МОНИТОРИНГ ГОРНОГО ЛЕДНИКА СРЕДСТВАМИ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕДНИКА ФИШТ, ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ)

А.В. Погорелов, К.Р. Головань*, Е.С. Бойко***
**Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия, pogorelov_av@bk.ru*
*** ЗАО «СевКавТИСИЗ», г. Краснодар, Россия, boykoes@ya.ru*

MONITORING OF MOUNTAIN GLACIERS USING AIRBORNE LASER SCANNING (ACCORDING TO THE GLACIER FISCHT, WESTERN CAUCASUS)

A.V. Pogorelov, K.R. Golovan*, E.S. Boyko***
**Kuban State University, Krasnodar, Russia, pogorelov_av@bk.ru*
***ZAO «SevKavTISIZ», Krasnodar, Russia, boykoes@ya.ru*

Abstract. GlacierFischt–the most western glacierin the Caucasus, characterized by some geographical features. According to theobservations of 1909, tacheometry 1982 andairborne laser scanningin 2010were obtainedinformation aboutits evolution. For 100 years the glacier retreatedat 120–250m, the areahas decreased by33%. During 1982–2010, the surfaceof the glacier on average decreased by2 m. Madelidar survey laid the foundation for further monitoring.

Keywords: airborne laser scanning, Fischt glacier, monitoring, spatial changes.

Введение. Материалы воздушного лазерного сканирования (ВЛС) и аэрофотосъемки используются для решения широкого круга инженерно-изыскательских задач, но их исследовательский потенциал этим не ограничивается. В настоящее время ВЛС – одно из наиболее эффективных средств высокоточных измерений и моделирования различных геоповерхностей, включая поверхности горных ледников и снежников. Если учесть, что гляциологические объекты обычно находятся в труднодоступной местности, где применение наземных методов измерений весьма трудоемко, а нередко и опасно, то методы лазерного сканирования в сочетании с аэрофотосъемкой представляются оптимальными для организации высокоточных наблюдений. Следует отметить, что использование данных воздушного лазерного сканирования в изучении состояния и оценки динамики ледников и снежного покрова уже принесло ощутимые предметные и методические результаты [13–15, 18, 23, 26 и др.]. Однако в России, несмотря на природную значимость снега и льда, подобные исследования единичны [12]. В нашем случае данные лидарной съемки позволяют оценить динамику и объемные изменения ледника путем сравнения разновременных модельных поверхностей [15, 16, 20, 26].

Настоящая работа нацелена на оценку изменения поверхности и периметра ледника Фишт (другое распространенное название – Большой Фиштинской ледник) за последние десятилетия. В основе исходных данных – исследования Н.А. Морозова [9], результаты тахеометрической съемки Б.А. Тарчевского, а также материалы воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки 2010 г. Выбор в качестве объекта исследования ледника Фишт обусловлен относительно высоким уровнем его изученности, а главное – наличием инструментальных съёмок прошлых лет. Кроме этого, ледник, обладающий рядом гляциологических особенностей, интересен как географический объект.

Объект исследования. Гора Фишт (рис. 1.) (высшая отметка 2 868 м) расположена на Западном Кавказе в междуречье Белой и Пшехи; является самым западным очагом современного оледенения на Кавказе. Согласно Каталогу ледников СССР [6] площадь ледника Фишт равна 0,9 км^2 при длине 1,2 км. По данным В.Д. Панова [10] в октябре 1965 г. площадь его была равна 0,8 км^2. В Каталоге ледников отнесен к морфологическому типу висячий каровый, чрезвычайно распространенному в бассейне р. Кубани. Основным признаком висячего ледника по определению служит большая крутизна склона, на котором он залегает. В действительности морфология ледника Фишт сочетает в себе черты карового (имеется чашеобразная впадина в привершинной части склона, выработанная ледником) и ледника плоской вершины (находится на выровненной наклонной поверхности) [2]. При этом длина ледника, измеряемая от конца до верхней его границы, скорее характеризует его ширину, поскольку длинная ось расположена поперек и вкось преобладающего движения льда.

С.П. Лозовой [7] вслед за Н.А. Морозовым справедливо указывает на редкую морфологическую особенность ледника Фишт: это переметный ледник с неярко выраженным водоразделом (ледоразделом). Действительно, один из двух языков ледника уходит на северо-запад в бассейн р. Пшехи, другой – на северо-восток в долину р. Белой. О наличии «*ледораздельной линии, от которой в древние времена спускались главные рукава на запад и восток*[5]» упоминал Н.А. Морозов [9].

Характерны ледниковые трещины; в районе ледораздела они закономерно имеют поперечное направление (ЮЮВ – ССЗ), а на западном языке – продольное. Поверхность ледника практически лишена морены вследствие невысокого скального обрамления. Фирновая область ледника занимает боковое положение и отделена от ледника бергшрундом, который большую часть года замаскирован снегом [7].

[5]Здесь и далее курсивом выделен цитируемый текст из публикации [9]

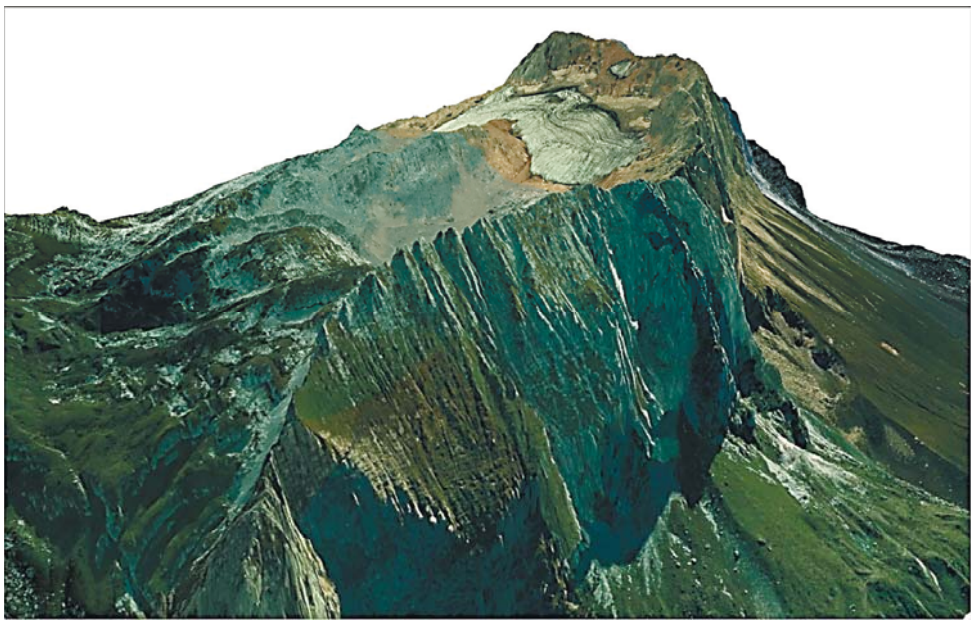

Рис. 1. Гора Фишт в истоках р. Пшехи. Цифровая модель рельефа, драппированная аэрофотоснимком. Сентябрь 2010 г.

Ледник Фишт примечателен не только своим географическим положением, но и морфологией своей чаши. Обычно ледникам в этой части Кавказа свойственно повышенное локальное накопление снега, значительно превышающее фоновые величины за счет лавинного питания и местных ороклиматических эффектов. К числу последних относятся метелевый перенос, возможное локальное орографическое усиление осадкообразования, затененность поверхности ледника и связанные с этим относительно невысокие таяние и испарение снега и льда. Благодаря своим морфологическим особенностям коэффициент концентрации осадков на леднике, по нашим оценкам, не намного больше 1, что весьма нетипично для ледников Западного Кавказа. Ярким антиподом ледника Фишт в этом смысле выглядит Малый Фиштинский ледник, расположенный в глубокой теснине с повышенной аккумуляцией снега при относительно малой абляции. Здесь крутостенная впадина шириной не более 400 м и превышением стен до 300–400 м рассекает массив Фишта в его южной части. По данным [8] коэффициент метелевой концентрации снега на Малом Фиштинском леднике равен 5,9.

Кроме того, примечательной особенностью ледника Фишт следует считать формирование его днища (естественного углубления) в юрских известняках – карстующихся породах, что накладывает определенный отпечаток на процессы снежниковой и ледниковой эрозии. Поверхностный сток в районе ледника практически отсутствует, поскольку талые воды непосредственно поступают в карстовые каналы.

Н.А. Морозову принадлежит первое развернутое и квалифицированное исследование геологического строения района массивов Фишта и Оштена, на фоне которого весьма подробно рассматриваются и ледники территории [9]. Впервые детально описан ледник с пояснениями его возможного поведения в фазу последнего наступания и последующего отступания. Более того, автор приводит «*план Фиштинских ледников*» по состоянию на начало осени 1909 г. В тексте даны две временные привязки: начало лета («*горного, половина июля*») и начало осени, относительно которых сравнивается состояние среднего языка ледника.

Согласно описанию Н.А. Морозова фирновое поле Большого Фиштинского ледника «*…круто падает от вершины, затем дает узкую пологую покатость и еще ниже ряд пологих котловин (две больших), на горизонтали которых, по-видимому, под фирном находится сплошной лед. По крайней мере, за ними три обнажения льда или три рукава Главного Фиштинского ледника: восточный, средний и западный. Из них самый крупный – западный, спускающийся на NWN*» (с. 522). Приведем описание «среднего рукава»: «*Средний рукав Главного Фиштинского ледника спускается слегка на NO…В начале осени здесь наблюдается довольно большое обнажение льда…, а массивные обточенные скалы розового плотного известняка северо-восточного направления и северо-южные боковые морены последнего наступания говорят о достаточном развитии этого рукава в сравнительно недавнее время. Есть основания думать, что направление этого рукава приблизительно совпадает с той ледораздельной линией, с которой в древние времена спускались главные рукава на запад и восток*» (с. 524). Таким образом, Н.А. Морозов в начале осени 1909 г. зафиксировал наличие у ледника трех языков-рукавов с обнажениями льда. Отметим, что на прилагаемой схеме на «среднем рукаве» обнажение льда показано лишь в его основании. Из заслуживающих внимания деталей выделим следующее. «*В конце западного рукава видна довольно высокая морена (около 10 м) из розовых и желтых мраморизованных известняков, мало тронутых выветриванием. Это боковая морена последнего наступания. Она тянется не менее чем на 1/2 версты*» (с. 522). Слева, т.е. к западу от ледника автор указывает на «*… обточенные полированные скалы желтого плотного известняка. Еще выше, громадный барьер, сдерживавший старый ледник с запада и сохранивший полосу, показывающую высоту старого льда*» (с. 522–523).

Следует сказать, что моренный шлейф ледника, лежащий поверх коренных пород, отчетливо виден на используемом нами аэрофотоснимке. Однако интерпретация морен – предмет самостоятельного анализа.

Результаты исследования ледника Фишт в 1929 г. Г.Г. Григор опубликовал в работах [4]. При этом описание ледника Фишт у автора 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 – тахеометрическая съёмка ледника Фишт, по данным которой построен план в масштабе 1:5 000. Именно благодаря плану Б.А. Тарчевского можно количественно оценить изменения ледника за последние десятилетия.

Материалы и методы исследования. Лазерное сканирование – технология, позволяющая создать цифровую трехмерную модель объекта, представив его набором точек с пространственными координатами. Технология базируется на использовании геодезических приборов нового поколения – лазерных сканеров. В качестве излучателя используется полупроводниковый лазер, как правило, ближнего инфракрасного диапазона, работающий в импульсном режиме. Для каждого излученного импульса регистрируется время, затраченное на распространение от источника до объекта, вызвавшего отражение, и обратно к приемнику. С учетом постоянства скорости и прямолинейности распространения электромагнитных колебаний в атмосфере измеренное значение временного интервала позволяет определить расстояние от источника излучения до объекта.

Полученные данные точек лазерного отражения (ТЛО) могут быть представлены в виде трехмерной модели объекта, плоского чертежа, набора сечений и т.п. Основные преимущества технологии воздушного лазерного сканирования: быстрый сбор данных, высокая пространственная точность, оперативная трехмерная визуализация, обеспечение безопасности при съемке труднодоступных объектов.

Приведем типовую спецификацию точности лазерного локатора ALTM 3100 (Optech Inc.): точность в плане – не хуже, чем 1/3 000×H, где H – относительная высота съемки; точность по высоте – не хуже 35 см при относительной высоте до 3 000 м.

Камеральные работы включали классификацию точек лазерных отражений, построение растровых геоповерхностей, формирование файлов внешнего ориентирования, построение ортофотопланов. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка района ледника выполнены ООО «АэроТех» (Краснодар) в сентябре 2010 г.

На этапе подготовки нами произведен контроль данных ТЛО, отобраны данные, покрывающие ледник Фишт, и при помощи модуля GeostatisticalAnalyst программы ArcGIS (Esri) построена модель поверхности с разрешением 1 м. Построения выполнены в системе координат WGS-1984, проекция UTM.

Динамика ледника в картометрических показателях может быть оценена при наличии актуальной цифровой модели склонов массива Фишта с поверхностью ледника (2010 г.), а также схемы Н.А. Морозова (1909 г.) и плана Б.А. Тарчевского (1982 г.).

Исходная пространственная детальность схемы («*общего плана*») Н.А. Морозова не предполагает точной привязки, равно как точных количественных оценок. Однако этот рисунок нельзя не использовать для уяснения, хотя бы в первом приближении, эволюции ледника за последние 100 лет. Для привязки рисунка ориентирами послужили контуры «*главного фирнового поля Фишта*» в его южной части, знак «*вершины Б. Фишта*» и некоторые морфологические и орографические особенности поверхности, отраженные на схеме, включая водо(ледо)раздельную линию. Важным указанием служит фраза *«на левом рукаве его лед спускается несколько ниже 2 395 м»* (с. 522). Определенным ориентиром послужила боковая морена высотой около 10 м, отмеченная Н.А. Морозовым в конце «западного рукава». Морена, хорошо отслеживающаяся на аэрофотоснимке, действительно имеет протяженность в плане не менее 600 м (около ½ версты); образует характерный изгиб в районе западного языка.

Привязка растрового изображения плана Б.А. Тарчевского осуществлялась по аэрофотоснимкам 2010 г. Привязка плана выполнена по пяти точкам съемки (станциям) замкнутого хода, которые совершенно точно идентифицируются на снимке 2010 г. в виде локальных возвышенностей. Очевидный источник погрешностей привязки – сосредоточение этих точек в восточной части ледника. Средняя квадратическая ошибка привязкиплана Б.А. Тарчевского, выполненной нами посредством геореференсинга методом аффинной трансформации, составила 2 м. Наибольшая ошибка привязки (14 м) оказалась у станции, расположенной между языками.

К сожалению, ограниченное количество точек съемки (особенно в западной части ледника) не могло не сказаться на точности интерполяции горизонталей на плане Б.А. Тарчевского. Положение некоторых горизонталей явно требует корректировки; однако это становится очевидным лишь в сравнении с данными лазерного сканирования. В августе 1982 г. большая часть области абляции была закрыта снегом, что привело к дополнительным искажениям горизонталей. Это отразилось на конечных оценках изменений в некоторых частях ледника. Тем не менее, мы полагаем, в целом данные съемки Б.А. Тарчевского вполне отвечают требованиям релевантности.

Горизонтали на плане Б.А. Тарчевского послужили источником данных для построения цифровой модели рельефа, включающей поверхность в области ледника, по состоянию на август 1982 г. В дальнейшем, в результате вычисления разности между поверхностями 1982 и 2010 гг., построена поверхность, отражающая современные изменения ледника Фишт за 28 лет.

Результаты исследования и обсуждение. Некоторые представление об изменениях ледника за 100 лет дает сравнение фотографий (рис. 2).

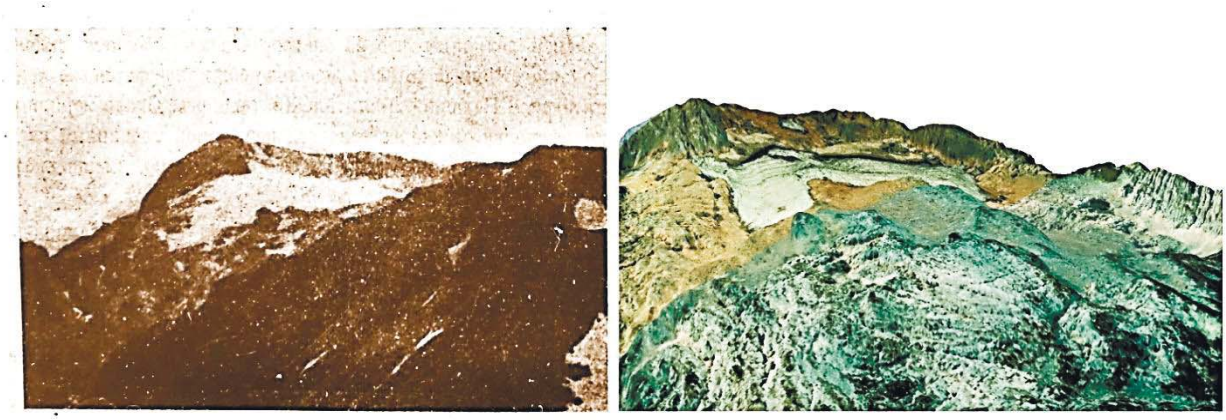

Рис. 2. Ледник Фишт по состоянию на 1909 г. (слева) (фото Н.А. Морозова) и 2010 г. (справа)

Сравнение границ (рис. 3) показывает, что наибольшие изменения плановых очертаний ледника относятся к области абляции. Восточный язык за 1909–2010 гг. отступил приблизительно на 100–120 м, западный – на 120–250 м. Вдоль «лопасти» западного языка шириной 300 м различия в отступании могли быть достаточно велики. «Средний рукав» и вовсе к середине XX в. исчез.

Г.Г. Григор по наблюдениям в 1929 г. так описывает средний язык: «Средний рукав главного ледника Фишта спускается слегка на северо-восток, имеет в своем конце довольно большое обнажение глетчерного льда голубого цвета, подтаивающего и уходящего со своими водами в трещины известняка» [4]. Для сравнения: «*Средний рукав Главного Фиштинского ледника спускается слегка на NO и в начале лета (горного, половина июля) дает только небольшое пятно голубого льда, подтаивающего тут же и уходящего талой водой в трещины известняков»* [9].

Г.Г. Григор указывает длину среднего языка – 620 м. Длина эта, превышающая протяженность вмещающей впадины в рельефе, по нашему мнению, явно завышена. Вероятней всего «средний рукав» являлся обычным снежником. В пользу этого говорит морфология образования – значительная вытянутость при малой ширине «языка», которая не свойственна языкам ледников, формирующимся на относительно пологих склонах. Этот снежник лежал во впадине и служил естественным продолжением языка ледника, поверхность которого занимала более высокое (в сравнении с нынешним) положение. С.П. Лозовой отмечает, что на аэрофотоснимках начала 1950-х гг. «среднего рукава» уже нет [7].

Отметим, что остатки «*восточного ледника Б. Фишта*», упомянутого Н.А. Морозовым, сохранились к 2010 г. в виде пятна льда протяженностью 200 м и шириной 30–50 м (рис. 4).

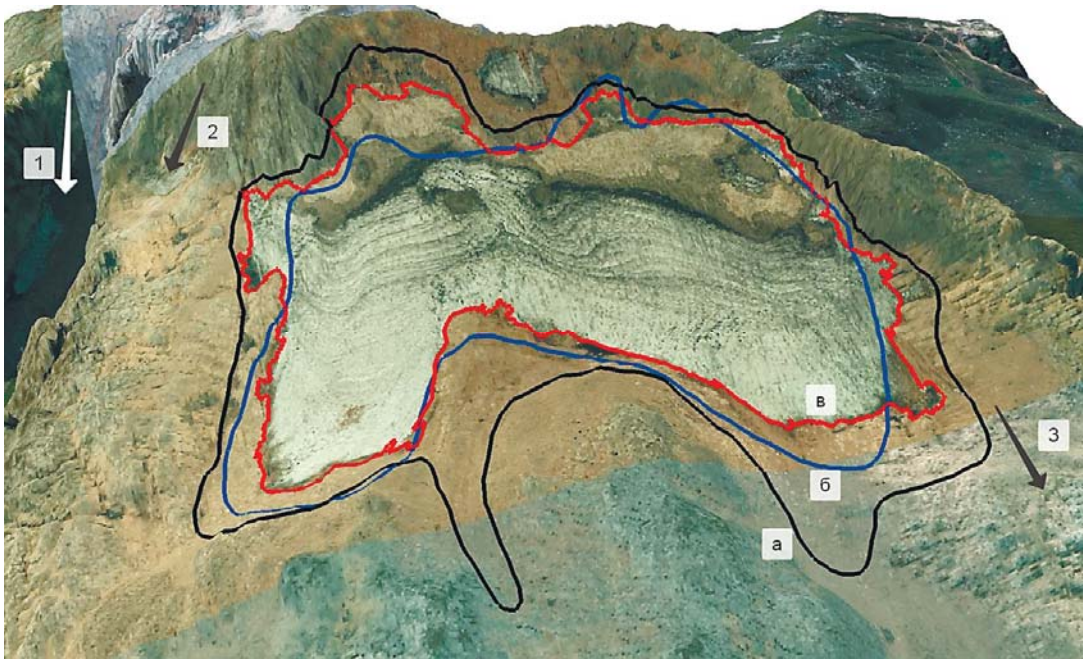

Рис. 3. Границы ледника по данным Н.А. Морозова в 1909 г. (1), Б.А. Тарчевского в 1982 г. (2) и съемки 2010 г. (3). Стрелками показаны Малый Фиштинский ледник (а), остатки «восточного ледника Б. Фишта» (б), гребень боковой морены (в)

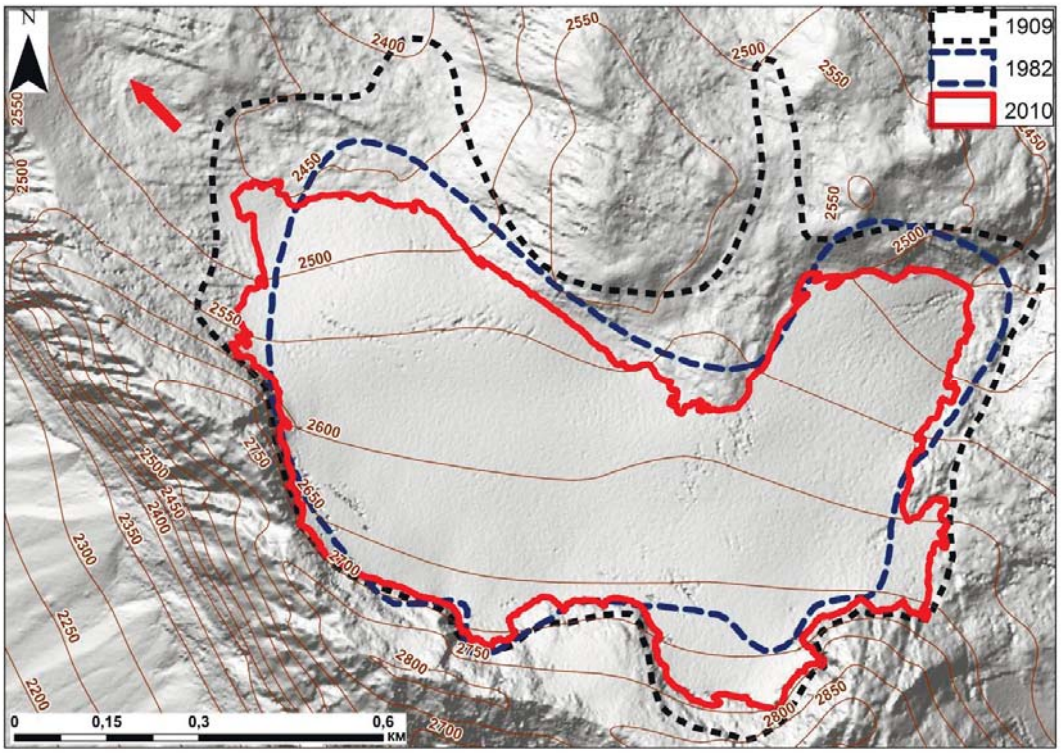

Рис. 4. Границы ледника Фишт по данным разных источников. ЦМР представлена светотеневой отмывкой рельефа. Стрелкой показана боковая морена

Границы ледника, восстановленные по разным источникам, показаны на рисунке 4. При их интерпретации необходимо принять во внимание следующие обстоятельства. Граница 1909 г. нами представлена с точностью, которая возможна в отношении схемы Н.А. Морозова. Положение западного и среднего «рукавов» при реконструкции соотносилось с современной морфологией поверхности по данным высокоточной ЦМР. Относительно «среднего рукава» разъяснения даны выше. Граница 1982 г. имеет очевидные несоответствия в привершинной части ледника, а также вблизи его концов. В начале августа 1982 г. нижняя часть ледника была закрыта снегом, поэтому контуры языков на плане Б.А. Тарчевского автором даны условно, по косвенным признакам. Наиболее точно периметр ледника отражает аэрофотосъемка 2010 г.

Фрагмент боковой морены у западного языка, описанный Н.А. Морозовым, хорошо обнаруживается на ЦМР (рис. 4). Вал морены в указанном месте по данным ЦМР имеет ширину около 30 м при высоте 3–6 м (рис. 5). Превышение морены над концом языка в настоящее время составляет 20–30 м.

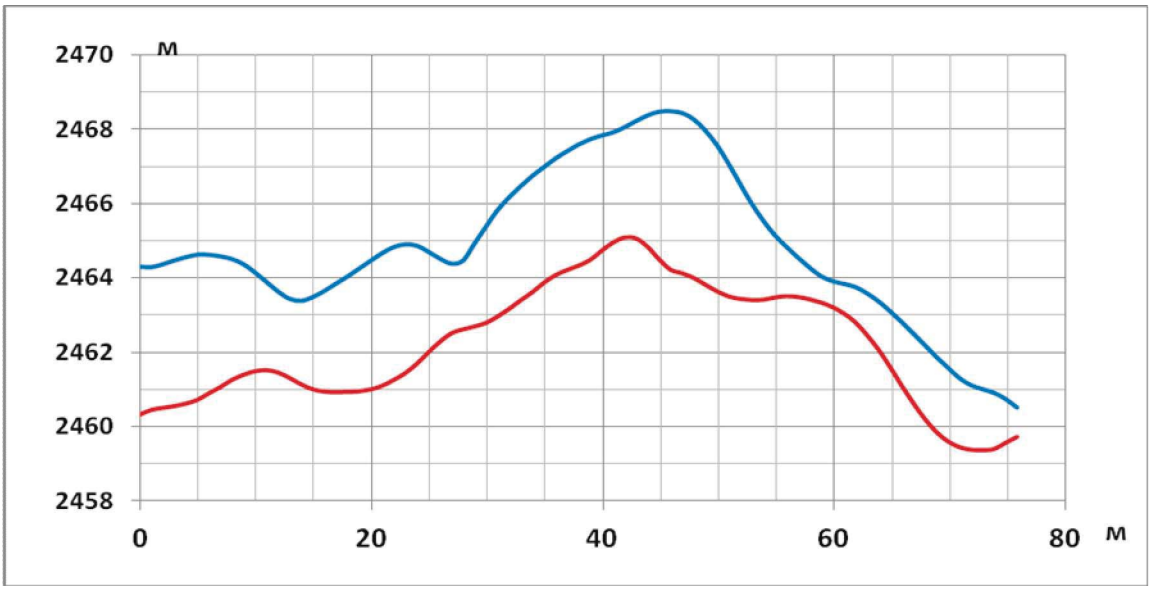

Рис. 5. Характерные поперечные профили морены у западного языка в районе, обозначенном стрелкой (рис. 4). Направление профиля слева направо ЮВ – СЗ.

Наш расчет разности поверхностей 1982 и 2010 гг. выполнен в последовательности:

1. Построение TIN-модели по данным горизонталей на схеме Тарчевского (качество интерполяции – soft).
2. Конвертация TIN в растровое изображение (метод преобразования TIN-модели – линейная интерполяция).
3. Расчет разности двух поверхностей с получением соответствующего растра.
4. Обрезка растра в границах 2010 г.
5. Расчет вертикальных изменений поверхности осуществлялся, таким образом, в границах измерений 1982 г. (рис. 6).

Согласно гистограмме полученного растра (рис. 6) средняя величина вертикального изменения поверхности равна -2 м при стандартном отклонении 6 м. В целом поверхность ледника при всех описанных допущениях к оценкам за 1982–2010 гг. понизилась на указанную величину, хотя вертикальные изменения поверхности в разных частях ледника имеют дифференцированный характер. Сравнительно небольшое понижение поверхности за 28 лет говорит о гляциоклиматическом равновесии и относительном стационировании ледника в последние десятилетия. Об этом свидетельствуют и фактически неизменившиеся за 1982–2010 гг. высоты концов языков: 2 450 (2 449,5) м (восточный) и 2 450 (2 450,5) м (западный). Вместе с тем в западной и южной частях ледника отмечено уменьшение толщины ледника на 7 м и более. Измерения в Альпах (Findelengletscher) показывают, что наибольшие понижения поверхности в период между 2009 и 2010 гг. приходятся на конец ледника [21].

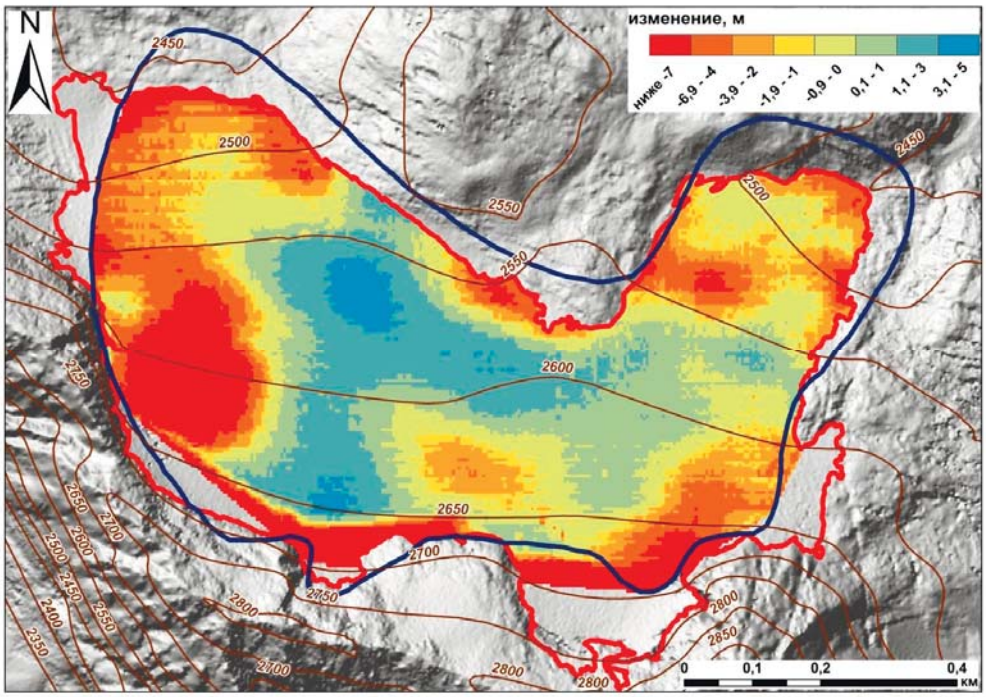

Рис. 6. Изменение поверхности ледника Фишт с 1982 г. по 2010 г.

Выводы. Сведения о леднике Фишт из разных источников обобщены в таблице. Характеристики ледника по данным Н.А. Морозова и Б.А. Тарчевского определялись в границах, показанных (рис. 4).

Таблица 1

Сведения о леднике Фишт из разных источников

Характеристика	Схема Н.А. Морозова (1909 г.)	Каталог ледников СССР	План Б.А. Тарчевского (1982 г.)	Данные ВЛС (2010 г.)
Наибольшая длина, км	1,3	1,2	1,1	1,150
Площадь всего ледника, км^2	0,9	0,9	0,61	0,588
Высота низшей точки, м	2390	2450	2450	2449,5
Высота высшей точки, м	2790	2750	2730	2745,0
Высота фирновой линии, м	–	2640 (10.10.1965)	–	2620*
Общая площадь области абляции, км^2	–	0,6 (10.10.1965)	–	0,462

Примечание:– приведено среднее положение фирновой линии в начале августа*

Ледник с коэффициентом концентрации около 1 при относительно небольшом своем объеме служит хорошим индикатором современных климатических изменений. Итак, размеры ледника Фишт в течение 1909–2010 гг. закономерно сокращались, отражая текущие тенденции эволюции кавказских ледников, а именно – ухудшающиеся условия питания на фоне некоторого глобального потепления. В течение 1909–2010 гг. проекционная площадь его уменьшилась на 0,3 км^2 или на 33%, отступание достигло 120–250 м. Последние десятилетия его существования следует отнести к фазе отрицательного масс-баланса. Однако говорить о деградации ледника Фишт, разумеется, преждевременно, поскольку сокращение его размеров не носит необратимого характера.

Полученная нами по материалам воздушного лазерного сканирования высокоточная модель поверхности горы Фишт послужит основой будущих высокоточных пространственных измерений и мониторинга местных ледниковых образований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК
REFERENCES

1. *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.

Boyko E.S., Pogorelov A.V. Primenenie lazernogo skanirovanija v issledovanijah rel'efa i snezhnogo pokrova. Morfometricheskij aspect [The use oflaser scanningin the researchof reliefandsnow. Morphometricaspect]. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatelstvo «Geo», 2012. 147 s. (in Russian).

2. Гляциологический словарь / Под ред. В. М. Котлякова. – Л.: Гидрометеоиздат. 1984. 524 с.

Gljaciologicheskij slovar' [Glaciological Dictionary / Ed. V.M. Kotlyakov] L.: Gidrometeoizdat. 1984. 524 s. (in Russian).

3. *Григор Г.Г.* Отчет о гляциологических работах 1929 и 1930 гг. в районе Кавказского заповедника // Тр. показательного Кавказского государственного заповедника. Т. 1. Ростов-на-Дону: Азово-черноморское краевое книгоиздательство. 1936. С. 58–65.

Grigor G.G. Otchet o gljaciologicheskih rabotah 1929 i 1930 godov v rajone Kavkazskogo zapovednika [Report glaciological work in 1929 and 1930 in the region of the Caucasus Nature Reserve] // Trudy pokazatel'nogo Kavkazskogo gosudarstvennogo zapovednika. 1936. T. 1. Rostov-na-Donu: Azovo-chernomorskoe kraevoe knigoizdatel'stvo, ss. 58–65(in Russian).

4. *ГригорГ.Г.* Описание ледников в верховьях рек Белой, Киши и Уруштена (Зап. Кавказ) // Изв. Госуд. Геогр. об-ва. Т. 64. Вып. 4–5. 1932. С. 343–351.

Grigor G.G. Opisanie lednikov v verhov'jah rek Beloj, Kishi i Urushtena (Zap. Kavkaz) [Descriptionof glaciersin the head waters ofthe rivers Belaja, Kishaand Urushten (Western Caucasus)] // Izvestija Gosudarstvennogo Geografitcheskogo obcshestva. T. 64. V. 4–5. 1932. S. 343–351 (in Russian).

5. *Ильичев Ю.Г., Салпагаров Д.С.* Малые формы оледенения. Распространение, режим и динамика (на примере Западного Кавказа). М.: НИА-Природа. 2003. 129 с.

Il'ichev Ju.G., Salpagarov D.S. Malye formy oledenenija. Rasprostranenie, rezhim i dinamika (na primere Zapadnogo Kavkaza) [Small formsof glaciation. Distribution,modeand dynamics(for example,the Western Caucasus)]. M.: NIA-Priroda. 2003. 129 s.(in Russian).

6. Каталог ледников СССР. Т. 8, ч. 1 – 4. Бассейн р. Кубани. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 123 с.

Katalog lednikov SSSR [Catalogue of glaciers of the USSR]. T. 8, ch. 1 – 4. Bassejn r. Kubani. L.: Gidrometeoizdat, 1967. 123 s. (in Russian).

7. *Лозовой С.П.* Лагонакское нагорье. Краснодар: Кн. изд-во, 1984. 160 с.

Lozovoj S.P. Lagonakskoe nagor'e [LagonakiHighlands]. Krasnodar, 1984. 160 s. (in Russian).

8. *Лурье П.М., Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Салпагаров А.Д.* Снежный покров и ледники бассейна реки Кубань. Кисловодск. Северо-Кавказское издательство МИЛ. 2006. 244 с.

Lur'e P.M., Panov V.D., Il'ichev Ju.G., Salpagarov A.D. Snezhnyj pokrov i ledniki bassejna reki Kuban' [Snow coverand glaciers of the KubanRiver Basin]. Kislovodsk: Severo-Kavkazskoe izdatel'stvo MIL. 2006. 244s.(in Russian).

9. *Морозов Н.А.* Геологические исследования в области массива Фишта и Оштена на Западном Кавказе. – СПб.: Изв. Санкт-Петербургского политехн. ин-та, 1910. Т. XIV, вып. 2 и 3. С. 457–480; 519–565.

Morozov N.A. Geologicheskie issledovanija v oblasti massiva Fishta i Oshtena na Zapadnom Kavkaze [Geological studiesinFischt and Oschtenmountains on the Western Caucasus]. SPb.: Izvestija Sankt-Peterburgskogo politehnicheskogo instituta, 1910. T. XIV, vypusk 2 i 3, ss. 457–480; 519–565 (in Russian).

10. *Панов В.Д.* Ледники в верховьях Кубани. Л., Гидрометеоиздат. 1968. 132 с.

Panov V.D. Ledniki v verhov'jah Kubani [Glaciersin the headwaters ofKuban]. L.:Gidrometeoizdat. 1968. 132s. (in Russian).

11. *Погорелов А.В., Бойко Е.С., Ризаев И.Г.* Применение воздушного лазерного сканирования для моделирования поля снежного покрова на горных склонах // Пространственные данные. 2007. № 4. С. 34–38.

Pogorelov A.V., Boyko E.S., Rizaev I.G. Primenenie vozdushnogo lazernogo skanirovanija dlja modelirovanija polja snezhnogo pokrova na gornyh sklonah [The use ofairborne laser scanningfor modelingfieldof snowon the mountain slopes] // Prostranstvennye dannye. 2007. № 4, ss. 34–38 (in Russian).

12. *Погорелов А.В., Бойко Е.С., Ризаев И.Г.* Моделирование и анализ структуры рельефа и рельефоидов горных поверхностей (по данным лидарной съемки) // Мат. Международной конференции «ИнтерКарто-ИнтерГИС-15: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт». Пермь–Гент, 2009. Т.II, с. 420–433.

Pogorelov A.V., Bojko E.S., Rizaev I.G. Modelirovanie i analiz struktury rel'efa i rel'efoidov gornyh poverhnostej (po dannym lidarnoj s#emki) [Modeling andanalysis of the structure of the relief and reliefoids of mountainterraintypesof surfaces(according to theLIDARsurvey)] // Materialy Mezhdunarodnoj konferencii «InterKarto-InterGIS-15: Ustojchivoe razvitie territorij: teorija GIS i prakticheskij opyt». Perm'–Gent, 2009. T.II, ss. 420–433 (in Russian).

13. Abermann, J., A. Fischer, A. Lambrecht, and T. Geist, 2010: On the potential of very high-resolution repeat DEMs in glacial and periglacial environments. The Cryosphere, 4, 53 – 65.

14. Baltsavias, E. P., Favey, E., Bauder, A., Bösch, H., and Pateraki, M.: Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring, The Photogrammetric Record, 17(98), 243–273, 2001.

15. Favey E., Geiger A., Gudmundsson, G.H., Wehr, A. Evaluating the potential of an airborne laser-scanning system for measuring volume changes of glaciers. *Geografiska Annaler*. 1999. 81A (4), pp. 555–561.

16. Geist Th., Lutz E., Stotter J. Airborne laser scanning technology and its potential for applications in glaciology. – Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop `3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data' Dresden, Germany, 8–10 October 2003.

17. Geist, T. and Stötter, J. Documentation of glacier surface elevation change with multi-temporal airborne laser scanner data – case study: Hintereisferner and Kesselwandferner, Tyrol, Austria, Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 2007, 41, pp.77–106.

18. Hall D.K., Martinec J. Remote Sensing of Ice and Snow. N.Y., 1985.

19. Hopkinson C., Demuth M.N. Using airborne lidar to assess the influence of glacier downwasting on water resources in the Canadian Rocky Mountains. Canadian journal of remote sensing, 2006, 32, pp. 212–222.

20. Joerg P.C., Zemp M. Evaluating volumetric glacier change methods using airborne laser scanning data. Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography.2014, 96, pp. 135–145.

21. Joerg, P.C., Morsdorf, F., & Zemp, M. Uncertainty assessment of multi-temporal airborne laser scanning data: A case study on an Alpine glacier. Remote Sensing of Environment, 2012, 127, pp.118–129.

22. Jörg P.C. Assessment of Glacial Changes, Surface Properties, and Related Uncertainties Based on Airborne Laser Scanning // Remote Sensing Series. 2014. Vol. 65. Remote Sensing Laboratories, Department of Geography, University of Zurich Switzerland, 111 p.

23. Kennett M., Eiken T. Airborne measurement of glacier surface elevation by scanning laser altimeter. Annals of Glaciology, 1996, 24, pp. 293–296.

24. Knoll C., Kerschner H. A glacier inventory for South Tyrol, Italy, based on airborne laser scanner data, Annals of Glaciology, 2009, 50(53), pp. 46–52.

25. Kodde M., Pfeiffer N., Gorte B., Geist T., Höfle B. Automatic glacier surface analysis from airborne laser scanning, ISPRS Workshop Laser Scanning. 2007, XXXVI Part 3/W52, pp.221–226.

26. Rieg L., Galos S., Klug C., Sailer R. Multitemporal airborne laser scanning for the analysis of glacier change in South-Tyrol (Italy) // Geophysical Research Abstracts. 2013. Vol. 15. EGU2013-8822.