

Динамика ледника Фишт (Западный Кавказ) в 1909–2015 гг.© 2017 г. А.В. Погорелов¹, Е.С. Бойко¹, Д.А. Петраков^{2*}, Е.Н. Киселев¹¹Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия;²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*dpetrakov@gmail.com

Fluctuations of the Fisht Glacier (West Caucasus) over 1909–2015A.V. Pogorelov¹, E.S. Boyko¹, D.A. Petrakov^{2*}, E.N. Kiselev¹¹Kuban State University, Krasnodar, Russia; ²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*dpetrakov@gmail.com

Received September 18, 2016

Accepted February 22, 2017

Keywords: aerial survey, climate change, digital elevation model, glacier dynamics, LIDAR, UAV, Western Caucasus.**Summary**

We have generalized observation data on the Fisht Glacier – the most western glacier in the Caucasus located at Pshekha and Belaya rivers headwaters at elevation 2450–2750 m asl. Considering location of the Fisht Glacier we might refer it as one of the most sensitive to climate change glaciers in the Caucasus. We used following materials: sketch map (1909), aerial photos (1954), topographic map (1957), detailed map (1:5000, 1982), LIDAR survey data (2010) and finally UAV data (2015). In two latter cases the horizontal and vertical uncertainties were less than 1 m. We note considerable shrinkage of glacier area from 0.9 ± 0.1 to 0.5 ± 0.01 km² in 1909–2015, retreat of glacier termini was assessed as 200 ± 20 m (eastern snout) and 350 ± 20 m (western snout). We consider that during 1982–2010 the glacier was close to equilibrium, but during 2010–2015 glacier surface elevation lowering up to 15–20 m was accompanied by abrupt decrease of glacier area at about 15%. According to the data from nearest weather stations (Guzerip' and Krasnaya Polyana) and snow surveys over Pshekha catchment rapid glacier downwasting in 2010–2015 could be explained by significant decrease of October–May (accumulation season) precipitation and snow thickness accompanied by increase June–September (ablation season) of air temperature in comparison to 1982–2010. During 2010–2015 mean ablation assessed through degree-day factor (DDF) was about 800 mm w.e. more than during 1982–2010. Basing on geodetical data on glacier change in 1982–2010 and ablation values assessed using DDF (4600 mm w.e.) we have roughly estimated mean accumulation at the Fisht Glacier as 4500 mm w.e. In 2010–2015 mean accumulation was at least 600 mm w.e. lower than in 1982–2010. As a result glacier in 2010–2015 the Fisht Glacier lost at least 1500 mm w.e. more than in 1982–2010. Basing on obtained results we could adjust regional pattern of glacier response to climate change in the Caucasus. Rarely applied in Russia both LIDAR and UAV techniques are recognized as precise tools for mapping of glacier surface in high mountains.

Citation: Pogorelov A.V., Boyko E.S., Petrakov D.A., Kiselev E.N. Fluctuations of the Fisht Glacier (West Caucasus) over 1909–2015. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017. 57 (4): 498–506. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-498-506

Поступила 18 сентября 2016 г.

Принята к печати 22 февраля 2017 г.

Ключевые слова: аэросъёмка, беспилотник, воздушное лазерное сканирование, динамика ледника, Западный Кавказ, изменения климата, цифровая модель рельефа.

Обобщены данные наблюдений за ледником Фишт – самым западным в ледниковой системе Кавказа. Результаты аэросъёмок и наземных измерений охватывают период 1909–2015 гг. За 100 лет (1909–2010 гг.) площадь ледника сократилась с 0,9 до $0,59 \pm 0,01$ км². В 2011–2015 гг. ледник сократился на 15% (до $0,5 \pm 0,01$ км²) вследствие изменений метеоусловий 2011–2015 гг. по сравнению с 1982–2010 гг. Апробированные на леднике технологии съёмки поверхности воздушным лазерным сканированием и с беспилотного летательного аппарата показали их применимость в горных условиях.

Постановка проблемы и обзор предыдущих исследований

На обширной территории Кавказа исследования современных изменений ледников сосредоточены почти исключительно на Центральном Кавказе. При этом Западный Кавказ, существен-

но отличающийся по климатическим условиям, морфологии и режиму ледников, остаётся почти не изученным. Формирование сезонного снежного покрова и осадков в разных секторах Кавказа имеет слабую пространственную корреляцию [1], что косвенно указывает на относительную независимость поведения ледников в этих секторах.

Анализ современных изменений размеров ледников на Западном Кавказе вносит свой вклад в представления о деградации горного оледенения, признаки усиления которой в последние годы отмечаются почти повсеместно.

Настоящая работа — продолжение исследований ледника Фишт (другое распространённое название — Большой Фиштинский ледник), ранее обобщённых в статье [2]. В основу исходных данных положены материалы Н.А. Морозова [3], результаты тахеометрической съёмки Б.А. Тарчевского в 1982 г., а также материалы воздушного лазерного сканирования (ВЛС) и аэрофотосъёмки 2010 г. В качестве дополнительных данных, развивающих представления о динамике и современном состоянии ледника, использованы результаты аэрофотосъёмки 1954 г., топографические материалы масштаба 1:25 000 за 1957 г. и измерения на леднике, сделанные в 2015 г.

Н.А. Морозову [3] принадлежит первое развёрнутое и квалифицированное исследование геологического строения района массивов Фишт и Оштен, на фоне которого весьма подробно рассматриваются и ледники этой территории. Исследование студента Морозова, содержащее «план Фиштинских ледников» по состоянию на начало осени 1909 г., не потеряло актуальности и сегодня. Результаты исследования ледника Фишт в 1929 г. опубликовал Г.Г. Григор [4, 5], у которого описание ледника Фишт в значительной степени совпадает с текстом Н.А. Морозова при одном существенном дополнении: у Г.Г. Григора приведена длина среднего языка (620 м).

В начале августа 1982 г. Б.А. Тарчевским в составе экспедиции Краснодарской краевой гидрометеорологической обсерватории выполнены первые инструментальные измерения ледника Фишт — тахеометрическая съёмка, по данным которой построен план в масштабе 1:5000. Во время съёмки почти весь ледник был покрыт снегом, отсюда и неточности в определении контуров ледника (особенно в тыловой части). Однако ценность съёмки состояла в получении высотных отметок, которые позволили в первом приближении оценить объёмные изменения ледника за последние десятилетия [2].

В сентябре 2010 г. выполнены воздушное лазерное сканирование и аэрофотосъёмка района массива Фишт. Использование технологии ВЛС для высокоточного описания гляциологических объектов в горах рассмотрено в работах [2, 6, 7]. В сен-

тябре 2015 г. на леднике сотрудниками кафедры геоинформатики Кубанского государственного университета и кафедры криолитологии и гляциологии МГУ имени М.В. Ломоносова выполнена съёмка с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Наш опыт применения БПЛА при исследовании ледников рассмотрен в работе [8].

Ледник Фишт — один из редких гляциологических объектов на территории России, где апробированы самые современные технологии высокоточных пространственных измерений. По материалам воздушного лазерного сканирования, уникального для ледников России, и аэрофотосъёмки 2010 г. построена детальная модель поверхности ледника и окружающих склонов с пространственным разрешением 1 м (рис. 1), которая служит картографической основой для последующих оценок эволюции объекта.

В публикации [2] отражены изменения ледника Фишт в 1909–2010 гг. по данным наблюдений из разных источников. Количественные оценки изменений получены по данным инструментальных измерений: тахеометрической съёмки 1982 г. и воздушного лазерного сканирования 2010 г. За 100 лет (1909–2010 гг.) площадь ледника уменьшилась с 0,9 до 0,59 км², отступление двух языков (ледник двуязычный) в плане составило 140 м для восточного языка и 275 м для западного. Вероятно, по причине различной интерпретации данных Морозова, наша оценка несколько расходится с данными исследования [9], указывающими на отступление восточного языка на 201,8 м за этот же период и практически не оцениваемыми отступление западного языка. В 1980–2010 гг. ледник находился в квазистационарном состоянии без существенных сокращений площади и понижения поверхности [2]. Однако фактическая площадь ледника в 1982 г. могла быть больше на 0,05 км², чем подсчитанное по плану (таблица) из-за неточностей в определении границ ледника в тыловой части. Снимок 1954 г. в сочетании с имеющейся ЦМР удачно дополнил хронологический ряд измерений ледника (рис. 2).

Объект исследования

Выбор в качестве объекта исследования ледника Фишт обусловлен относительно высоким уровнем его изученности, а главное — наличием инструментальных съёмок прошлых лет, включая

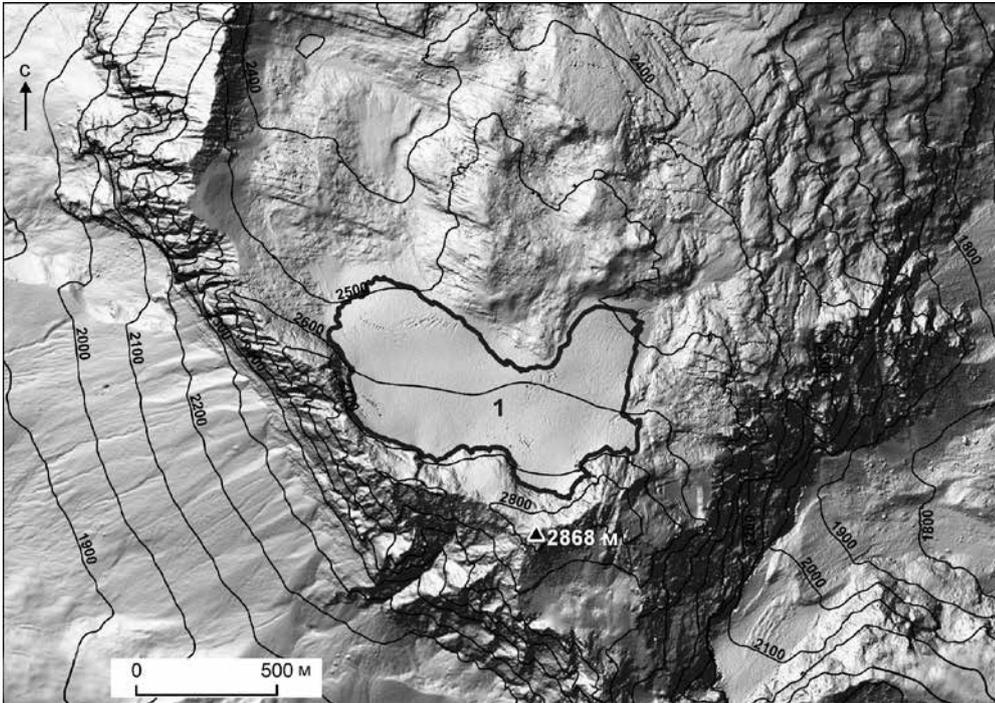


Рис. 1. Цифровая модель рельефа (светотеневая отмывка) в районе ледника Фишт.

Разрешение 1 м/пиксель. 1 – контур ледника Фишт в 2015 г.

Fig. 1. Digital elevation model (black and white wash-drawing) around the Fisht Glacier.

Spatial resolution 1 m/pixel. 1 – The Fisht Glacier outline in 2015

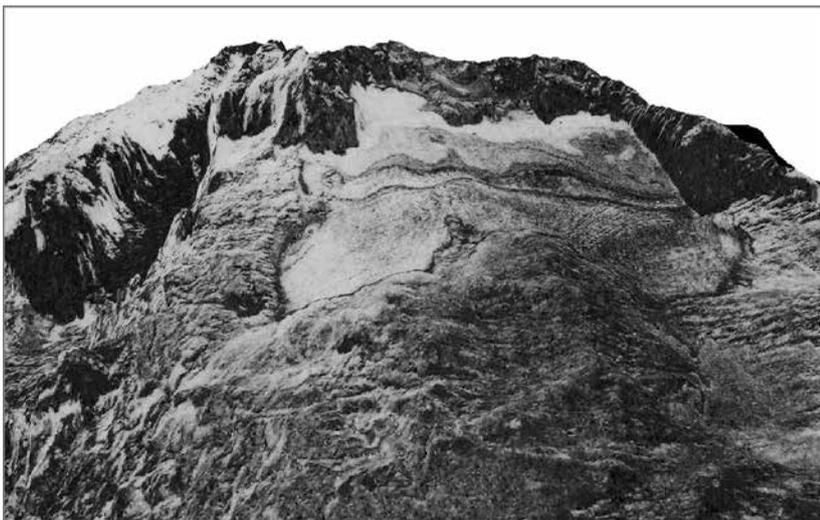


Рис. 2. 3D-модель рельефа, драпированная аэрофотоснимком 1954 г.

Fig. 2. 3D digital terrain model combined with aerial image in 1954

измерения положения конца ледника [9]. Кроме того, ледник отличается рядом гляциоклиматических и морфологических особенностей и интересен как географический объект. Гора Фишт (высшая отметка 2868 м) (см. рис. 2) расположена на Западном Кавказе в междуречье Белой и Пшехи; это – самый западный очаг современного оледенения на Кавказе. Горный массив Фишт сложен массивными юрскими рифогенными известняками. Поверхностный сток в районе ледника отсутствует из-за обилия рвов, трещин, воронок и других поверхностных и подземных карстовых форм.

Ледник Фишт отличается своеобразием морфологии и условий питания с коэффициентом концентрации снега близким к единице, что не характерно для ледников Кавказа. В Каталоге ледников [10] он отнесён к морфологическому типу висячий каровый, чрезвычайно распространённому в бассейне р. Кубань. В действительности, морфология ледника Фишт сочетает в себе черты карового ледника (имеется чашеобразная впадина в привершинной части склона, выработанная ледником) и ледника плоской вершины (находится на выровненной наклонной поверх-

Сведения о леднике Фишт из разных источников

Характеристика	Схема Н.А. Морозова (1909 г.) [3]	Аэрофотоснимок 22.09.1954 г.	Каталог ледников СССР [10]	В.Д. Панов, 1968 г. [12]	План Б.А. Тарчевского (1982 г.) [2]	Данные воздушного лазерного сканирования (сентябрь 2010 г.) [2]	Данные съёмки беспилотником (сентябрь 2015 г.)
Наибольшая длина, км	1,3	1,2	1,2	–	1,1	1,15±0,01	1,08±0,01
Площадь ледника, км ²	0,9	0,79	0,9	0,8	0,61	0,59±0,01	0,50±0,01
Высота нижней точки, м	2390	2430±10	2450		2450	2450±5	2480±5
Высота высшей точки, м	2790	2745±10	2750			2745±5	–
Высота фирновой линии, м	–	–	2640 (10.10.1965)	–	–	2620*±5	2615*±5
Общая площадь области абляции, км ²	–	0,47±0,01	0,6 (10.10.1965)			0,46±0,01	0,35±0,01

*Приведено среднее положение фирновой линии. Прочерки – нет сведений.



Рис. 3. Запуск малого беспилотника на леднике Фишт (24.09.2015)
Fig. 3. Take-off of small drone at the Fisht Glacier, 24 September 2015

ности) [11]. Согласно Каталогу ледников СССР, площадь ледника Фишт равна 0,9 км² при длине 1,2 км. По данным В.Д. Панова [12], в октябре 1965 г. площадь его была 0,8 км². При этом длина ледника, измеряемая от конца до верхней его границы, скорее характеризует его ширину, поскольку длинная ось расположена поперёк и вкось преобладающего движения льда.

Методика съёмки малым беспилотным летательным аппаратом

В 2015 г. на Фиштинском леднике авторами была выполнена стереофотосъёмка с помощью сверхлёгкого беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Методика подобной съёмки и дальнейшей обработки материалов для высокогорных ледников в 2014 г. была апробирована на леднике Колка [8] и показала хорошие результаты. Съёмка выполнялась камерами Canon с помощью малого квадрокоптера (рис. 3). Масса летательного аппарата с камерой не превышала 1,3 кг. Съёмка выполнялась по маршрутам. Всего были отсняты два маршрута и получено 343 фотографии, использованные при построении модели. В процессе стереофотосъёмки получены снимки местности с высоты 70–100 м с продольным перекрытием 65–75% и поперечным перекрытием не менее 30%. Пространственное разрешение снимков – 7 см. По техническим причинам в 2015 г. не удалось выполнить съёмку верхней трети ледника, однако, исходя из анализа материалов предыдущих лет, верхняя граница ледника претерпела минимальные изменения, сопоставимые с погрешностями съёмки. Именно поэтому верхняя граница ледника в 2015 г. на схемах совпадает с границей 2010 г.

Цифровое моделирование местности и рельефа по материалам съёмки с помощью малого БПЛА на первом этапе выполнялось в программе Agisoft Photoscan, куда были внесены снимки и координаты опознаков. При обработке в программе Agisoft Photoscan, помимо внутренних трёхмерных моделей, получены ортофотоплан и облако точек, конвертируемые во внешние форматы. Далее для создания модели рельефа использовались программное обеспечение TerraScan для фильтрации точек и разделения полученных материалов на классы, а также программы ArcGIS и SAGA для дальнейшей работы с моделями рельефа и местности.

Оценка точности съёмки 2010 и 2015 гг.

В результате аэросъёмки 2010 г., включавшей в себя воздушное лазерное сканирование и цифровую аэрофотосъёмку, получены облака точек лазерного отражения со средней плотностью не менее двух точек на 1 м^2 , а также аэрофотоснимки с пространственным разрешением не меньше 20 см. Точность съёмки соответствовала требованиям к созданию топографических карт и планов масштаба 1:2000 и была не меньше 30 см в плане и 15 см по высоте. Точность ортофотопланов, построенных по материалам аэрофотосъёмки 2010 г., выполненной синхронно с воздушным лазерным сканированием, также соответствовала заданным требованиям масштаба 1:2000.

Точность полученных моделей местности и рельефа по данным съёмки 2015 г. обусловлена параметрами планово-высотного обоснования

и характеристиками фотоснимков. Планово-высотное обоснование сделано в камеральных условиях по материалам съёмки 2010 г. В качестве геодезической планово-высотной основы использованы опорные точки, однозначно дешифрируемые на снимках 2010 и 2015 гг. Всего использовано 22 опорные точки. Для контроля точности применены внутренние инструменты программы Agisoft Photoscan, позволяющие вычислить средние и абсолютные погрешности точечной модели относительно опознаков. При построении модели проводилась интерактивная корректировка положения маркеров, совмещаемых с опознаками, что способствовало уточнению модели на локальных участках. Также использовалась процедура исключения маркеров из модели в случае больших значений погрешности из-за невозможности однозначной идентификации их на снимках либо ошибочности измеренных координат. Общая погрешность совмещения моделей 2010 и 2015 гг. составила 1,6 м, что вполне приемлемо для условий высокогорья. На основе полученных текстур созданы ортофотоплан и фотосхема участка ледника Фишт (рис. 4).

Результаты и их обсуждение

Сравнение двух последних съёмки показало, что в 2011–2015 гг. ледник потерял относительную устойчивость и отступил на $73 \pm 1 \text{ м}$ (восточный язык) и $56 \pm 1 \text{ м}$ (западный язык) (рис. 5). Площадь уменьшилась на $0,09 \pm 0,01 \text{ км}^2$ (15%), в области абляции понижение поверхности достигло 15–20 м. Скачкообразное сокращение размеров ледника в 2011–2015 гг. по сравнению с 1982–2010 гг. объяс-

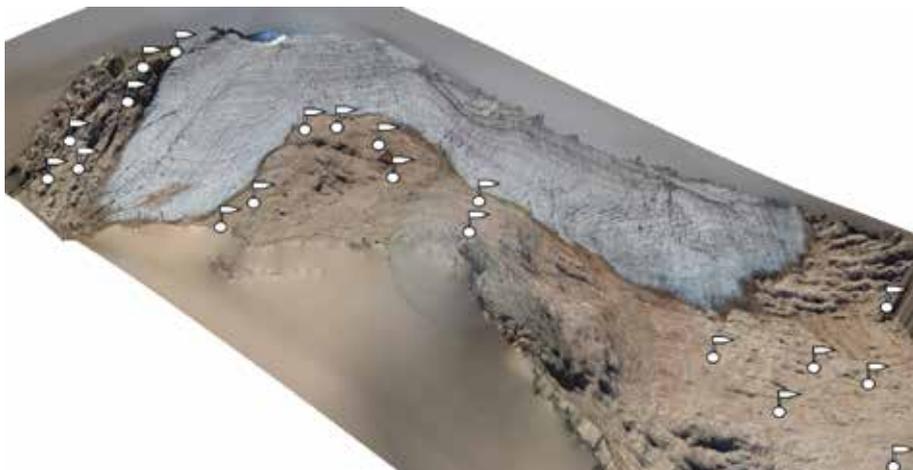


Рис. 4. Трёхмерная модель нижней части ледника Фишт, построенная по материалам съёмки беспилотником 2015 г. Флажками показано расположение опорных точек

Fig. 4. 3D digital terrain model for the lower part of the Fisht Glacier generated from drone images in 2015.

Location of ground control points is indicated by flags

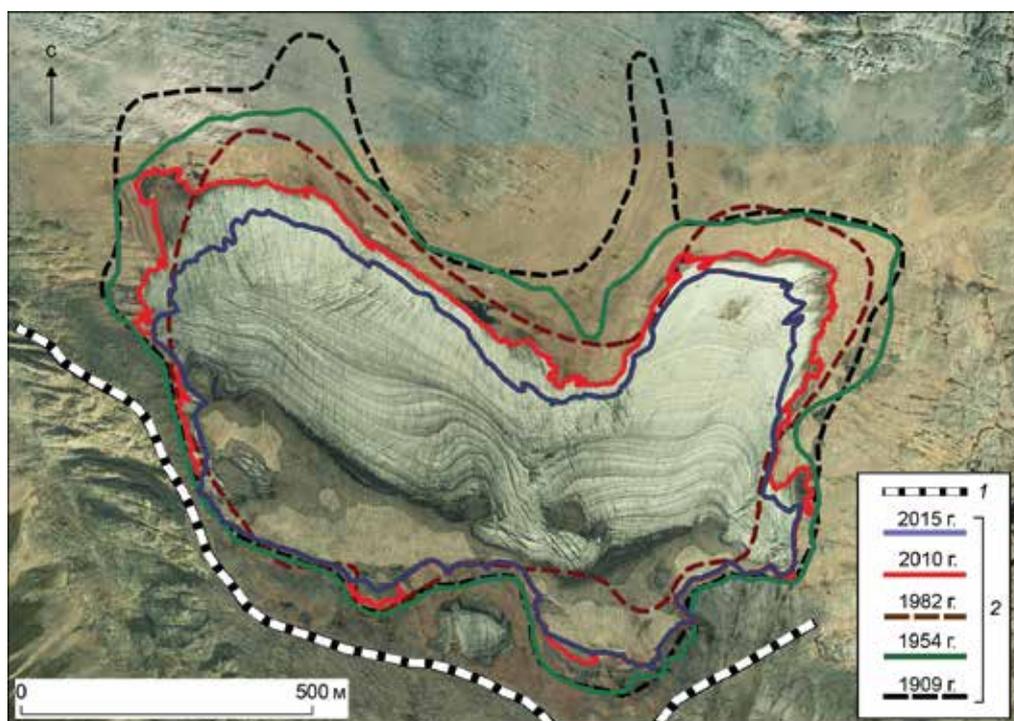


Рис. 5. Изменения площади ледника Фишт в 1909–2015 гг.

Ортофотоплан построен по данным аэросъёмки 2010 г. 1 – гребни горы Фишт; 2 – контуры ледника в разные годы

Fig. 5. Change of the Fisht Glacier area in 1909–2015.

Orthophotoplan has been created based on 2010 airborne survey. 1 – ridges of the Fisht summit; 2 – glacier outlines in different years

няется различиями метеорологических показателей соответствующих временных отрезков как в сезон абляции, так и в сезон аккумуляции ледника.

Для объяснения поведения ледника воспользуемся данными близлежащих горных метеостанций (ГМС) – Гузерипль и Красная Поляна. ГМС Красная Поляна расположена на высоте 566 м в долине р. Мзымта в 39 км юго-восточнее ледника и отражает характерные для данной территории климатические условия южного макросклона Кавказа, близкие к влажным субтропическим. Из наиболее существенных свойств климата – выраженный здесь зимний максимум осадков. ГМС Гузерипль находится на высоте 668 м в 20 км восточнее ледника Фишт в верховьях р. Белая. Этой территории свойственны климатические условия северного макросклона Кавказа вблизи его осевой части. Примечательная особенность – относительно «плоский» внутригодовой ход осадков со слабовыраженными летним и зимним максимумами. Поскольку ледник Фишт расположен в осевой зоне Главного Кавказского хребта, данные ГМС Красная Поляна (южный макросклон) и Гузерипль (северный макросклон) следует считать показатель-

ными в отношении условий аккумуляции/абляции ледника с поправками на вертикальные градиенты и местные орографические особенности.

Дополнительно использованы данные снегопункта 9 (СП-9) снегомерного маршрута с Черниговское – гора Фишт в бассейне р. Пшеха. СП-9 расположен на высоте 1570 м у границы леса в 7 км к северо-северо-востоку от исследуемого ледника. Ежегодные снегомерные измерения на маршруте проводятся обычно во второй декаде марта – в период максимального снегонакопления в бассейне р. Пшеха [1]. Снегомерный пункт репрезентативен для окрестностей ледника с позиции режима снежного покрова (данные А.В. Погорелова).

Среднегодовые значения температуры воздуха тёплого периода (июнь–сентябрь) по данным ГМС Гузерипль и Красная Поляна характеризуются весьма тесной связью со значением коэффициента корреляции $R = 0,97$. Связь осадков холодного периода (октябрь–май) несколько слабее, но всё равно достаточно тесная ($R = 0,83$). Связь снегозапасов на СП-9 с суммой осадков холодного периода на ГМС Гузерипль ($R = 0,07$) и Красная Поляна ($R = 0,14$) отсутствует. Причина, на наш

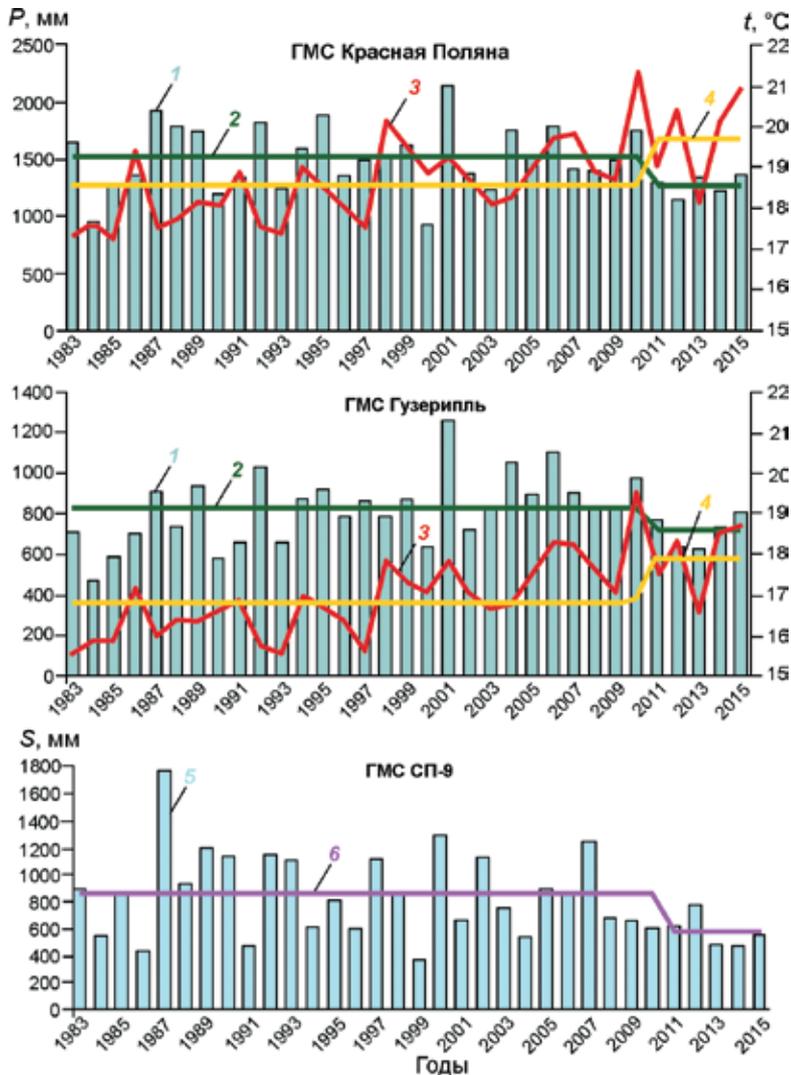


Рис. 6. Годовые (1) и средние за периоды 1982–2010 и 2011–2015 гг. (2) суммы осадков в период аккумуляции (октябрь–май), годовые (3) и средние за те же периоды (4) значения температуры воздуха в период абляции (июнь–сентябрь) по данным ГМС Красная Поляна и Гузерипль, годовые (5) и средние за те же периоды (6) значения снегозапасов по данным СП-9

Fig. 6. Annual (1) and mean for the periods 1982–2010 and 2011–2015 (2) precipitation sums for accumulation season (October–May), annual (3) and mean for the same periods (4) air temperature during ablation season (June–September) according to data from weather stations Krasnaya Polyana and Guzeripl', annual (5) and mean for the same periods (6) values of snow water equivalent according to data from SP-9

взгляд, в значимых различиях абсолютных высот и несовпадении продолжительности залегания устойчивого снежного покрова на снегопункте с принятым холодным периодом (октябрь–май).

Данные двух метеостанций (ГМС) показывают, что средняя температура воздуха в период абляции (июнь–сентябрь) в 2011–2015 гг. была на 1,1 °C выше, чем в 1982–2010 гг., а количество зимних осадков, напротив, на 250 мм, или на 16%, ниже на ГМС Красная Поляна и на 100 мм, или 12%, ниже на ГМС Гузерипль (рис. 6). Средние снегозапасы по данным СП-9 в 2010–2015 гг. были на 299 мм, или на 34%, ниже по сравнению с 1982–2010 гг. Как подобные изменения могли повлиять на баланс массы ледника? Судя по прямым наблюдениям на леднике Марух (Западный Кавказ), среднее таяние снега и льда из расчёта на 1 °C составляет 6,7 мм в.э. (ледник Марух, 1988 г.). При-

нимая во внимание продолжительность периода абляции порядка 100–120 дней, можно сказать, что в 2010–2015 гг. ежегодное таяние в среднем было больше на 800 мм в.э., чем в 1982–2010 гг.

Оценим влияние на режим ледника сокращения количества осадков в сезон аккумуляции. Учитывая квазистационарное состояние ледника в 1982–2010 гг., сделаем допущение, что аккумуляция в этот период была близка к величине абляции. Средняя температура в период абляции (июнь–сентябрь) по данным ГМС Красная Поляна равна 18,6 °C, а по данным ГМС Гузерипль – 16,8 °C. Для экстраполяции этих данных на ледник Фишт в первом приближении следует учесть следующие показатели: разность высот между метеостанциями и геометрическим центром ледника (около 2000 м); температурный градиент тёплого периода, который вслед за авторами работы [13] мы при-

маем равным $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ для северного склона (ГМС Гузерипль — ледник Фишт) и $0,56\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ для южного склона (ГМС Красная Поляна — ледник Фишт); температурный скачок на границе ледника, принимаем равным $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда среднюю температуру воздуха над ледником в период абляции в 1982–2010 гг. можно принять равной $+6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а абляцию — 4600 мм в.э. С учётом незначительного понижения поверхности ледника в 1982–2010 гг. аккумуляцию за этот период можно принять равной 4500 мм в.э. Это в три раза превышает суммарное количество осадков в октябре—мае по данным ГМС Красная Поляна (1520 мм , 1982–2010 гг.) и более чем в пять раз — количество осадков за тот же период по данным ГМС Гузерипль (820 мм). Принимая значение аккумуляции на леднике пропорциональным сумме осадков холодного периода на метеостанциях, получаем среднюю аккумуляцию на леднике Фишт в 2011–2015 гг. 3900 мм , т.е. на 600 мм меньше, чем в 1982–2010 гг.

Если принять уменьшение аккумуляции на леднике Фишт пропорциональным уменьшению снеготолщин на снегопункте СП-9, то оно составит около 1500 мм . Отметим, что после 2007 г. в верховьях рек Пшехи и Белой не было зим с экстремально большими снеготолщинами (см. рис. 6), т.е. с высокой аккумуляцией на леднике — с запасом снега на один год и более. Это должно было привести к уменьшению среднего значения альбедо в летний период и к дополнительному усилению таяния. Кроме того, определённый вклад в уменьшение аккумуляции способны внести повышенные температуры воздуха в мае (относительное повышение $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) и сентябре ($1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Последнее могло привести к изменению фазового состояния осадков в сторону увеличения их жидкой доли. Таким образом, в 2011–2015 гг. средний годовой баланс массы ледника Фишт был как минимум на 1500 мм меньше, чем в 1982–2010 гг. Сведения об изменении размеров ледника за период наблюдений обобщены в таблице.

Отметим, что на опорном для Кавказа леднике Джанкуат наблюдались схожие тенденции изменения баланса массы: если в 1982–2010 гг. его среднее значение составляло -170 мм [14, 15], то в 2011–2015 гг. оно было равно -1030 мм (неопубликованные данные В.В. Поповнина). На леднике Джанкуат переход баланса в область резко отрицательных значений произошёл раньше — в 2006 г. Схожие процессы в последние годы зафиксированы на ледниках

Карачаево-Черкесии: средние скорости отступления фронтов 18 ледников в 1967–2000 гг. составляли $3,8\text{ м/год}$, в 2000–2010 гг. скорости выросли более чем вдвое, а в 2010–2015 гг. достигли $15,2\text{ м/год}$ [16].

Заключение

Небольшой по площади ледник Фишт, самый западный из ледников Кавказа, находится на высотах $2450\text{--}2750\text{ м}$ на одноимённой горной вершине (2868 м). Он характеризуется невысоким скальным обрамлением и почти полным отсутствием моренного чехла, что вызывает его высокую чувствительность к текущим изменениям климата. Ледник Фишт, расположенный менее чем в 40 км от Чёрного моря, относится к числу наиболее «морских» ледников на Кавказе. Цифровые модели рельефа, составленные на основе лазерного сканирования (2010 г.) и стереосъёмки с борта беспилотника (2015 г.), вместе с планом Б.А. Тарчевского масштаба $1:5000$ (1982 г.) позволяют достаточно точно оценить изменения ледника в последние десятилетия.

В течение 1982–2010 гг. ледник находился в квазистационарном состоянии, его площадь уменьшилась на 4% , а поверхность снизилась в среднем на 2 м . В 2011–2015 гг. площадь ледника уменьшилась на 15% , достигнув $0,5\pm 0,01\text{ км}^2$, а поверхность в области абляции снизилась на $15\text{--}20\text{ м}$. Скачкообразное изменение состояния ледника объясняется заметным ухудшением условий питания на фоне усиления абляции. По данным близко расположенных ГМС Гузерипль и Красная Поляна в 2011–2015 гг. отмечены существенное уменьшение количества зимних осадков, одновременный рост летней температуры по сравнению с периодом 1982–2010 гг., а также резкое (на треть) уменьшение снеготолщин по данным снегомерного маршрута в верховьях р. Пшеха.

По нашим оценкам, в 2011–2015 гг. баланс массы ледника Фишт был резко отрицательным. Судя по данным об отступании фронтов ледников Карачаево-Черкесии и сведениям о балансе массы опорного для Кавказа ледника Джанкуат, период 2011–2015 гг. был весьма неблагоприятен и для оледенения Западного и Центрального Кавказа. Столь выраженное проявление негативной аномалии баланса на леднике Фишт объясняется, вероятно, его реакцией на изменения температуры воздуха и количества осадков в последние годы.

Литература

1. *Погорелов А.В.* Снежный покров Большого Кавказа: Опыт пространственно-временного анализа. М.: «Академкнига», 2002. 287 с.
2. *Погорелов А.В., Головань К.Р., Бойко Е.С.* Изменения ледника Фишт (Западный Кавказ) за период наблюдений // Географические исследования Краснодарского края. 2015. Вып. 9. С. 7–19.
3. *Морозов Н.А.* Геологические исследования в области массива Фишта и Оштена на Западном Кавказе // Изв. Санкт-Петербургского политехнич. ин-та. 1910. Т. 14. Вып. 2 и 3. С. 1–71.
4. *Григор Г.Г.* Описание ледников в верховьях рек Белой, Киши, Уруштена (Западный Кавказ) // Изв. Госуд. геогр. общества. 1932. Т. 64. Вып. 4–5. С. 343–351.
5. *Григор Г.Г.* Отчет о гляциологических работах 1929 и 1930 годов в районе Кавказского заповедника // Тр. Показательного Кавказского гос. заповедника. 1936. Т. 1. С. 58–66.
6. *Погорелов А.В., Бойко Е.С.* Исследование микро- и мезомасштабной структуры поля снежного покрова в горах на основе технологии лазерного сканирования // Лёд и Снег. 2010. № 2 (110). С. 35–42.
7. *Бойко Е.С., Погорелов А.В.* Применение лазерного сканирования в исследованиях рельефа и снежного покрова. Морфометрический аспект. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2012. 147 с.
8. *Коваленко Н.В., Петраков Д.А., Алейников А.А., Аристов К.А., Бойко Е.С., Дробышев В.Н., Черноморец С.С.* Гляциологический мониторинг ледника Колка в 2002–2014 гг. // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2015. Т. 15. № 4. С. 43–50.
9. *Ефремов Ю.В., Ильичев Ю.Г., Зимницкий А.В.* Изменение размеров оледенения в бассейнах рек Малая Лаба и Белая (Западный Кавказ) за последнее столетие // Лёд и Снег. 2014. № 4 (128). С. 43–53.
10. Каталог ледников СССР. Т. 8. Ч. 1–4. Бассейн р. Кубани. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 124 с.
11. Гляциологический словарь / Ред. В.М. Котляков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 526 с.
12. *Панов В.Д.* Ледники в верховьях Кубани. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 132 с.
13. *Давидович Н.В., Тареева А.М.* Составление гляциоклиматических карт масштаба 1:3 000 000 для Атласа снежно-ледовых ресурсов мира // МГИ. 1979 (1980). Вып. 37. С. 66–71.
14. *Поповнин В.В., Петраков Д.А.* Ледник Джанкуат за минувшие 34 года (1967/68–2000/01 гг.) // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 167–174.
15. Электронный ресурс <http://www.wgms.ch>
16. *Онищенко В.В., Дега Н.С., Тохчук Ш.Ю.* Геоэкологические особенности трансформации современного оледенения Карачаево-Черкесии // Изв. Дагестанского гос. педагогического ун-та. Сер. «Естественные и точные науки». 2016. № 1 (34). С. 97–102.

References

1. *Pogorelov A.V. Snezhnyi pokrov Bol'shogo Kavkaza: Opyt prostranstvenno-vremennogo analiza.* Snow cover of the Great Caucasus: Experience of spatial-temporal analysis. Moscow: Akademkniga, 2002: 287 p. [In Russian].
2. *Pogorelov A.V., Golovan' K.R., Boyko E.S.* Changes of the Fisht Glacier (West Caucasus) for the observation period. *Geograficheskie issledovaniya Krasnodarskogo kraya.* Geographical research of Krasnodar Kray. 2015, 9: 7–19. [In Russian].
3. *Morozov N.A.* Geological studies in the area of the Oshten and Fisht massif in the West Caucasus. *Izvestia Sankt-Peterburgskogo Politekhnikeskogo instituta.* Proc. of the St.-Petersburg Polytechnical Institute. 1910. 14. (2 and 3): 1–71. [In Russian].
4. *Grigor G.G.* Description of glaciers in upper courses of the rivers Belaya, Kishi, Urushten (West Caucasus). *Izvestia Gosudarstvennogo Geograficheskogo Obshchestva.* Proc. of the Geographical Society. 1932, 64 (4–5): 343–351. [In Russian].
5. *Grigor G.G.* Report on the glaciological work in 1929 and 1930 in the area of the Caucasus-sky nature reserve. *Trudy pokazatel'nogo Kavkazskogo gosudarstvennogo zapovednika.* Works of the Caucasian State Nature Reserve. 1936, 1: 58–66. [In Russian].
6. *Pogorelov A.V., Boyko E.S.* Investigation of micro- and meso-scale structure of the snow cover field in mountains on the basis of the laser scanning technology. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2010, 2 (110): 35–42. [In Russian].
7. *Boyko E.S., Pogorelov A.V.* *Primenenie lazernogo skanirovaniya v issledovaniyah relefa i snezhnogo pokrova. Morfometricheskii aspekt.* Application of laser scanning in the research of terrain and snow cover. Morphometric aspect. Novosibirsk: GEO, 2012: 147 p. [In Russian].
8. *Kovalenko N.V., Petrakov D.A., Aleynikov A.A., Aristov K.A., Boyko E.S., Drobyshev V.N., Chernomorets S.S.* Glaciological monitoring of the Kolka Glacier in 2002–2014. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra.* Herald of the Vladikavkaz Scientific Center. 2015, 15 (4): 43–50. [In Russian].
9. *Efremov Yu.V., Il'ichev Y.G., Zimnitskiy A.V.* Changes of size glaciation in the basins of rivers Malaya Laba and Belaya (West Caucasus) for the last century. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2014, 4 (128): 43–53. [In Russian].
10. *Katalog lednikov SSSR.* USSR Glacier Inventory. V. 8. Chapters 1–4. The basin of the Kuban' river. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1967: 124 p. [In Russian].
11. *Glaciological Dictionary.* Ed. V.M. Kotlyakov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 526 p. [In Russian].
12. *Panov V.D.* *Ledniki v verkhov'yakh Kubani.* Glaciers in the upper courses of Kuban river. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1968: 132 p. [In Russian].
13. *Davidovich N.V., Tareeva A.M.* Compilation of glacioclimatical maps with scale 1:3 000 000 for the World Atlas of Snow and Ice Resources. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1979 (1980), 37: 66–71. [In Russian].
14. *Popovnin V.V., Petrakov D.A.* Djankuat Glacier for the last 34 years (1967/68–2000/01) *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 167–174.
15. <http://www.wgms.ch>
16. *Onishchenko V.V., Dega N.S., Tokhchukova S.Y.* Geoeological features of the transformation of the modern glaciation in Karachaevo-Circassia. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta.* Proc. of Dagestan State Pedagogical University. 2016, 1 (34): 97–102. [In Russian].