радиолокационным методом (2–3%) [5]. Объём ледника (0,272 км<sup>3</sup>), согласно этим данным, также очень близок к современному. Кроме того, результаты радиозондирования свидетельствуют о более сложном, но близком по характеру подлёдному рельефе, в том числе и в районе ригеля (рис. 6). На профилях радиолокационного зондирования, в области аккумуляции, зарегистрированы также отражения от внутренних слоёв ледника на глубинах 5–15 м, которые могут быть связаны с водоносными горизонтами в толще ледника вблизи границы фирн–лёд. Подобные горизонты обнаружены в шурфах во время работ по программе МГД [3].

Полученные данные показывают, что среди ледников Кавказа, на которых проводились геофизические измерения, толщина ледника Марух – одна из самых больших. Так, максимальная измеренная толщина в 7 км от языка ледника Безенги, по данным гравиметрических и радиолокационных измерений, составила 330 м [4].

## Заключение

Ледник Марух находится в стадии отступления и за последние 66 лет сократил свою площадь на 17%. Объём ледника Марух в настоящее время – 0,276 км<sup>3</sup> льда. За 44 года он уменьшился на 0,06 км<sup>3</sup>, объём отделившегося ледника Марушонок равен 0,0005 км<sup>3</sup>. Полученные данные об изменении объёма ледника крайне важны для оценки реакции ледников Кавказа на изменения климата и их вклада в речной сток. Недостаток фактических данных о толщине и объёме ледников Кавказа не позволяет точно оценить запасы льда в них и прогнозировать развитие оледенения в этом регионе. Использованный подход с применением дистанционных и наземных методов исследования позволяет оценить объём льда других ледников, а также запасы льда в ледниках Северного Кавказа в целом.

**Благодарности.** Авторы благодарят К.Е. Смирнова (Институт географии РАН) за помощь в организации и проведении полевых работ и А.А. Алейникова (ИТЦ «СканЭкс») за заказ прицельной космической съёмки и помощь в подборе космических снимков.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК–875.2011.5 и гранта РФФИ № 11-05-00728-а.

## Литература

1. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. М.: изд. Российской академии наук, 1997. 492 с.
2. Кульницкий Л.М., Гофман П.А., Токарев М.Ю. Математическая обработка данных георадиолокации и система RADEXPRO // Разведка и охрана недр. 2001. № 3. С. 6–11.
3. Ледник Марух. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 254 с.
4. Мачерет Ю.Я., Лучининов В.С. Интерпретации результатов контактной радиолокационной съёмки тёплых горных ледников // МГИ. 1973. Вып. 22. С. 45–57.
5. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 389 с.
6. Панов В.Д., Ильичёв Ю.Г., Салпагаров А.Д. Колебания ледников Северного Кавказа за XIX–XX столетия. Пятигорск: Северокавказское изд-во МИЛ, 2008. 331 с.
7. Stokes C., Gurney S.D., Shahgedanova M., Popovnin V. Late-20<sup>th</sup>-century changes in glacier extent in the Caucasus Mountains, Russia/Georgia // Journ. of Glaciology. 2006. V. 52. № 176. P. 99–109.

## Summary

Field studies have been carried out in summer 2011 at Marukh Glacier located in western part of the Northern Caucasus. The studies included ground-based radio-echo sounding measurements at a frequency of 20 MHz and glacier surface elevation survey using a dual frequency differential GPS receiver. Changes of volume and surface area of the glacier for the period 1945–2011 have been estimated using aerial photo, satellite images and topographic maps analysis. It is founded that Marukh Glacier is retreating and has reduced its surface area by 17% for the past 66 years. Glacier volume is 0,276 км<sup>3</sup> in 2011 and has decreased by 0,06 км<sup>3</sup> since 1967.