

Особенности изменений ледника Колка с 2002 по 2016 г.

© 2017 г. Г.А. Носенко*, О.В. Рототаева, С.А. Никитин

Институт географии РАН, Москва, Россия

*gnosenko@gmail.com

Specific changes of the Kolka Glacier (the North Caucasus) from 2002 to 2016

G.A. Nosenko*, O.V. Rototaeva, S.A. Nikitin

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*gnosenko@gmail.com

Received February 15, 2017

Accepted August 23, 2017

Keywords: *avalanche supply, Kolka Glacier, mass balance, moraine, precipitation, recovery dynamics, temperature conditions, volcanism.***Summary**

The process of filling the bed with ice with steep lateral tributaries, which lost support, began almost immediately after the catastrophe on the Kolka Glacier in 2002. Currently, three streams of ice have closed in the rear zone of the cirque, forming a single ice massif on the bed. The dimensions of the glacier vary under the influence of both new conditions for the accumulation and melting of ice, and the features of the dynamics of the ice masses filling the vacated bed. This paper describes the next stage of the state of the new Kolka glacier – relative stabilization – and analyzes the features of the process of its recovery based on ground-based observations, modern space imagery materials, and calculations of changes in summer air temperatures and winter precipitation in the glacier area at the beginning of the 21st century. In recent years, the rate of increase in the area of the glacier does not exceed 0.015 km² per year. By September 2016, its area reached 1.11 km², the volume – about 0.044 km³. The conditions for the formation of a new glacier on the empty bottom of the cirque differ significantly from the previous ones – when Kolka was restored in the 1970s after a pulsation. In addition to the background increase in summer temperatures, the thermal balance in the cirque has changed due to an increase in the area of the open surface of the bed and lateral moraine, which increases the melting of ice. At the same time, the growth of the moraine cover on the glacier restrains the melting process. Rockfalls and avalanches enrich the glacier with detrital material with greater intensity than in the 1970s. The conditions of accumulation also changed – the volume of food supplied from the hanging glaciers decreased from the previous 31% to 17%. Fumarolic activity in the crown area of the starboard side of the cirque is preserved and this prevents the restoration of these glaciers.

Citation: Nosenko G.A., Rototaeva O.V., Nikitin S.A. Specific changes of the Kolka Glacier (the North Caucasus) from 2002 to 2016. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017. 57 (4): 468–482. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-468-482

Поступила 15 февраля 2017 г.

Принята к печати 23 августа 2017 г.

Ключевые слова: *баланс массы ледника, вулканические проявления, динамика восстановления, лавинное питание, ледник Колка, моренный покров, осадки, температурный режим.*

По данным регулярных наблюдений в течение 2003–2016 гг. новый ледник Колка, возрождающийся в пустом цирке после гляциальной катастрофы 2002 г., в настоящее время стабилизировался. После 2010 г. увеличение его площади замедлилось и в последние годы не превышает 0,015 км² в год, что на порядок меньше по сравнению с периодом 2005–2010 гг. Лишившись большей части висячих фирновых полей, ледник в настоящее время питается почти исключительно лавинным снегом. В период его восстановления, несмотря на повышение летних температур в цирке, таяние поверхности ледника сдерживается нарастающим сплошным моренным чехлом. На гребне правого борта цирка, у края фирнового плато, не прекращается активность фумарол – вулканогенные процессы в недрах Казбека продолжают.

Введение

События в Северной Осетии, произошедшие в сентябре 2002 г., привлекли к себе внимание грандиозным масштабом ледниковой катастрофы и её последствиями. Ледник Колка был полностью выброшен из своего ложа и вместе

с огромным количеством воды образовал гигантский водно-ледово-каменный сель, промчавшийся по долине р. Геналдон. В тот момент остро обсуждали причины и механизм неожиданного выброса из цирка ледника Колка. На эту тему было написано много статей, в которых предпринимались попытки найти объясне-

ние необычной катастрофе [1–6], но не менее важным был вопрос о возможности её повторения. В опустевшем цирке ледника Колка практически сразу начался процесс формирования нового ледникового тела. Для ответа на вопрос о возможности прогнозирования его дальнейшего развития необходима информация о происходящих изменениях. С этой целью Институт географии РАН с 2003 г. почти ежегодно проводит полевые исследования в цирке ледника. В настоящей работе анализируются особенности процессов, формирующих баланс массы нового ледника, и подводятся итоги очередного этапа его развития — последних шести лет до 2016 г. включительно, когда ледник перешёл в стадию относительной стабилизации. Работа основана на результатах наземных наблюдений, современных материалах космической съёмки, а также данных об изменении летних температур и зимних осадков за последние полвека, включая период наблюдений за восстановлением ледника в цирке.

Методы исследований и используемые данные

Регулярные наземные наблюдения в цирке ледника Колка сопровождались съёмкой цифровыми фотокамерами и GPS-съёмкой. Это позволяло отслеживать динамику заполнения льдом освободившегося ложа и фиксировать изменения в положении границ и морфологии поверхности возрождающегося ледника. Для оценки изменений границ ледника дистанционными методами с 2002 по 2016 г. использовались разновременные космические снимки с разрешением на местности от 0,7 м до 15 м (Quick Bird, SPOT 6, ASTER). Для определения границ ледника в 2016 г., кроме наземных GPS-съёмок, использовался снимок с российского космического аппарата Ресурс-П с разрешением 0,7 м, полученный 9 сентября 2016 г. по заявке Института географии РАН. Перед сравнением снимков проводились их коррекция и взаимная увязка по сети наземных контрольных точек, координаты которых были определены с помощью GPS-съёмки. Точность определения контуров принималась равной 1 пикселю и изменялась от 0,7 м до 15 м в разные годы, причём снимки, привлекавшиеся после 2010 г., имели геометрическое разрешение не хуже 3 м. Как источник дополнительной информации использовались материа-

лы аэрофотосъёмки 1946, 1958 и 1987 гг. В 2014 г. проведена наземная радиолокационная съёмка на языке возрождающегося ледника и ниже, на свободном участке ложа, с помощью аппаратуры ВИРЛ-6 с центральной частотой 20 МГц и цифровой регистрацией радарных и GPS-данных. Это позволило сделать хотя и приблизительную, но количественную оценку толщины и объёма сформировавшегося на этот момент ледника.

Для оценки влияния метеорологических факторов на формирование нового ледника выполнена реконструкция средних летних температур и зимних осадков в бассейне Колки на высоте 3250 м — средней высоте поверхности вновь образующегося массива льда в период 2002–2016 гг. Ближайшая метеостанция (ГМС) Кармадон (1513 м) после 2002 г. не работала, поэтому в качестве исходных данных использованы средние месячные показатели ГМС Владикавказ (702 м), а также данные по ГМС Кармадон до 2002 г. Средние летние температуры воздуха (июнь–август) ГМС Владикавказ ($t_{\text{л.Влад}}$) за 2002–2016 гг. были приведены к ГМС Кармадон ($t_{\text{л.Карм}}$) с помощью корреляционного уравнения, полученного по существующим рядам метеонаблюдений на этих станциях с 1961 г. [6]: $t_{\text{л.Карм}} = 1,19t_{\text{л.Влад}} - 8,2$ (коэффициент корреляции $r = 0,88 \pm 0,07$). Для пересчёта этих температур на высоту 3250 м использован вертикальный температурный градиент $-0,56$ °C/100 м, величина которого для верховьев бассейна р. Геналдон определена во время работ экспедиции Института географии в 1970–1975 гг. [7]. Величина температурного скачка при переходе с грунтовой поверхности на ледниковую не учитывалась, поскольку охлаждающее влияние ледника, который начинал формироваться в пустом цирке и сразу покрывался плотным слоем обломочного материала, было ничтожно мало.

Для оценки осадков зимнего периода получены ежемесячные корреляционные связи осадков за сентябрь–май на ГМС Кармадон и Владикавказ в общий период их работы (1961–2002 гг.). Коэффициенты корреляции находятся в диапазоне 0,72–0,88. Полученные зависимости применены для продления ряда осадков в ГМС Кармадон до 2016 г. Затем для пересчёта осадков от ГМС Кармадон на высоту 3250 м был использован вертикальный градиент осадков 35 мм/100 м, рассчитанный между ГМС Кармадон и Казбеги-высокогорная, расположенной в этом районе на

высоте 3653 м. Принято, что режим циркуляционных осадкообразующих процессов по месяцам однороден во всём Казбек-Джигарайском районе, занимающем неизмеримо меньшее пространство, чем атмосферные фронты [6].

Результаты и обсуждение

Основные этапы восстановления ледника. Восстановление ледника Колка в цирке происходит неравномерно. Изменение размеров ледника зависит как от метеорологических факторов, так и от особенностей динамики масс льда, заполняющих освободившееся ложе. Положение границ возрождающегося ледника в разные годы показано на рис. 1. Начало заполнения пустого днища цирка льдом крутых боковых притоков, лишившихся опоры после выброса ледника, было заметно уже в 2003 г. Первые четыре года домини-

ровало выдвижение наиболее крупного правого притока Колки. Скорее всего, причиной такой быстрой его реакции было не столько питание лавинами и обвалами льда с уцелевших висячих фирнов у гребня, сколько сползание по крутому ложу притока лишившихся опоры масс льда, накопленных в этой боковой мульде ещё до 2002 г.

К 2005 г. фронт выдвинувшегося притока спустился на днище цирка и начал продвигаться поперёк него, а к 2010 г. окончательно пересёк прежнее ложе Колки и достиг подножия левого моренного вала. В это время изменения происходили и в тыловой зоне цирка, где продолжалось накопление льда, особенно активное под основным лавиносбором массива Джигарай-Хох. Началось также поступление льда и от верхнего правого короткого притока Колки. Потоки льда в тыловой зоне цирка сомкнулись, образовав на ложе единый ледяной массив сложной конфигурации с неровной бугристой поверхностью. Левая

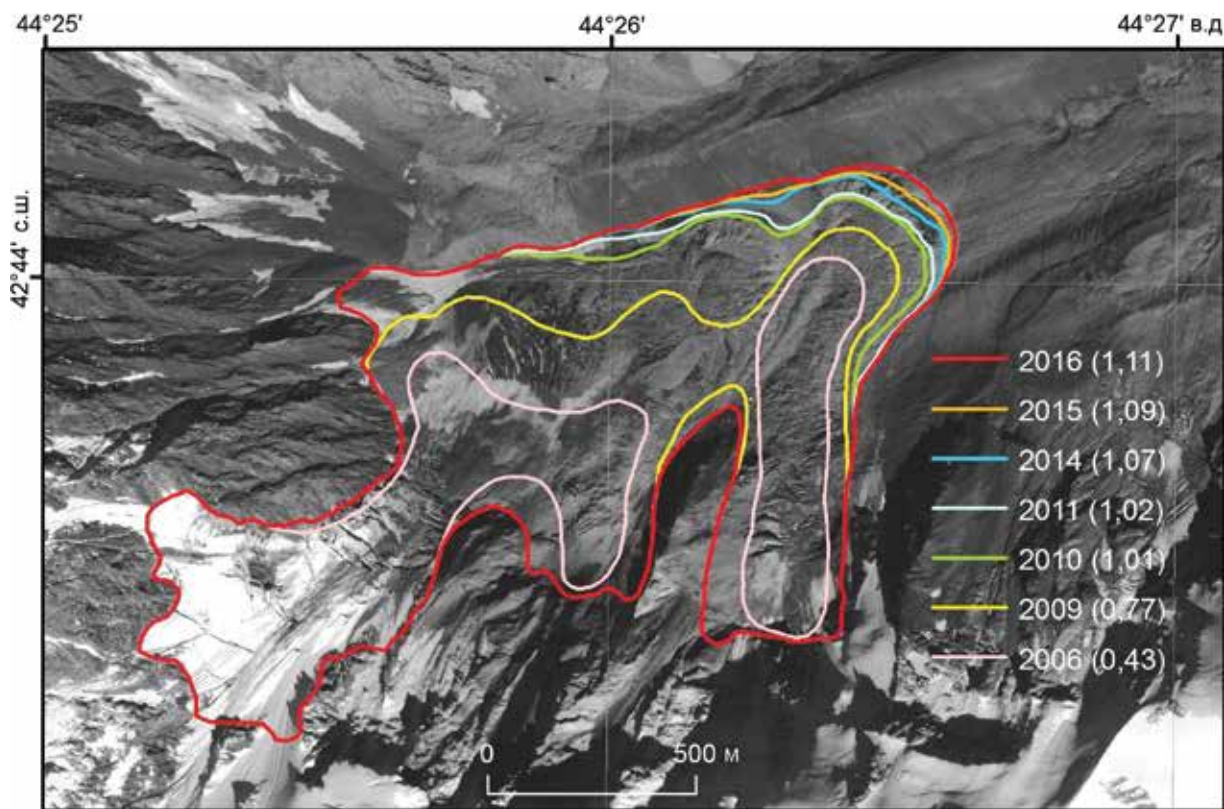


Рис. 1. Изменения границ нового ледника в цирке Колки после катастрофы 2002 г.

Цифры в скобках соответствуют площади (км²), занимаемой льдом в конкретный год; в качестве подложки использован космический снимок «Ресурс-П», 09.09.2016 г.

Fig. 1. Changes in the boundaries of the new glacier in the Kolka Circus after the 2002 catastrophe.

The figures in brackets correspond to the area (km²) occupied by ice in a particular year; as a substrate used a space image from «Resurs-P», 09.09.2016

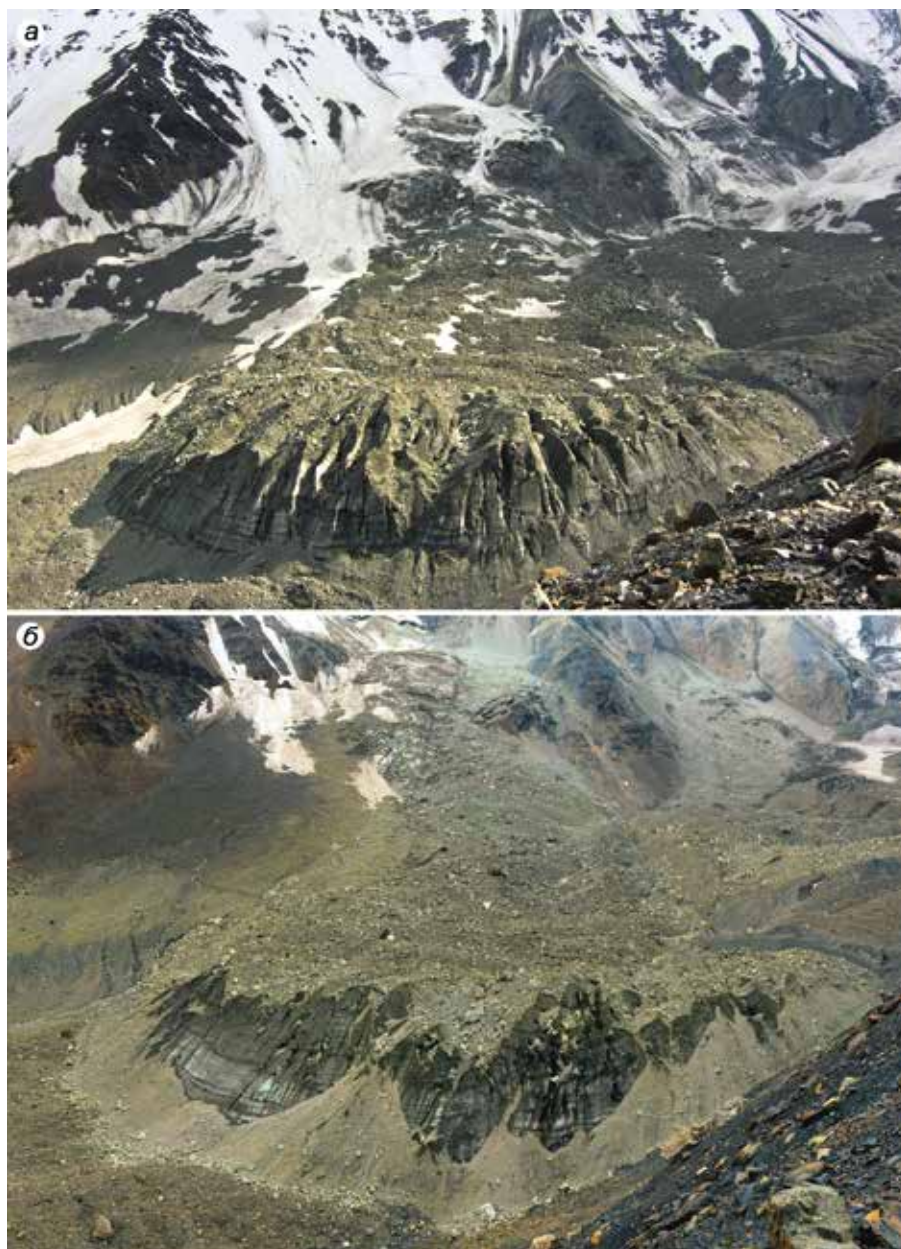


Рис. 2. Положение фронта ледника в последние годы наблюдений (наземная съёмка С.А. Никитина):

a – 22 июня 2014 г.; *б* – 25 августа 2016 г.

Fig. 2. Position of the glacier front in the last years of observations (ground-based survey by S. Nikitin): *a* – June 22, 2014; *b* – August 25, 2016

граница его вплотную примкнула к подножию боковой морены Колки. Первый приток, перегородивший ложе, превратился в некоторое препятствие для ледяных масс, продолжающих поступать в верховья нового ледника. Накопление льда приводило в основном к неравномерному повышению его поверхности. Язык ледника реагировал на давление льда появлением радиальных трещин и небольшим изменением направления перемещения фронта – вниз по оси долины.

Скорость увеличения площади нового ледника в последние годы не превышает $0,015 \text{ км}^2/\text{год}$. Общий фронт его принадлежит наступавшему

первым боковому притоку, который после 2010 г. замедлил своё продвижение (см. рис. 1). В 2014 г. его фронтальная часть имела вид ледяного обрыва крутизной до 70° . Высота фронта достигала 40 м, ширина – около 350 м. Длина всего ледникового массива на днище составляла 1300 м, высота поверхности – в среднем 3250 м. Через два года, хотя ледник продолжал очень медленно продвигаться, его фронт потерял свою крутизну, ширина осыпных шлейфов увеличилась, края трещин на языке оплыли и закрылись обломочным материалом (рис. 2). Общая площадь ледника с притоками в 2016 г. составила $1,11 \text{ км}^2$.

Данные о толщине льда получены И.И. Лаврентьевым в результате радиолокационной съёмки 2014 г. [8]. Из соображений безопасности её проведение ограничивалось нижней областью языка. Измерения на поперечном профиле показали, что в центральной зоне толщина льда достигает 50 м, уменьшаясь к краям до 10–20 м. Если сравнить эти данные с результатами радиолокации, выполненной в 1988 г. гляциологами Томского университета [9] (рис. 3, а), то можно видеть, что тогда толщина ледника на этом участке цирка была в два раза больше — порядка 100 м. Разница в высоте поверхности также хорошо видна по положению линии контакта прежнего ледника с левой боковой мореной, она может быть использована в качестве показателя степени заполнения льдом освободившегося ложа. Ориентируясь на полученные нами данные и карту 1988 г., можно принять за среднюю толщину льда в 2016 г. величину 40 м. Соответственно объём возрождённого ледника составляет примерно 0,044 км³. В таком случае, за 14 лет после подвижки 2002 г. ледник восстановил около 34% того объёма, который был в 1988 г. (0,131 км³) [9], когда он наращивал массу после пульсации.

Строго говоря, для оценки интенсивности процесса восстановления ледника такое сравнение не вполне корректно. Несмотря на сопоставимый временной интервал измерений после катастрофы 2002 г. и пульсации 1969–1970 гг. (14 и 18 лет соответственно), следует иметь в виду, что подвижка 1969 г. проходила по другому сценарию и лёд из цирка полностью не ушёл. По аэрофотоснимку 1987 г. заметно, что одновременно с повышением поверхности ледника в тыловой зоне, происходящим за счёт интенсивного питания, у конца языка и ниже продолжался процесс деградации оставшегося после подвижки льда. Чётко выраженная линия фронта отсутствовала. Для сравнения: на аэрофотоснимке 27.08.1958 г. (см. рис. 3, б) — за 11 лет до пульсации 1969 г. — видно, что не только тыловая зона заполнена льдом практически до гребня левой морены, но и язык имеет чётко выраженную форму и толщину. Всё это показывает, что динамика неустойчивого ледника Колка на разных этапах его развития неоднозначна и процесс накопления вещества в нём протекает по-разному. Поэтому в настоящий момент использовать полученную величину объёма накопленного льда для прогнозирования дальнейшего развития ледника вряд ли возможно.

Факторы, определяющие формирование нового ледника в цирке Колки. Судя по межгодовой динамике площади возрождающегося в цирке Колки ледника, можно предположить, что к 2015–2016 гг. он оказался близок к состоянию балансового равновесия. Во всяком случае, это можно говорить о бывшем главном притоке Колки, с которого началось формирование нового ледникового тела и на баланс массы которого наиболее существенно повлияли процессы абляции. Скорость приращения общей площади всего нового ледника в последние годы снизилась в 10 раз по сравнению с периодом его активного развития в 2006–2010 гг., фронт его почти стабилизировался. При этом необходимо учитывать, что на замедление продвижения общего фронта ледника могут влиять также внутренние динамические процессы. Пока движение потоков льда в нём неупорядоченно. Это определяется морфологией бассейна ледника; то же самое происходило и во время предыдущего восстановления ледника Колка после подвижки 1969 г. [7]. Движение льда начинается с правого склона, линии тока в леднике направлены с юга на север и «упираются» в левобережную морену Колки, которая играет роль конечной морены нового ледника. Возникающий при этом эффект подпруживания и потеря энергии движения при развороте потока льда могут быть причинами длительной стабильности края ледника при постепенном нарастании его объёма. В настоящее время накопленной массы льда ещё недостаточно и поворот линий тока вниз по днищу только начинает приобретать выраженную форму.

Для оценки особенностей накопления и таяния льда нового ледника по сравнению с прежним ледником Колка обратимся к работе [7]. В.Г. Ходаков на основе материалов многолетних исследований ледника в 1970-х годах, во время работ на Колке экспедиции Института географии АН СССР, попытался оценить процессы, формирующие баланс массы ледника при «обычном», спокойном его состоянии (между подвижками). Колка — типичный ледник лавинно-обвально-го питания. Объём снега и льда, поступающего в результате лавин и обвалов, в 5,3 раза превышает долю твёрдых осадков, выпадающих непосредственно на поверхность ледника, и к тому же они в основном сдуваются сильными зимними ветрами. Область аккумуляции в самом контуре ледника, расположенная в его тыловой части и вдоль

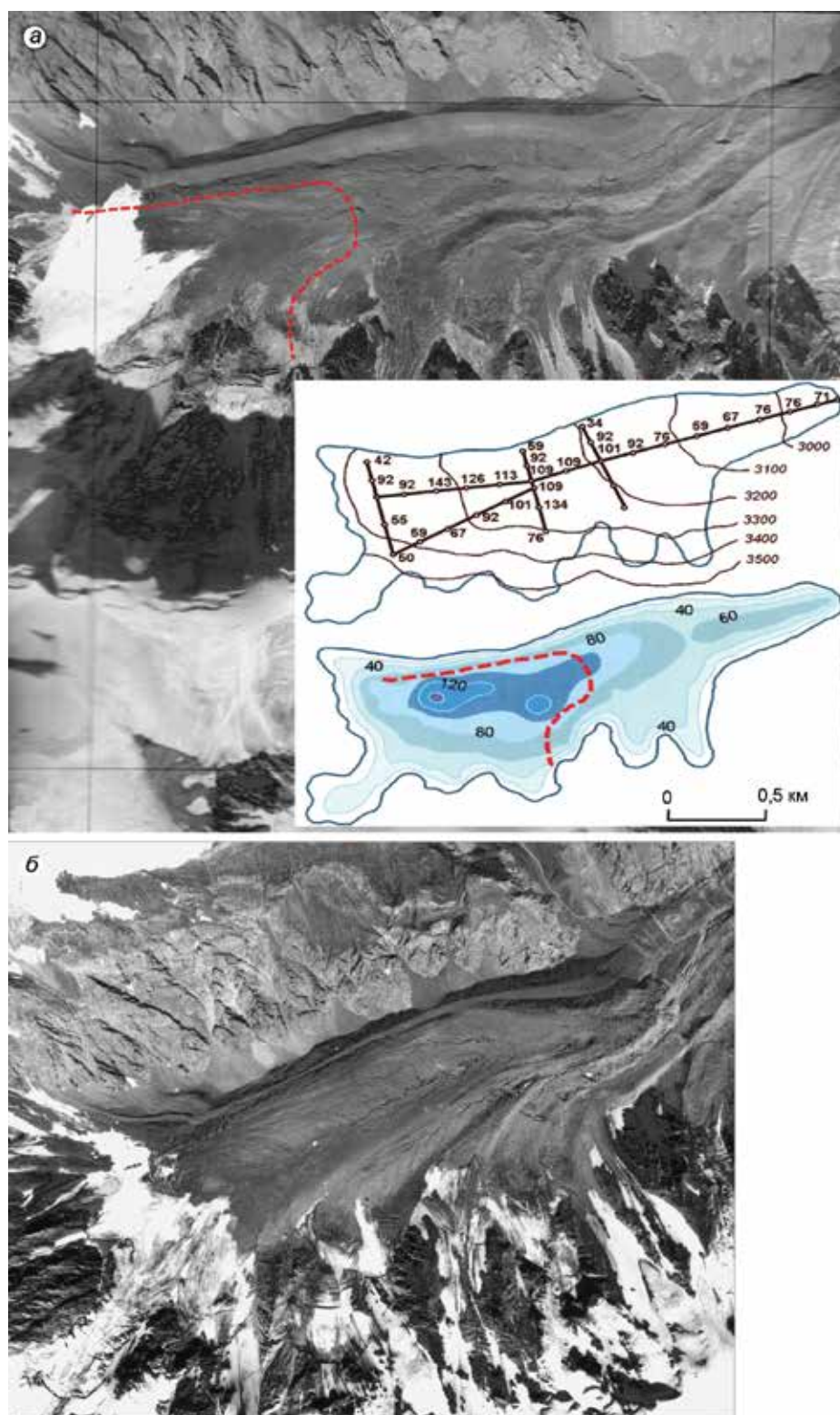


Рис. 3. Ледник Колка на аэрофотоснимках разных лет:

a – съёмка 29.09.1987 г. (на врезке – профили радиозондирования 1988 г. и карта толщины льда [9]); красной линией показана граница ледника в 2016 г.; *б* – съёмка 27.08.1958 г.

Fig. 3. Kolka Glacier on aerial photographs of different years:

a – survey on September 29, 1987 (on the side – radio sounding profiles in 1988 and ice thickness map [9]); the red line shows the boundary of the glacier in 2016; *b* – survey on August 27, 1958

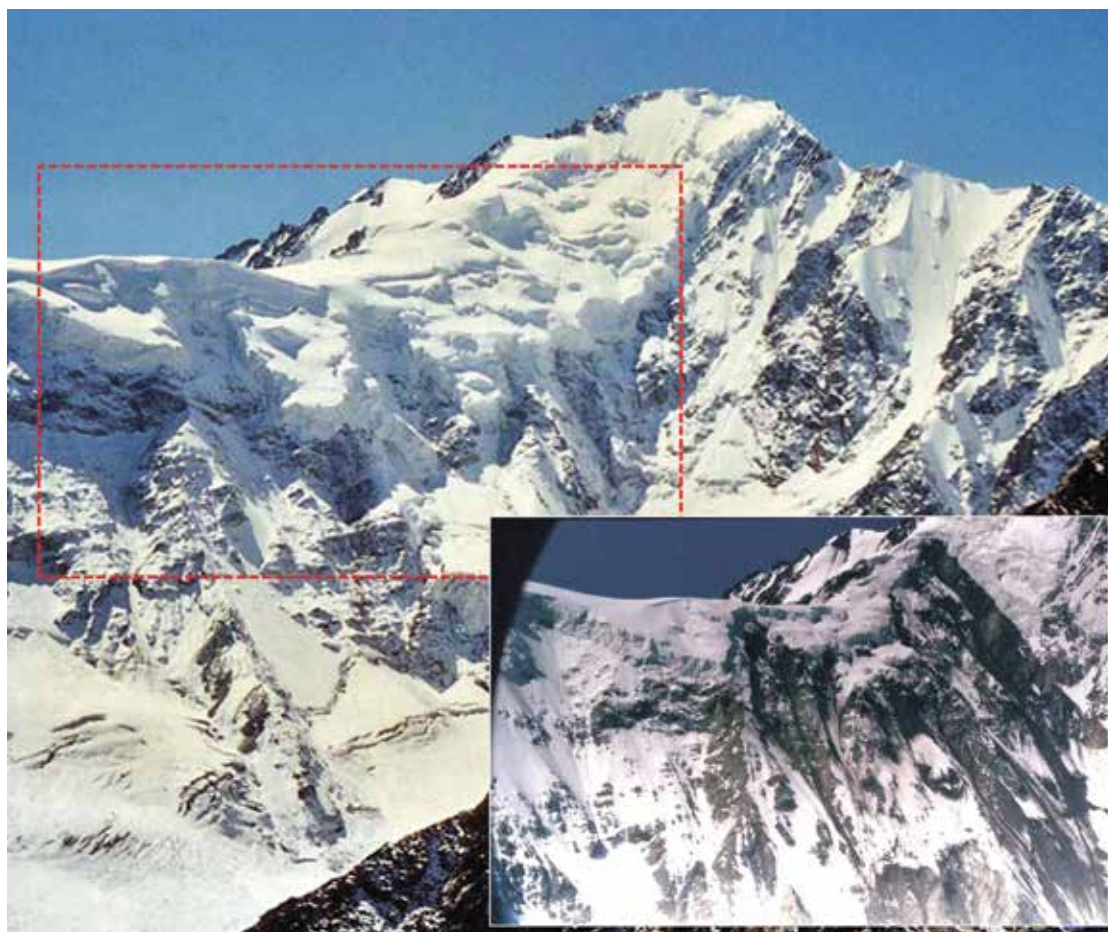


Рис. 4. Висячие фирновые поля на стене Джимарай-Хох и гребне до катастрофы 2002 г. на снимке С. Егорина (http://caubasephotos2.narod.ru/photos/cau_6838_es.jpg) и участок обвалов после катастрофы (на врезке), фото Г. Носенко 27.08.2003 г.

Fig. 4. Hanging firn fields on the wall and the crest of Jimarai-Hoch before the catastrophe of 2002 on the photo S. Egorin (http://caubasephotos2.narod.ru/photos/cau_6838_es.jpg) and the site of crashes after the disaster (on the sidebar), photo G. Nosenko, August 27, 2003

подножия правого склона, в «обычном» состоянии занимает 1 км^2 . Выше поднимаются крутые скальные склоны цирка, на которых зимой снег почти не задерживается и сбрасывается вниз лавинами. В.Г. Ходаков называл эту зону лавиносбором и оценивал её площадь на правом борту цирка и скалах массивов Джимарай-Хох и Шау-Хох в $2,4 \text{ км}^2$, т.е. почти равной площади самого ледника ($2,47 \text{ км}^2$). Склоны южной экспозиции практически не участвуют в питании ледника.

Верхний «этаж», питающий ледник, занимал $1,1 \text{ км}^2$ и был представлен сплошной полосой висячих фирновых полей, разбитых трещинами, на правом склоне цирка и стене г. Джимарай-Хох. Постоянно накапливающиеся фирновые толщи медленно двигались из ледораздельной

зоны с высот $4100\text{--}4700 \text{ м}$ вниз и, достигая критического уклона, регулярно разгружались отколами края. Судя по разновременным съёмкам и фотографиям, полоса висячих фирновых ледников занимала одинаковое положение с начала XX в. вплоть до конца его (например, рисунок Н.В. Поггенполя, сделанный в 1902 г. [10]), что свидетельствует о крайне высокой их стабильности. И лишь в 2002 г. западный участок гребня на соединении с фирновым полем г. Джимарай-Хох подвергся внезапному разрушению (рис. 4).

Большую роль в питании ледника играет метелевый снег, постоянно переносимый юго-западными ветрами с плато ледораздела Майли–Суатиси в бассейны ледников Майли и Колка. [7]. Прежде в бассейне Колки бо́льшая

часть поступающего снега откладывалась с подветренной стороны гребня именно на этих высоких фирновых полях. Здесь толщина годовых слоёв в обрывах фирна близ гребня правого склона составляла от 80–100 см до 200 см и более (рис. 5). Накопленный метелями снег сбрасывался на ледник вместе с отколами висячего фирна. Такие обвалы обеспечивали существование правых притоков Колки и в значительной степени самого ледника.

На основе расчётов и всего объёма наблюдений в 1970-е годы, с учётом снегозапасов на основном леднике и в верхней зоне на ледоразделе с ледниками Суатиси, а также измерений годовых слоёв в обрывах фирновых толщ В.Г. Ходаковым была выполнена оценка вклада каждого из «этажей», питающих ледник, в общий годовой приход в области аккумуляции основного ледника при его «спокойном» состоянии. Поступление лавинного снега со склонов «лавиносборов» составляло 56%, обвалы фирна и льда вместе с накопленным метелевым снегом приносили 28% и лишь 16% добавлял снег, выпавший непосредственно на ледник. В среднем, чистая аккумуляция на леднике в «спокойные» периоды при климатических условиях 1960–70-х годов была оценена в 200 см в.э., а объём годового прихода 2×10^6 т в год. Абляция открытого льда на языке Колки определялась прямыми измерениями и расчётами по средней летней температуре воздуха, в том числе с использованием данных ГМС Казбеги-высокогорная. Расчётная величина потери льда на языке в «спокойный» период была равна в среднем 315 см в.э., или $4,7 \times 10^6$ т в год, что более чем в два раза превышает чистый приход. Очевидно, что в таких условиях ледник не мог бы существовать.

На самом деле процесс абляции на Колке обычно протекает по-другому, его определяет наличие моренного чехла, бронирующего всю поверхность языка ледника начиная от фирновой линии. На аэрофотоснимках 1958 и 1987 гг. видно, что весь язык полностью закрыт мореной (см. рис. 3). Во время работ на Колке в 1970-х годах экспериментально определено уменьшение абляции льда под разным слоем морены. На площадке, расположенной на высоте 2950 м, морена толщиной более 1–3 см начинала препятствовать таянию; при толщине слоя 10 см интенсивность абляции снижалась наполовину, а при

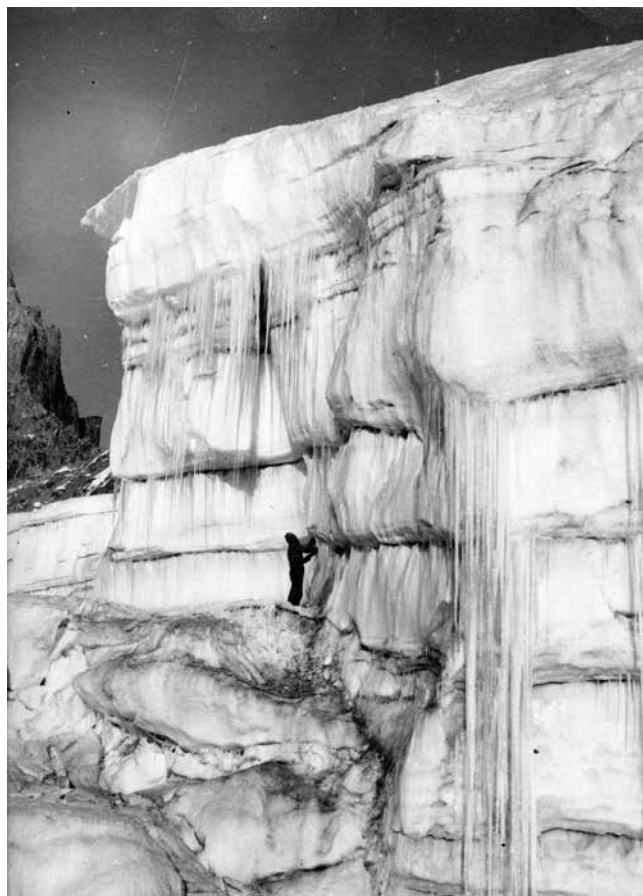


Рис. 5. Слои многолетних снежно-фирновых толщ на гребне Джимарай-Майли правого склона цирка (фото К.П. Рототаева, 1973 г.)

Fig. 5. Layers of perennial snow and firn layers on the crest of Jimarai-Maily on the right side of the circus (photo by K.P. Rototaev, 1973)

50 см таяние составляло не более 10–12% абляции открытого льда. При нарастании толщины морены роль главного агента в таянии льда на языке переходит от солнечной радиации к талым водам, несущим тепло под моренный чехол [7]. До подвижки 1969 г. слой морены на Колке составлял от 10 до 50 см и более. Замедление таяния стало причиной постепенного нарастания массы льда до критической, что и привело к её быстрой разгрузке — пульсации ледника.

После 2002 г. новый ледник на днище цирка формируется в условиях, значительно отличающихся от изученных в 1970-х годах. Выполненные нами расчёты температур тёплого периода и зимних осадков в районе Колки, приведённые к средней высоте возрожденного ледника (3250 м), показывают, что на фоне незначитель-

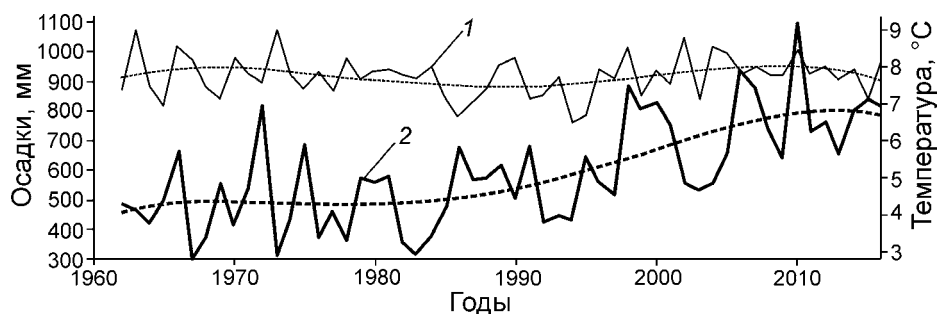


Рис. 6. Изменения зимних осадков — сентябрь—май (1) и температуры воздуха тёплого периода — июнь—август (2) в районе ледника Колка на высоте 3250 м.

Тренды показаны пунктирными линиями

Fig. 6. Changes in winter precipitation — September–May (1) and air temperature in the warm period — June–August (2) near the Kolka glacier at an altitude of 3,250 m.

Trends are shown in dotted lines

ного изменения осадков (в среднем они остались на уровне 900 мм) существенно изменились температурные условия сезона абляции (рис. 6). Кроме фонового повышения летних температур воздуха в районе Колки по сравнению с 1970-ми годами в среднем на 1 °C на рубеже XX–XXI в. и ещё на 1 °C через полтора десятилетия, кардинально изменились локальные условия в самом цирке после выброса ледника в 2002 г. На месте прежнего ледника площадью 2,5 км² осталось пустое днище, покрытое тёмным обломочным материалом. Исчезла большая часть висячих ледников, закрывающих правый склон. Прежде, по измерениям 1970-х годов, в цирке Колки разность температур в июле—августе на леднике и морене составляла 0,8–1,2 °C [7]. Ледник Колка выхолаживал воздух в среднем на 1 °C, теперь это влияние исчезло. Открытое каменистое ложе и крутой склон чёрной боковой морены, обращённый на юг и поднимающийся над ледником на 50–100 м, интенсивно нагреваются летом.

В «спокойном» состоянии прежнего ледника на средней высоте поверхности абляции 3100 м в цирке Колки норма летней температуры воздуха была равна 4,9 °C. Однако теперь толщина льда исчезла, поверхность в цирке понизилась на 50–100 м и отметка 3100 м переместилась в тыловую часть днища, к фронту нового ледника. Здесь толщина льда Колки по данным 1988 г. достигала 100 м [9]. В 2010 и 2012 гг. измерения Р.А. Чернова на днище с помощью автоматических датчиков показали на высоте 3100 м среднюю летнюю температуру около 10–12 °C, нередко с дневными повышениями до 20–25 °C [8]. Все эти факторы

способствуют значительному повышению абляции сохранившихся в цирке ледников. Вместе с тем весь процесс формирования нового ледника сопровождается насыщением его мореной. Как и прежде, большое количество обломков горной породы со склонов приносят на ледник лавины. Поверхность узкой полосы фирновой зоны в конце периода таяния бывает усыпана камнями и щебнем. Обломочный материал обильно поставляют на ледник также камнепады. Правый борт и тыловые склоны цирка сложены легко разрушающимися породами, в основном метаморфизованными сланцами. Их плитчатая текстура, с наклоном слоёв 35–40° на северо-восток при таком же среднем уклоне самого склона [11], создаёт неблагоприятные условия для устойчивости поверхности горного склона.

После катастрофы определить объём обвалившейся горной породы оказалось сложнее, чем объём льда. Данных для этого практически нет. По первым предварительным расчётам И.М. Васькова, объём обрушившихся скальных пород составил 25 млн м³ [3]. Определения по космическим снимкам спутника QuickBird показали меньшую величину — 10–15 млн м³ [11]. Обвалы висячих фирнов увеличили площадь склонов, свободных ото льда, и усилили интенсивность их денудации. Особенно активны камнепады с оголившихся верхних участков скал (см. рис. 4). Во время маршрутов в цирке в осенние месяцы практически ежегодно, начиная с 2003 и до 2016 г., наблюдалось постоянное падение камней из этой зоны — от гребня правого борта над новым ледником. На леднике толщина

морены из года в год увеличивается. У юго-западного истока ледника, в тыловой зоне, разбитой трещинами, где продолжается поступление льда, моренный покров разрежен, но вся оставшаяся поверхность закрыта обломочным материалом разного размера. Распределение морены по площади ледника крайне неравномерно, что обусловлено его неровной, бугристой поверхностью, с провалами, а также разной длительностью процесса её накопления в разных частях ледника (см. рис. 2). Оценить среднюю толщину моренного покрова в настоящее время сложно, но предположительно она составляет не менее 15–20 см, и это, как отмечено ранее, существенно снижает таяние.

Для сравнения можно привести изменение величины таяния в процессе постепенного нарастания моренного чехла на новой поверхности ледника Колка при восстановлении его после подвижки 1969 г. В 1970–1971 гг. таяние почти чистой поверхности льда в цирке в зоне абляции в среднем за сезон составляло 4–6 м при температурном коэффициенте таяния $0,84 \text{ см}/^{\circ}\text{C}$, а под слоем морены менее 1 см – $1,52 \text{ см}/^{\circ}\text{C}$. Нарастающий слой морены снизил среднее поверхностное таяние в 1975–1977 гг. до 2 м, а коэффициент таяния льда при толщине слоя 15 см составлял $0,37 \text{ см}/^{\circ}\text{C}$. Однако в современных условиях камнепады и лавины обогащают ледник обломочным материалом с ещё большей интенсивностью, чем в 1970-е годы, когда верхние части склонов были закрыты ледниками.

После катастрофы 2002 г. существенно изменились условия не только таяния, но и аккумуляции на формирующемся новом леднике. Как показал анализ метеоусловий за последние 50 лет (см. рис. 6), зимние осадки в первые 15 лет после катастрофы остались в бассейне Колки примерно на том же уровне, что и в 1960–70-х годах. Метелевый перенос снега в цирк юго-западными ветрами продолжается, лавины, как и прежде, приносят на днище большие массы снега. В настоящее время питание нового массива льда зависит почти исключительно от количества лавинного снега. У подножия тыловой стены цирка, кроме основного объёма выбросов из главного лавиносбора г. Джимарай-Хох, из года в год сохраняются ещё два крупных лавинных конуса. Лавинным снегом питается сформировавшаяся в 2010 г. узкая полоса фирново-

го поля у подножия г. Джимарай-Хох. Но если прежде, как отмечено ранее, треть объёма питания ледника Колка поступала из зоны висячих фирново-ледяных полей, то обвалы привели к их исчезновению именно в юго-западном углу цирка, где формируется новый ледник (см. рис. 4). Исчезли ледники № 8–10 на гребне и часть поля № 7 на Джимарай-хох (номера даны по книге [7], схема на стр. 12). Объём обвалившегося льда определить также сложно, и оценки разных авторов по материалам космических снимков и фотографий неоднозначны. Объём льда оценивался, например, от 8–13 млн м^3 [11] до 22 млн м^3 [12] и до 35 млн м^3 [3], площадь – $0,34 \text{ км}^2$ [13] и др.

Если до катастрофы 2002 г. площадь висячих полей составляла 31,4% всей поверхности питающих ледник склонов (лавиносборы плюс висячие поля по Ходакову [7]), то теперь, по нашим измерениям площадей по снимку аппарата Ресурс-П, эта величина уменьшилась до 17%. В пределах бассейна нового ледника сохранилась только часть фирнового поля на стене Джимарай-хох и почти целиком участки бывших полей № 11 и 12 на гребне, питающие приток, первым выдвинувшийся в 2003 г. Они обеспечили его продвижение по днищу вплоть до подножия левой морены. Кроме того, рельеф ледораздела Колка–Суатиси способствует усилению переноса снега метелями в цирк Колки именно на этом участке гребня. Изменился и режим круглогодичного питания ледника. Раньше обвалы с верхнего «этажа» вместе с накопленным зимой снегом поставляли материал в область аккумуляции ледника летом не менее активно, чем зимой. Теперь питания оказалось достаточно для формирования нового ледника лишь в тыловой, наиболее высокой части цирка. Прочие ледники правого склона, хотя и не тронутые обвалами на гребне, после катастрофы не продвигаются, а отступают. Для них прежние условия питания не могут компенсировать усилившегося летнего таяния. В 2010 г. заметно активизировался один из бывших правых притоков ледника Колка – № 15, поверхность его языка повысилась и покрылась трещинами [14]. Однако в последующие годы эти процессы активизации ледника не получили развития.

Несмотря на постоянно действующий метелевый перенос через гребень правого склона,

фирновые поля на месте обвалов так и не восстановились, пока здесь образуются лишь снежные карнизы. По нашему мнению, для этого есть несколько причин. Первые из них — увеличение летних температур и резкое усиление таяния ледников в последние два десятилетия на всём Кавказе (особенно катастрофическое таяние 2010 г.), охватившее также и верхние части ледниковых склонов [6]. Они привели к образованию озёр и вытаиванию коренных гряд в фирновых областях ледников, чему есть множество примеров, в том числе и в Казбек-Джигарайском районе. Р.А. Тавасиев [15] на основе анализа аэрофотоснимков обнаружил в августе—сентябре 2002 г. на ледоразделе Майли—Суатиси под скалами пика Пастухова на высоте 3900 м покрытое льдом озеро вытянутой формы длиной 32 м. В июле 2004 г. оно имело длину до 80 м, а в августе 2009 г. — около 300 м и было подо льдом лишь наполовину. В августе 2008 г. озеро длиной 20 м было впервые замечено на скальном отроге, разделяющем ущелья Майли и Колка, на высоте 3590 м. Автор приводит также сведения о небольшом озёре длиной 50 м в области питания ледника Мидаграбин, появившемся в 2004 г. на высоте 3600 м, и озере в районе вершины Зейгалан в 2009 и 2010 гг. (верховья Гизельдона), а также о селевом потоке, вырвавшемся на ледопаде Майли в 2010 г. Характерно, что почти все эти явления в разные годы наблюдались в июле, самом жарком месяце в ледниковой зоне Кавказа.

Другая причина — отсутствие поверхностей для накопления снега на гребне. Для формирования ледника необходимы не только достаточное количество осадков и большая высота гор, но и поверхность, на которой снег может откладываться и сохраняться. До катастрофы в приводораздельной части правого склона начиналась относительно пологая поверхность, переходящая в выпуклую на верхних участках фирновых полей, с нарастающей крутизной вниз по склону (см. рис. 4). Верхний этаж Колки был главной зоной метелевой аккумуляции, и лишь 15–20% переметаемого снега получала поверхность основного ледника, где зимние нисходящие ветры большой силы, нередко до 25–30 м/с, сметали с ледника почти весь снег [7]. Но после обвалов 2002 г. отвесный обрыв снега, льда и скал начинается прямо от гребня. Ветер несёт большую часть метелевых потоков без задержки прямо в

цирк. Часть снега выпадает на склонах, а ещё больше — на широком днище, где как и прежде он подвержен сильной дефляции зимой и полному стаиванию летом.

Существует ещё одно, не менее важное препятствие для образования фирновых полей на правом склоне. Мы уже неоднократно писали [8, 16 и др.], что под ледяными обрывами на гребне на высотах 4100–4200 м постоянно видны локальные участки, где зарождаются не только частые камнепады, но и чёрные полосы потёков талой воды и мелкозёма. Важно отметить, что эти участки таяния вот уже 15 лет сохраняются на тех же точно местах, что и выходы фумарол, обнаруженные в сентябре 2002 г. Иногда в летние сезоны с наиболее активным таянием полосы чёрных потёков растекаются шире, превращаясь в нижней части склона на скалах в грязевые ручейки и микросели — как это наблюдалось, например, в 2010 и 2012 гг. У гребня образование воды в результате тепла фумарол на границе между фирново-ледяными пластами плато Джигарай—Суатиси и коренными породами, возможно, происходит под толщей фирна и льда, и на стене мы наблюдаем уже её выход на поверхность (рис. 7).

Ничего подобного на Колке никогда не видели прежде, в том числе и на протяжении десятилетних наблюдений после подвижки 1969 г. — как при работах в той же пригребневой зоне правого склона, так и при многочисленных облётах района и съёмках с вертолёта. Более того, после 2002 г. подобные явления отмечены и на других участках Казбек-Джигарайского района. Р.А. Тавасиев сообщает о частичном обвале двух висячих ледников над ледником Зариу (северный склон г. Шау-Хох), который произошёл в 2003–2004 гг. После этого здесь в марте 2006 г. были видны такие же чёрные потёки талой воды из-под верхней части ледника, как на Колке. Они увеличились в августе и замёрзли в сентябре, но достаточно чётко были видны и в следующие годы [15].

Исследованиями геофизиков после Кармадонской катастрофы и данными тепловой космической съёмки была доказана активизация глубинных процессов в недрах «спящего» вулкана Казбек, которая привела к образованию близповерхностной магматической камеры и появлению под ледником новой тепловой ано-



Рис. 7. Потёки талой воды и мелкозёма из-под снежно-фирновых толщ на гребне Джимарай-Хох (фото с борта вертолётa И. Лаврентьева, 16.06.2014 г.)

Fig. 7. Flows of melt water and fine earth from under snow-firn thickets of the Jimarai-Khokh plateau (photo by I. Lavrentiev from helicopter, June 16, 2014)

малии [4, 17]. Именно это стало главной причиной критического повышения температур и давления газов в недрах под ледником, накопления под ним большого количества воды и выброса ледника взрывом газа из ложа [8]. Аномалия резко проявилась прямо под ледником Колка и захватила также участок гребня и плато на ледоразделе с ледником Суатиси. В настоящее время ни вулканическая, ни тектоническая активность Казбека не прекратилась, на что указывают не только постоянные выходы фумарол, но и данные геологического мониторинга. Для отслеживания динамики тепловой аномалии под ледником Колка, влияние которой распространяется и к северу, вдоль долины Геналдона, в августе 2011 г. были выполнены наблюдения в районе аномалии близ Нижнекармадонских источников [17]. С помощью серии наземных термодатчиков, помещённых в шурфы глубиной 1 м, в течение месяца с интервалом 1 ч отслеживалась эндогенная температура. Анализ хода температур на разных датчиках позволил сделать вывод, что и через девять лет после катастрофы в преде-

лах территории устойчивой тепловой аномалии происходят периодические поднятия из глубины порций магматического расплава.

Тектоническая активность в районе может способствовать вертикальному теплопереносу из глубин по разломам и разрывным нарушениям. По космическим снимкам геологи определили «подновление» некоторых тектонических нарушений в бассейне Колки перед катастрофой — например, расширилась зона дробления вдоль крупного разрыва в районе массива Джимарай-Хох [18]. И.М. Васьков приводит данные о современном активном надвиге в Казбек-Джimarайском массиве со скоростью поднятия около 7 мм/год и горизонтального смещения порядка 11–13 мм/год, что постоянно увеличивает крутизну правого склона над ледником Колка и уменьшает его устойчивость [3].

Последний яркий пример локального поступления тепла из недр Казбека — неожиданный обвал в области питания Девдоракского ледника в мае 2014 г. На высотах 4200–4500 м отвалился массив скальной промёрзшей породы

вместе с покрывающим его льдом, общим объёмом, по разным оценкам, примерно 2 млн м³, с выбросами пара и газа из открывшихся fumarol [19]. Очевидно, что данные мониторинга вулканогенных и тектонических процессов в недрах Казбекского массива не менее важны для дальнейших исследований ледников этого района, чем слежение за колебаниями метеоусловий или скоростью нарастания моренного чехла на новом леднике Колка.

Заключение

К настоящему времени в пустом цирке ледника Колка завершился процесс формирования цельного ледникового тела, и далее можно будет проследить, окажется ли эффективен новый механизм питания ледника для обеспечения его развития в условиях современного климата. Динамика размеров возрождённого ледника за 15 лет показывает, что на современном этапе он близок к состоянию балансового равновесия. Его фронт почти стабилен уже шесть лет, после 2010 г. наращивание площади ледника крайне незначительно. Поступление льда от основных трёх истоков ледника происходит неравномерно, участки повышения и понижения поверхности чередуются во времени, но в целом изменение высоты поверхности невелико и можно предположить, что в настоящий момент приход вещества в ледник близок по величине к абляции. Оценить количественно баланс массы традиционными гляциологическими методами в условиях интенсивного лавинного питания сложно и небезопасно. Для решения этой задачи более подходят современные дистанционные методы, позволяющие определить изменение объёма ледника по материалам съёмки высокого разрешения с космических аппаратов или с помощью беспилотников.

Условия для накопления снега и льда на днище цирка сохранились лишь в тыловой, наиболее высокой части ложа прежнего ледника. Для остальных бывших правых притоков Колки питания недостаточно, чтобы компенсировать усилившееся летнее таяние, поэтому они не продвигаются, а отступают. По сравнению с тридцатилетием 1960–80-х годов (когда изучалась пульсация Колки 1969/70 г.), в первые десяти-

летия XXI в. зимние осадки в районе ледника остались примерно на том же уровне, тогда как летняя температура воздуха повысилась на 2 °С. На усиление таяния ледников влияет также нагрев каменистой поверхности ложа и боковой морены, открывшихся после выброса ледника в 2002 г. Однако таянию поверхности нового ледника препятствует сплошной моренный чехол. Повышенная скорость накопления морены на новом леднике связана с активизацией поступления обломочного материала со склонов, освободившихся от ледников после обвалов.

Для прежнего ледника Колка треть объёма питания поступала с высоких висячих фирновых полей. После обвалов 2002 г., на гребне правого борта цирка постоянно образуются снежные карнизы, но висячие поля пока не восстанавливаются. Причины этого — общее усиление таяния даже на верхних частях ледниковых склонов, отсутствие поверхностей для накопления снега у гребня после обвалов, а также действие локальных потоков тепла и выходов fumarol, вызванных новейшими проявлениями вулканической активности в недрах массива Казбек.

В настоящее время главные факторы формирования баланса льда нового ледника — лавинная концентрация снега, усиленная абляция льда, нестационарный процесс бронирования ледника моренным материалом. Каким будет соотношение этих факторов, покажет будущее. Масса аккумуляции будет продолжать нарастать, тогда как ход абляции неравномерен во времени — моренный чехол на поверхности будет значительно задерживать таяние. Климатические прогнозы в настоящее время неоднозначны, причём процессы саморазвития ледника могут оказаться сильнее влияния климатических факторов. Необходимо учитывать и внутреннюю динамику потоков льда в теле нового ледника. Возможно, ледник будет увеличивать свои размеры даже в случае продолжения потепления начала XXI в. На рис. 6 заметно, что летняя температура воздуха в районе ледника продолжает оставаться высокой, хотя рост её после 2011 г. уже не наблюдается. В то же время поступление тепла из недр вулканического массива не прекращается после катастрофы до настоящего времени, что может привести к непредсказуемому и опасному развитию событий, подобному обвалу на Девдотском леднике в 2014 г.

Благодарности Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН П-15 проект «Разработка и реализация методов мониторинга потенциально опасных гляциальных процессов в районах Центрального Кавказа»; гранта РГО-а 17-05-41037 «Геоинформационное картографирование ледниковых систем на территории России для оценки ресурсного потенциала и возможных рисков при хозяйственном освоении ледниковых районов».

Acknowledgements. This work was supported by the project of the Program of Presidium of the RAS P-15 «Development and implementation of methods for monitoring potentially dangerous glacial processes of the Central Caucasus areas»; Grant of the Russian Geographical Society RGO-a 17-05-41037 «GIS mapping of glacier systems on the territory of Russia to assess the resource potential and possible risks in the economic development of the glacial regions».

Литература

1. Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A. The September 2002 Kolka Glacier Catastrophe in North Ossetia, Russian Federation: evidence and analysis // Mountain Research and Development. 2004. V. 24. P. 78–83.
2. Муравьев Я.Д. Газовое извержение в цирке – возможная причина развития подвижек ледника Колка по катастрофическому сценарию // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 44–55.
3. Васков И.М. Возможный механизм обвала и динамика ледово-каменных масс в верховьях р. Геналдон // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2004. Вып. 2. С. 34–45.
4. Гурбанов А.Г., Кусраев А.Г., Чельдиев А.Х. Первые результаты исследования эндогенных процессов в Геналдонском и прилегающих ущельях // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2004. Вып. 3. С. 2–8.
5. Haeblerli W., Huggel C., Käb A., Oswald S., Polkvoj A., Zotikov I., Osokin N. The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002 – an extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia (Russian Caucasus) // Journ. of Glaciology. 2004. V. 50 (171). P. 533–546.
6. Лебедева И.М., Рототаева О.В. Климатический фактор подвижки ледника Колка на Кавказе в 2002 г. // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 155–161.
7. Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Исследование пульсирующего ледника Колка. М.: Наука, 1983. 169 с.
8. Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Десинов Л.В., Осокин Н.И., Чернов Р.А. Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше. М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. 184 с.
9. Никитин С.А., Веснин А.В., Осипов А.В. Результаты радиолокационного зондирования пульсирующих ледников Кавказа и Памира // МГИ. 2005. Вып. 99. С. 151–153.
10. Поггенполь Н.В. По северным долинам Казбекского массива и первое восхождение на Майли-

References

1. Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A. The September 2002 Kolka Glacier Catastrophe in North Ossetia, Russian Federation: evidence and analysis. Mountain Research and Development. 2004, 24. 78–83.
2. Muravyov Ya.D. Gas eruption in the circus is a possible cause of development of the Kolka glacier movements by the catastrophic scenario *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 44–55. [In Russian].
3. Vaskov I.M. Possible mechanism of collapse and dynamics of ice-rock masses in the upper reaches of the Genaldon river. *Vestnik Vladikavkaz Scientific Center*. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2004, 2: 34–45. [In Russian].
4. Gurbanov A.G., Kusraev A.G., Chelstiev A.Kh. The first results of the study of endogenous processes in the Genaldonsky and adjacent gorges. *Vestnik Vladikavkaz Scientific Center*. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2004, 3: 2–8. [In Russian].
5. Haeblerli W., Huggel C., Käb A., Oswald S., Polkvoj A., Zotikov I., Osokin N. The Kolka-Karmadon rock/ice slide of September 20, 2002 – Ossetia (Russian Caucasus). *Journ. of Glaciology*. 2004, 50 (171): 533–546.
6. Lebedeva I.M., Rototaeva O.V. The climatic factor of the movement of the Kolka glacier in the Caucasus in 2002. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 155–161. [In Russian].
7. Rototaev K.P., Khodakov V.G., Krenke A.N. *Issledovanie pulsiyushchego lednika Kolka*. Study of the pulsating Kolka glacier. Moscow: Science, 1983: 169 p. [In Russian].
8. Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Desinov L.V., Osokin N.I., Chernov R.A. *Karmadonskaya katastrofa – chto sluchilos i chego zhdatsya dalshe*. Karmadon disaster: what happened and what to expect further. Moscow: «Koдекс» Publishing House, 2014: 184 p. [In Russian].
9. Nikitin S.A., Vesnin A.V., Osipov A.V. Results of radar sounding of the pulsating glaciers of the Caucasus and the Pamirs. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2005, 99: 151–153. [In Russian].
10. Poggenpol N.V. On the northern valleys of the Kazbek Massif and the first ascent to Miley-Hoch. Yearbook

- хох // Ежегодник Русского горного общества за 1903 г. 1905. Т. 3. С. 1–37.
11. Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haeberli W., Käb A., Polkvoj A., Galushkin I., Evans S.G. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2005. V. 5. P. 173–187.
12. Drobyshev V.N. Glacial catastrophe of 20 September 2002 in North Ossetia // *Russ. Journ. Earth. Sciences*. 2006. V. 8. ES4004. doi: 10.2205/2006ES000207. [In Russian].
13. Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А. Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные // *Криосфера Земли*. 2005. Т. 9. № 4. С. 62–71.
14. Чернов Р.А., Рототаева О.В. О развитии посткатастрофических процессов в цирке ледника Колка и долине р. Геналдон (северный склон Казбекского массива) // *Лёд и Снег*. 2010. № 4. С. 25–29.
15. Тавасиев Р.А. О некоторых дискуссионных вопросах, связанных с катастрофическим сходом ледника Колка // *Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра*. Владикавказ: Центр геофиз. исслед. Владикавк. науч. центра РАН и РСО-А, 2014. С. 272–283.
16. Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Чернов Р.А. Десять лет после кармадонской катастрофы в Северной Осетии – о причинах события и процессах восстановления ледника // *Изв. РАН. Серия географическая*. 2014. № 3. С. 51–65.
17. Гурбанов А.Г., Газеев В.М., Лексин А.Б., Докучаев А.Я., Цуканова Л.Е. Изучение динамики теплового поля в контурах выявленной дистанционными методами тепловой аномалии (по данным наземных термодатчиков). // *Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра*. Владикавказ: Центр геофиз. исслед. Владикавк. науч. центра РАН и РСО-А, 2014. С. 74–87.
18. Корниенко С.Г., Ляшенко О.В., Гурбанов А.Г. Выявление признаков очагового магматизма в пределах Казбекского вулканического центра по данным тепловой космической съемки. // *Вестн. Владикавк. научн. центра*. 2004. Вып. 3. С. 25–32.
19. Тавасиев Р.А., Галушкин И.В. Каменно-ледовый обвал с горы Казбек 17 мая 2014 года // *Вестн. Владикавк. науч. центра*. 2014. Вып. 2. С. 43–45.
- of the Russian Mining Society for 1903. 1905, 3: 1–37. [In Russian].
11. Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haeberli W., Käb A., Polkvoj A., Galushkin I. Evans S.G. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2005, 5: 173–187.
12. Drobyshev V.N. Glacial catastrophe of 20 September 2002 in North Ossetia. *Russ. Journ. of Earth Sciences*. 2006, 8: ES4004. doi: 10.2205 / 2006ES000207. [In Russian].
13. Tutubalina O.V., Chernomorets S.S., Petrakov D.A. Glacier Kolka before the 2002 catastrophe: new data. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2005, 9 (4): 62–71. [In Russian].
14. Chernov R.A., Rototaeva O.V. On the development of post-catastrophic processes in the circus of the Kolka glacier and the valley of the river. Genaldon (the northern slope of the Kazbek massif). *Led i Sneg*. Ice and snow. 2010, 4: 25–29. [In Russian].
15. Tavasiev R.A. On some discussion issues related to the catastrophic descent of the Kolka Glacier. *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra*. Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow. Vladikavkaz: Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RNO-A, 2014: 272–283. [In Russian].
16. Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Chernov R.A. Ten years after the Karmadon disaster in North Ossetia - about the causes of the event and the processes of the glacier restoration *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series Geographical. 2014, 3: 51–65.
17. Gurbanov A.G., Gazeev V.M., Leksin A.B., Dokuchaev A.Ya., Tsukanova L.E. The study of the dynamics of the thermal field in the contours of the thermal anomaly detected by remote methods (according to ground-based temperature sensors). *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra*. Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow. Vladikavkaz: Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RNO-A, 2014: 74–87. [In Russian].
18. Kornienko S.G., Lyashenko O.V., Gurbanov A.G. Identification of signs of focal magmatism within the Kazbek volcanic center according to thermal space survey data. *Vestnik Vladikavkaz scientific Center*. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2004, 3: 25–32.
19. Tavasiev R.A., Galushkin I.V. Stone-ice collapse from Mount Kazbek on May 17, 2014 *Vestnik Vladikavkaz scientific Center*. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2014, 2: 43–45. [In Russian].