

**В.М. Котляков, О.В. Рототаева, Г.А. Носенко,
Л.В. Десинов, Н.И. Осокин, Р.А. Чернов**

**КАРМАДОНСКАЯ
КАТАСТРОФА:
ЧТО СЛУЧИЛОСЬ И
ЧЕГО ЖДАТЬ ДАЛЬШЕ**



Русское
географическое
общество



V.M. Kotlyakov, O.V. Rototaeva, G.A. Nosenko,
L.V. Desinov, N.I. Osokin, R.A. Chernov

**KARMADON
CATASTROPHE:
WHAT HAPPENED AND
WHAT WE SHOULD
WAIT FOR IN FUTURE**

2014

**В.М. Котляков, О.В. Рототаева, Г.А. Носенко,
Л.В. Десинов, Н.И. Осокин, Р.А. Чернов**

**КАРМАДОНСКАЯ
КАТАСТРОФА:
ЧТО СЛУЧИЛОСЬ И
ЧЕГО ЖДАТЬ ДАЛЬШЕ**

2014

УДК 551.32
ББК 26.8
К 73

*Научное иллюстрированное издание создано в соответствии с грантом
Русского географического общества*

Утверждено к печати Учёным советом Института географии РАН

Рецензенты:

кандидат геолого-минералогических наук Ю.П. Баденков

кандидат географических наук А.Ф. Глазовский

Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Десинов Л.В., Осокин Н.И., Чернов Р.А.

К 73 Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. – 184 с.

ISBN 978-5-904280-50-5

Книга посвящена Кармадонской катастрофе 2002 года в Северной Осетии, виновником которой стал небольшой ледник Колка в массиве Казбека. Анализируются прежние подвижки этого пульсирующего ледника и уникальное событие 2002 г. – выброс ледника целиком из ложа и формирование высокоскоростного ледово-водно-каменного селя, который пронёсся по Геналдонской долине на 16 км и привёл к большим разрушениям и потере более ста двадцати жизней. Рассматриваются гипотезы широкого круга экспертов о механизме и причинах грандиозной катастрофы. Книга основана на материалах публикаций, на результатах многолетних исследований ледника Колка экспедициями Института географии Академии наук в 1970-е годы во время пульсации ледника и в 2002–2014 гг. при изучении причин катастрофы и процессов возрождения нового ледника в пустом цирке. Выполнялся анализ аэрофотосъёмки, фотографий разных лет – из космоса, наземных и с вертолёта. Приведены сведения и о других кавказских ледниках с известными подвижками. Текст дополнен многочисленными иллюстрациями.

Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Desinov L.V., Osokin N.I., Chernov R.A.

Karmadon catastrophe: what happened and what we should wait for in future. – Moscow: «Kodeks» Publishing House, 2014. – 184 p.

ISBN 978-5-904280-50-5

This book presents an illustrated analysis of the Karmadon catastrophe of 2002 that happened in the North Osetiya and resulted in the loss of more than one hundred and twenty lives and caused great destruction in the river Genaldon valley in the North Caucasus. The cause of the catastrophe was the relatively small Kolka Glacier located on the north slope of the Kazbek-Jimaraisky mountain mass. This glacier was already known due to its surges in the past. The book contains information about previous surges of the Kolka Glacier in 1902 and 1969. The most recent surge of 1969 was investigated by the Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences whose expedition worked in the region for nine years after the glacier advance in 1969.

In 2002 the unexpected catastrophic rapid advance of this surging glacier and the resulting formation of a high-speed ice-water-stone mudflow are now understood to have been an exceptional phenomenon having no analogues in the world in terms of the scale and development of the process. The hypotheses of a range of experts on the causes and mechanism of this unique phenomenon are critically considered in the book. The problem of the Kolka Glacier renewal in its cirque (corrie) and the possibility of new catastrophic events in this glacier are discussed on the basis of recent observations. Attention is also given to other *Caucasus glaciers* which have also shown advances. The book is based on material extracted from publications, data of expeditions, analysis of aerial surveys, photographs taken from space for different years (namely from the International Space Station, satellites Terra, Landsat, QuickBird, and others) numerous ground-based and airborne (helicopter) photographs as well as glacial and meteorological calculations.

© В.М. Котляков, О.В. Рототаева, Г.А. Носенко, Л.В. Десинов, Н.И. Осокин, Р.А. Чернов, 2014 г.

© Русское географическое общество, 2014 г.

ВВЕДЕНИЕ

Разнообразие нашей планеты необыкновенно. Всего одно небесное тело несёт на себе и почти космический холод до 90 градусов ниже нуля в Антарктиде, и 50-градусную жару на африканских просторах; знойные пустыни в Австралии и Африке и дождливые океанические побережья; ровные как стол низменные равнины, подобные Западно-Сибирской низменности, и окружающие их горы, на Азиатском континенте поднимающиеся почти до 9 тыс. метров над уровнем моря.

Горы можно увидеть на всех континентах земного шара. Они возвышаются и непосредственно на берегах океанов и морей, как, например, на Северо- и Южно-Американских континентах, и встают высочайшими массивами внутри Евроазиатского материка. От подножий гор до их вершин природа закономерно изменяется в соответствии с высотной поясностью, потому что по мере подъёма выпадает больше осадков, но становится всё холоднее. А верхние части горных хребтов увенчивает нивально-гляциальный пояс, царство снега и льда.

Здесь на склонах и вершинах лежат массивы льда, существующие уже сотни и тысячи лет. Верховья долин также заполнены снегом и льдом, вниз по долинам спускаются ледники. Разнообразие ледниковых форм приводит к необычайной красоте горных пейзажей. Ледники и снежные поля в верхних частях гор привлекают сотни и тысячи людей, которые хотят насладиться горной природой и получить удовольствие от созерцания этой, порою неземной красоты.

Но горная природа коварна. Это поистине царство «снежной королевы», где суровая красота соседствует с тревогами и опасностями. «Стены чертогов были наметены снежными метелями, окна и двери пробиты свирепыми ветрами... Посреди самого большого снежного зала, бесконечного и пустого, сверкало замёрзшее озеро. Лёд на нём треснул, и трещины разделил его на тысячи кусков». Так написал Ханс Христиан Андерсон в сказке о снежной королеве. Но эти поэтические строки очень близки к реальности ледниковой природы, где постоянно таятся опасности и происходят грозные явления природы, связанные с её ледниковой сущностью.

Величественные и спокойные, в действительности ледники опасны и коварны. Лёд постоянно движется вниз по склону или долине,

в теле ледников рождаются трещины, возникают каналы, по которым несутся мощные потоки воды. В нижней части ледникового языка из-под льда, как правило, вытекает речка, которая временами превращается в мощный поток, сметающий всё на своём пути. Такие события случаются на многих ледниках, но иногда они становятся катастрофическими и приводят к значительным жертвам и разрушениям. Такое развитие событий характерно для особых ледников, учёные их называют пульсирующими.

Пульсирующие ледники – это особый класс ледников, которые отличаются внезапными продвижениями своих концов, вне видимой связи с изменениями климата. Вот что написано о них в Гляциологическом словаре (1984, с. 358–359): Это «ледник, которому свойственны резко выраженные релаксационные колебания, приводящие к перестройке его динамического режима и к перераспределению в нём вещества без изменения общей массы. Подобная динамическая неустойчивость обусловлена взаимодействием внешних факторов с реологическими свойствами льда ледника, что приводит к периодическим колебаниям с большой амплитудой скорости движения. Резкое перемещение вещества в леднике, как правило, сопровождающееся продвижением его конца, представляет собой подвижку ледника». Добавим, что это явление может быть чрезвычайно опасным.

Пульсирующие ледники встречаются почти во всех горных системах земного шара. Особенно много их на Аляске, Шпицбергене, Памире, в горах Центральной Азии. Известны они и на Кавказе. В этой книге мы поведём речь о леднике Колка, лежащем на северном склоне Центрального Кавказа, в районе горной вершины Казбека и ныне известном во всём мире из-за трагических событий, случившихся здесь в 2002 г.

Авторы книги в разные годы участвовали в исследованиях этого ледника, и здесь излагают свой взгляд на события более чем вековой протяжённости. Мы попытаемся дать оценку всех необычных событий на леднике Колка с начала XX столетия до нашего времени и покажем, что причиной случившегося на леднике, названного кармадонской катастрофой, была цепочка природных явлений, повлиявших на этот пульсирующий по своей природе ледник.

В высокогорных районах совсем не редко ледники вызывают природные катастрофы. К их числу следует отнести прорывы подпруженных ледниками озёр или резервуаров воды, скопившейся во внутрiledниковых водоёмах; потоки разрушительных селей, гля-



Кавказский ледник Адиши

циальные катастрофы при землетрясениях и извержениях вулканов; наиболее разнообразные в своих проявлениях подвижки пульсирующих ледников. Подвижки приводят к подпруживанию рек и катастрофическим паводкам, многочисленным разрушениям посёлков, мостов, дорог, человеческим жертвам.

Именно к таким трагическим последствиям привела Кармадонская катастрофа 2002 года в Северной Осетии, унёсшая более ста двадцати человеческих жизней и вызвавшая значительные разрушения в долине р. Геналдон.

Виновником катастрофы был сравнительно небольшой пульсирующий ледник Кавказа — ледник Колка, расположенный на северном склоне Казбек-Джимарайского массива и уже известный своими подвижками в прошлом. Главное отличие пульсирующих ледников от обычных — неустойчивость их динамического режима, не связанная с климатическими колебаниями, а вызванная собственным строением ледника и особенностями движения льда, которое чаще всего затруднено либо на протяжении всего ледника, либо на определённом его участке. Это приводит к подпруживанию льда, который в течение многих лет накапливает массу перед препятствием, пока не достигнет определённого критического объёма.

Когда тормозящие силы не могут противостоять сдвигающим, происходит резкая разрядка напряжения, язык ледника дробится на блоки, продвигается вниз, в долину со скоростью в десятки, а иногда и в сотни раз больше «обычных» скоростей движения льда в леднике. Эта разгрузка, или подвижка ледника может происходить без особых последствий, меняя только ландшафт, но она всегда опасна и нередко приводит к катастрофическим событиям.

Впервые следы внезапных наступаний ледников с гибелью людей были отмечены в XVI—XVII вв. Альпах, а с начала XVIII в. стали появляться первые документальные сведения о ледниковых катастрофах в Перу. В России с этим явлением впервые в начале XIX в. столкнулись русские инженеры при прокладке трассы Военно-Грузинской дороги. Подвижки Девдоракского ледника и вызванные ими периодические катастрофические выбросы льда — знаменитые «завалы» — неоднократно перекрывали сток р. Терека, и его подпруженные воды затем прорывались катастрофическими паводками. Отголоски этих событий мы находим даже в произведениях А.С. Пушкина и М.Ю. Лермонтова.

В дальнейшем поступали новые сведения о пульсирующих ледниках, но они касались лишь результатов подвижек, в то время как об их начале и развитии не было никаких сведений. Резкие продвижения ледников долгое время считались аномальным явлением и объяснялись случайными внешними причинами. Лишь в отдельных работах, публиковавшихся на рубеже XIX и XX веков, но не получивших широкой поддержки, предпринимались попытки объяснить подобные явления внутренними процессами в самом леднике.

Толчком к изучению пульсирующих ледников стали 1960-е годы, когда в 1963 г. на Памире случилась катастрофическая подвижка



Неровная поверхность горного ледника. Памир

ледника Медвежий с прорывом подпруженного озера (Долгушин и др., 1964). А в конце 1969 г. неожиданно на несколько километров вниз по долине р. Геналдон в бассейне Терека продвинулся ледник Колка, что послужило причиной и основой девятилетних работ, которые здесь вела экспедиция Института географии АН СССР (Рототаев и др., 1983).

Ледник Колка стал виновником и Кармадонской катастрофы 2002 года. На этот раз преждевременный срыв пульсирующего ледника и образование высокоскоростного ледово-водно-каменного селя оказалось явлением совершенно особого типа, не имеющим аналогов в мире по своему масштабу и специфике развития процесса.

Со времени катастрофы прошло уже более десяти лет, за это время были опубликованы результаты разносторонних исследований, высказаны гипотезы самых разных специалистов о причинах

и механизме уникального явления. Но по-прежнему живой интерес вызывает вопрос о восстановлении ледника Колка в его цирке и о возможности новых катастрофических проявлений этого ледника. Обращается также внимание и на другие ледники Кавказа, известные своими подвижками.

После Кармадонской катастрофы в верховьях долины р. Геналдон сотрудники Института географии РАН неоднократно проводили наблюдения за динамикой процессов в цирке бывшего ледника и началом накопления нового льда на ложе. В этой книге использованы литературные материалы, данные экспедиционных наблюдений, анализ аэрофотосъёмок и космических снимков разных лет — Международной космической станции (МКС), спутника Terra ASTER, Landsat, QuickBird и др., многочисленные фотографии как наземные, так и с вертолёта, и гляциометеорологические расчёты.

ВЗГЛЯД В ПРОШЛОЕ ЛЕДНИКА КОЛКА

Строение ледника

Ледник Колка расположен на северном склоне Казбек-Джидарайского массива в истоках реки Геналдон, относящейся к бассейну Терека (рис. 1). Ледники здесь немногочисленны, в верховьях реки доминирует ледник Майли – один из крупнейших в Северной Осетии. Ледник круто спускается от фирновых полей Казбека и образует в среднем течении мощный ледопад. Площадь ледника 6,8 км², длина 6,4 км. На левом склоне долины Геналдон в 700 м ниже конца ледника, на 50 м над урезом реки с отметкой 2250 м находится выход Верхнекармадонских минеральных источников с температурой воды до 40–55 °С. Уже в конце XIX в. в этих местах на базе источников был создан народный курорт, и местные жители приезжали сюда лечиться горячей минеральной водой.

Рис. 1. Ледники Казбекского массива. Снимок с Международной космической станции 2004 г. Ледники: 1 – Колка, 2 – Майли, 3 – Чач, 4 – Девдоракский, 5 – Абано, 6 – Орцвери, 7 – Мна, 8 – группа Суатиси. Вершины: К – Казбек, М – Майли-Хох, Д – Джидарай-Хох



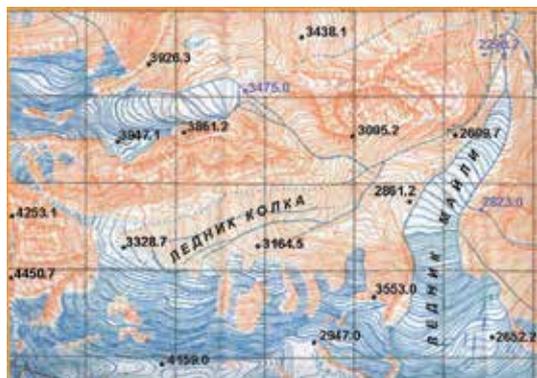


Рис. 2. Топография района ледников Колка и Майли

Слева от ледника Майли в пологом каре лежит небольшой ледник Колка (рис. 2). Ледники разделены, как мысом, «треугольником» морен. Колка – карово-долинный ледник с асимметричным питанием. В спокойные периоды между подвижками ледник имеет площадь 2,47 км², а вместе с висячими ледниками 3,74 км². Конец ледника в такое время лежит на высоте

около 2950 м. Тыловая часть ледника поднимается до 3450 м, а наиболее высокий юго-западный его исток начинается с высоты 3850 м под крутыми стенами горы Джимарай-Хох (4780 м) (рис. 3). Длина ледника с учётом истока составляет 3130 м (Рототаев и др., 1983).

Правый скалистый склон его крут и поднимается над ледником на 1000–1500 м. С его гребня на высотах 4000–4500 м спускаются разорванные трещинами участки фирновых полей и висячие ледники, покрывающие большую часть склона. Активным источником питания ледника Колка служат снежные лавины, обвалы фирна и льда, происходящие постоянно в течение всего года (рис. 4).

Пологая и довольно ровная поверхность ледника забронирована моренным чехлом, источником которого служит обломочный материал, обильно поступающий не только с правого борта, но и с крутых склонов тылового обрамления ледника – массивов Джимарай-Хох и Шау-Хох. Более двух третей ледниковой поверхности защищены от таяния слоем морены толщиной от 10 см до 1 м (рис. 5). Вдоль левого края на всём протяжении ледника тянется высокий ровный вал береговой морены. Он играет в жизни ледника Колка особо важную роль, затрудняя отток льда, поступающего с правого борта, вниз по долине. Область питания и средняя часть ледника ориентированы на северо-восток, затем язык поворачивает на восток.

Судя по морфологии бассейна ледника Колка, в 1970-х годах предполагалось, что ледник залегает на относительно выровненном, но переуглублённом ложе без существенных выступов и имеет толщину 60–100 м, с максимальными отметками около 150 м (Ро-



Рис. 3. Массив Джимарай-Хох и тыловая часть цирка ледника Колка в 1970-е годы. Фото О.В. Рототаевой

тотаев, 1974). Это подтвердила наземная радиолокационная съёмка, выполненная в 1988 г. сотрудниками Томского государственного университета (Никитин и др., 1995). В средней части ледника толщина льда оказалась более 100 м на протяжении километрового участка продольного профиля, ближе к тыловой части выявлено 147 м. Зона максимальных глубин вытянута вдоль ледника и смещена к левому борту (рис. 6).

Причины такого строения ледника – интенсивное питание лавинами и обвалами льда; малые уклоны ложа; упор стекающего льда в сдерживающий левый борт и последующий крутой разворот линий тока льда вправо; массивный полого залегающий язык с нарастающим во времени моренным чехлом, затрудняющим таяние; широкая чаша цирка с относительно узким выходом. Всё это вызывает постоянное подпруживание льда, накопление избыточных масс и нарастающее напряжение сдвигающих сил, приводящих к быстрой разгрузке льда. Такие же причины приводили к регуляр-



Рис. 4. Обвал фирна на правом борту ледника Колка, 1970-е годы. Фото О.В. Рототаевой

ным пульсациям и далёкого от ледника Колка ледника Муркар на Восточном Кавказе.

Расчёты показали, что в течение полувека перед подвижкой 1969 г. положительный баланс массы ледника при условии относительного постоянства климата обеспечивал приращение его массы не менее чем на 1–1,3 млн тонн ежегодно. Но в последние 20–25 лет до подвижки масса льда нарастала с очевидным ускорением. Скорость движения льда в теле ледника составляла в это время примерно 25 м/год, или 7 см/сутки (Рототаев и др., 1983).

Хотя при достижении критической массы ледника разгрузка льда неизбежна, характер её может быть различным. Прошлые подвижки ледника Колка это наглядно показали.

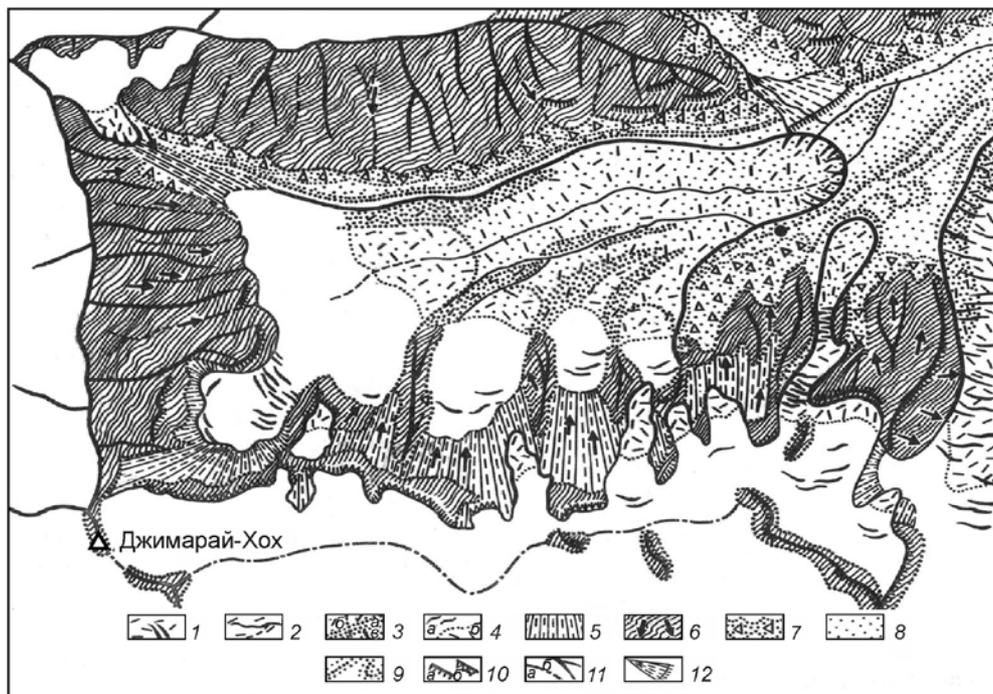


Рис. 5. Морфологическая схема ледника Колка (Рототаев и др., 1983, с. 19). 1 – ледниковая поверхность в зоне абляции, трещины во льду; 2 – водотоки на льду; 3 – морена на льду: а – основные «потоки» морены, б – сплошной чехол, в – разреженный покров; 4 – трещины: а – фирновых полей, б – граница фирна; 5 – коренные склоны, покрытые маломощным неподвижным натёчным льдом с выходами скал; 6 – массивы и островные выходы коренных пород. Стрелки – пути активных камнепадов; 7 – осыпные конусы и шлейфы; 8 – моренные отложения, различного возраста; 9 – основные моренные береговые валы и террасы; 10 – обрывы: а – скальные, б – фирново-ледовые; 11 – водораздельные гребни и отроги (а) и основной ледораздел (б); 12 – флювиогляциальные конусы выноса

Подвижка ледника Колка в 1902 г. и сведения о более ранних событиях

А.В. Пастухов при восхождении на вершину Казбека в 1889 г. собирал сведения о ледниках района Майли. Верхне-Кармадонские источники были случайно открыты в 1863 г. охотником из селения Тменикау Тепсарико Цараховым. В то время они находились «среди ледника». Царахов обнаружил в леднике провал, из которого шёл пар, а на дне его оказалась «тёплая вода». Через восемь лет ледник отступил, и открылись два из трёх источников с температурой воды 42 °С, к ним часто приходили пить воду туры. Царахов организовал

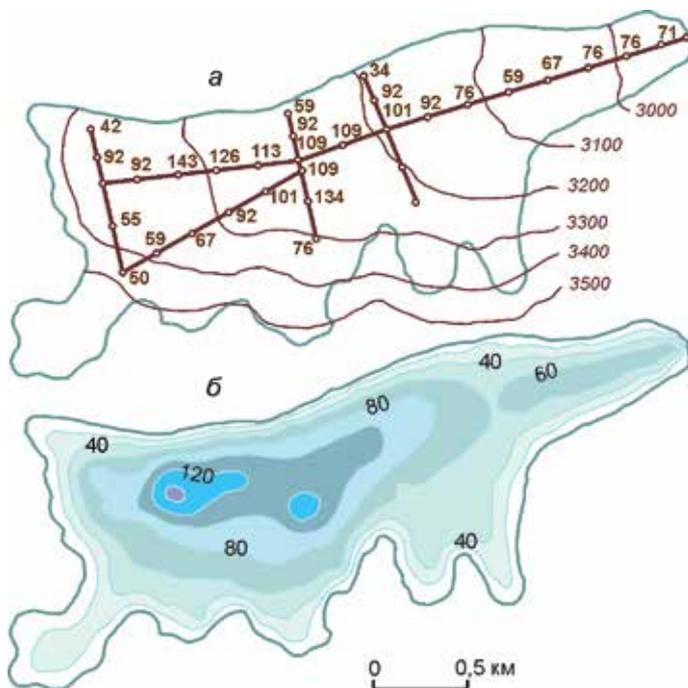


Рис. 6. Толщина ледника Колка по данным наземной радиолокационной съёмки 1988 года. *а* – маршруты радиозондирования и некоторые характерные значения толщины льда; *б* – карта толщины льда

здесь примитивный «народный курорт», на который затем в течение многих лет приезжали лечить «все болезни» не только местные жители, но даже из дальних округов. В 1889 г. Тепсарико Царахов, которому было далеко за пятьдесят, согласился быть проводником А.В. Пастухова при восхождении на Казбек, и они вдвоём с большими трудностями достигли вершины, тогда как сопровождавшие Пастухова двое казаков прошли лишь часть пути и вернулись.

В июле 1889 г. А.В. Пастухов видел конец ледника Майли всего в 15 сажнях (32 м) от источников (рис. 7). «Лет 60 тому назад ледник этот простирался на две версты ниже теперешнего его конца. Затем, в течение пяти лет он настолько оттаял, что конец его очутился почти около горячих источников. В августе месяце 1834 г. он двинулся вниз и со страшным шумом и треском продолжал своё движение до марта месяца следующего года. За это время он спустился более чем на 1,5 версты вниз. ...После этого через разные промежутки времени он двигался ещё пять раз и проходил всё меньший и меньший путь. Наконец, в последний раз, 9 лет назад, он прошёл

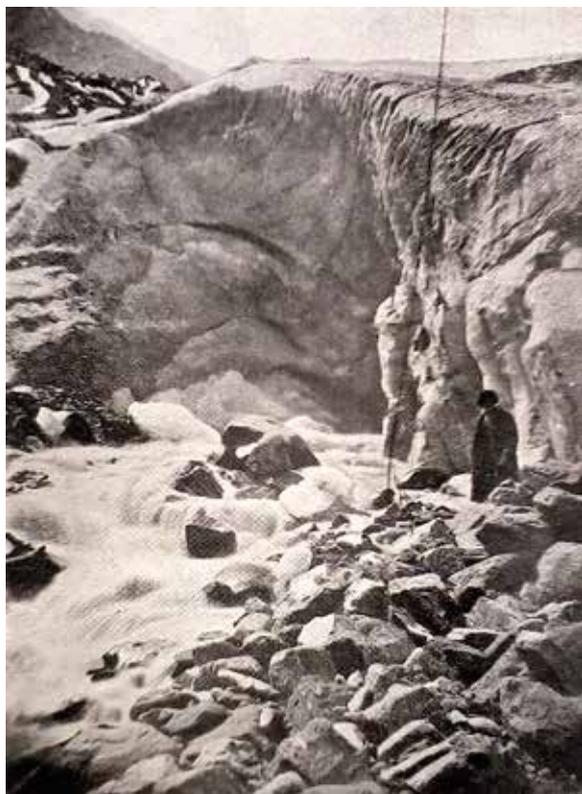


Рис. 7. Ледяная пещера на конце ледника Майли. С фотографии А.В. Пастухова (из книги: В тущобах Маньчжурии и наших восточных окраин. Сборник очерков, рассказов и воспоминаний Военных топографов под ред. М.Н. Левитского. Одесса: Типо-литография Штаба Округа, 1910. 520 с.)

только 50 сажен» (Пастухов, 1889, с. 136). Так А.В. Пастухов приводит сведения о подвижке ледника, начавшейся в 1834 г., когда ледники Майли и Колка были едины, и конец ледника Майли находился около горячих источников. Очевидно, событие 1834 г. носило тот же характер, что и подвижка 1969/70 г.

По сообщению Н.Я. Динника о своём путешествии 1890 г. в верховья Геналдона и на ледник Майли (называет его Тменикау), «в 1863 году ледник ...сильно отступил, и все источники открылись, а после этого он неоднократно то удлинялся, то укорачивался, хотя и не сильно. По словам Царахова, за последние 20 лет ледник, подвигаясь вперед, 4 раза разрушал все его сооружения» (Динник, 1893, с. 85).

Н.Я. Динник видел долину ледника Колка с левой морены ледника Майли. Широкая просторная долина тянется на 2–3 версты; по её ровному каменистому дну течёт «довольно большая быстрая речка с такой же мутной водою, как в Геналдоне. В том месте, где эта долина соединяется с главной, занятой глетчером, речка уходит под лёд и течёт там, очевидно, до самого конца глетчера». В этом

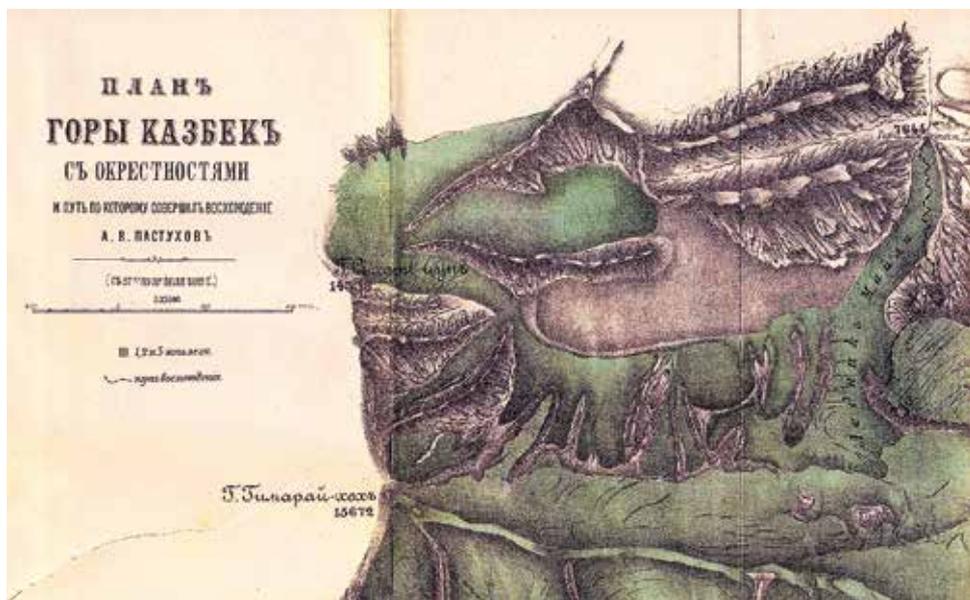


Рис. 8. Фрагмент карты А.В. Пастухова 1889 года

месте скалы на левом борту её оглажены и покрыты множеством царапин до высоты более 40 м над ледником. «С юга и запада над долиной поднимаются очень высокие горы, покрытые большими снежными полями» (Динник, 1893, с. 89).

Таким образом, ледник Колка был далеко от ледника Майли, что подтверждает также и схема А.В. Пастухова (рис. 8) (Пастухов, 1889). По наблюдениям К.Н. Россикова и данным К.И. Подозерского, конец ледника Колка отстоял от ледника Майли в 1894 г. более чем на 1 км (Рототаев и др., 1983).

Геналдонская катастрофа 1902 г. произошла в разгар жаркого лета и имела особый сценарий. Она известна по описаниям Р.Р. Лейцингера, посетившего место катастрофы 11 июля (Обвал..., 1904), Н.В. Поггенполя (1905) и Э.П. Штебера (1904), побывавших в долине в августе. Кроме собственных наблюдений, они собирали свидетельства очевидцев, сведения корреспондентов местных газет и проводили наблюдения после катастрофы.

События 1902 года привели к большим потерям в Геналдонской долине, они были не обойдены вниманием властей этой области, о чём свидетельствует замечательная подборка документов тех лет, опубликованная недавно в книге «Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра» (Черноморец, Адцеев, 2014, с. 338–426).

Э.П. Штебер пишет, что прежде ледник Колка считался «умирающим ледником», и было «трудно ожидать каких-либо грозных явлений со стороны заваленного мусором ущелья. Но гроза пришла оттуда, откуда меньше всего её нужно было ожидать» (Штебер, 1904, с. 237).

Ледник, двинувшись с места, известного под названием Колка, «сначала сползал медленно». Ещё с первых чисел мая из верховий ледника доносились «трески», которые учащались и усиливались вплоть до катастрофы. В середине июня они были особенно громко слышны на лечебных Кармадонских источниках. В 20-х числах июня конец ледника Колка уже был виден в узком ущелье слева от ледника Майли. «Его оконечность слегка свисала», и часть его обвалилась, запрудив на время р. Геналдон. «Весь ледник был изрезан трещинами, которых особенно много было с левой стороны ледника» (Обвал..., 1904, с. 62). «Явные признаки грозящего обвала» были замечены слишком поздно.

Вскоре река приобрела совершенно чёрный цвет и превратилась в поток грязи — как пишет Э.П. Штебер, — от сильного трения льда о сланцевое ложе во время ускорения движения льда.

Р.Р. Лейцингер со слов корреспондента тифлисской газеты сообщает, что 3 июля с 8 часов утра и вода «источника», бывшего струёй из-под ледника, временами мутнела. После 16 часов «родник» (вероятнее, сама река) «вышел из своего постоянного русла и разлился сажени на три. Наконец из-под льда, откуда вытекает источник, с водой стали вырывать куски льда и камни» (Обвал..., с. 64). Постепенно вода всё прибывала, и река бурлила сильнее, перекатывая каменные глыбы в сотни пудов и унося огромные льдины. В 3 часа дня грохот в верховьях ледника уже напоминал пушечную пальбу. Опытный Т. Царахов приказал всем, находящимся на источниках, уходить и подниматься вверх по склону, но за ним последовали не многие. Около 6—7 часов вечера всё ущелье огласилось необыкновенным шумом и грохотом, и «из ущелья Колка... вырвалась страшных размеров чёрная масса камней и льда, ... и курорта Кармадон с его домиками, ваннами и оставшимися людьми как не бывало». Уничтожив источники, «ледяная масса, извиваясь подобно гигантской змее..., ринулась вниз, влезая то на правую, то на левую стороны ущелья, сокрушая вместе с тем всё попадающееся на пути. Люди, лошади, скот и камни огромных размеров... перетирались как в толчее» (Штебер, 1904, с. 241).

Поднялся «ураган», вихрь сметал камни и поднимал в воздух людей и животных. По рассказу жителя аула Тменикау (расположенного на левом склоне), который пас отару овец недалеко от села,

ему еле удалось удержаться, прижавшись к земле и цепляясь руками за камни, а от овец не осталось и следа (Агибалова, Виленкин, 1973). Э.П. Штебер пишет, что обвал остановился на седьмой версте от источников, «пройдя всё расстояние не за две минуты, как значится в газетах, а в течение 5-ти или 8-ми минут». Таким образом, скорость его движения можно определить около 100 км/час. Вместо зеленеющей долины на дне её образовалось поле льда и камней до створа села Тменикау. Казалось, ледник Майли удлинился на 8 вёрст — пишет Э.П. Штебер, он определил «обвалившуюся» массу льда примерно в 53 млн м³.

6 июля произошёл второй выброс ледяного селя, он поглотил людей, вышедших на поиски погибших родственников. Этот выброс перекрыл первый и спустился на пол-версты ниже. Ледяная плотина задержала сток р. Геналдон. «Вода сначала скопилась где-то под ледником, а затем ночью ...прорвалась с оглушительным шумом и увлекла за собой громадный камень, вернее, скалу, под которой до этого иногда пряталось в жару более 1000 овец» (Обвал..., 1904, с. 63).

Как сообщал Э.П. Штебер, в долине под ледником было погребено 36 человек, 28 мельниц, 58 лошадей и более тысячи овец и коз. На старой морене, разделяющей ледники Майли и Колка, прежде было пастбище, которое оказалось перекрытым двигавшимся льдом, и уцелела лишь маленькая площадка, где чудом спаслись несколько лошадей и коров. В результате дно долины оказалось под массой льда и камней на протяжении 9 км, толщина завала достигала 50 м. К.П. Рототаев нашёл в архивах Северо-Осетинского краеведческого музея фотографию ледового выброса, которая относится, безусловно, к 1902 году (Рототаев и др., 1983), подтвердившую реконструкцию событий (рис. 9, а, б).

Н.В. Поггенполь, увидевший место события 17 августа, оценил объём выброса в 70–75 млн м³. «Такого завала не знает наука». Он отметил на склоне долины следы «волн» прошедшего обвала и остатки крупных льдин на высоте 100–140 м. На его рисунке «Остатки завалов на Майлийском леднике» (Поггенполь, 1905, с. 12) изображены массы льда на стыке ущелья ледника Колка с ледником Майли с вертикальными блоками высотой до 20 м — типичные формы при подвижке пульсирующего ледника, аналогичные наступанию ледника Колка 4 октября 1969 г. (рис. 10).

Все авторы, анализирувавшие причины катастрофы, считали, что она была результатом обвала всяких ледников на крутом северном склоне ущелья Колки.



Рис. 9. Долина р. Геналдон под «обвалом» в 1902 г. (а) и тот же участок долины в 1970-х годах (б). Видны развалины старых башен на склоне близ аула Тменикау

Первопричиной «обвалов» Н.В. Поггенполь считал Шемахинское землетрясение (хотя оно произошло 13 февраля 1902 г.), волны которого «расшатали выветрелые склоны гнейсовых скал... вулка-

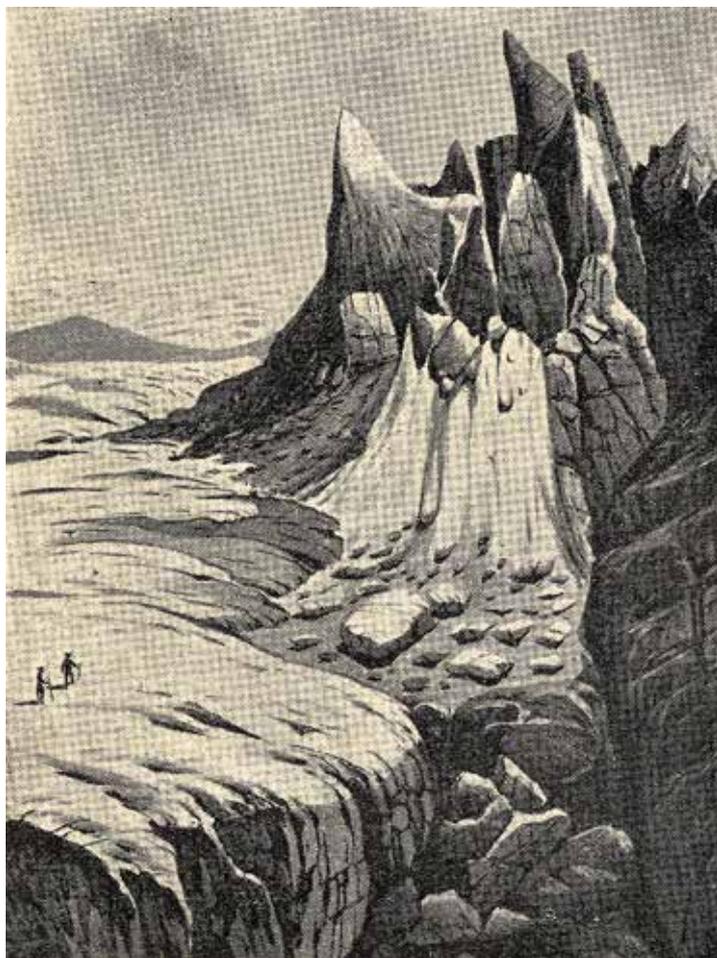


Рис. 10. Блоки льда на стыке ледников Колка и Майли. Зарисовка Н.В. Поггенполя

нической области Казбека» и ещё более заметно отразились «в области круто висевших ледяных полей» (Поггенполь, 1905, с. 12). В результате образовались трещины в висячих ледниках, которые затем весной и летом постепенно расширялись от замерзания воды со «страшными тресками». Наконец 3 июля последняя трещина заставляет один из фирнов отделиться и соскользнуть в обрыв, что «нарушает общее равновесие всей системы фирнов». «Не может быть никакого сомнения», что семь висячих фирн-глетчеров, четыре из которых доходили до поверхности Колки, соскользнули со склона один за другим, что «послужило к образованию тех двух колоссальных лавин, которые проникли далеко в долину Генал-Дона» (Поггенполь, 1905, с. 8). В доказательство автор привёл рисунок склона

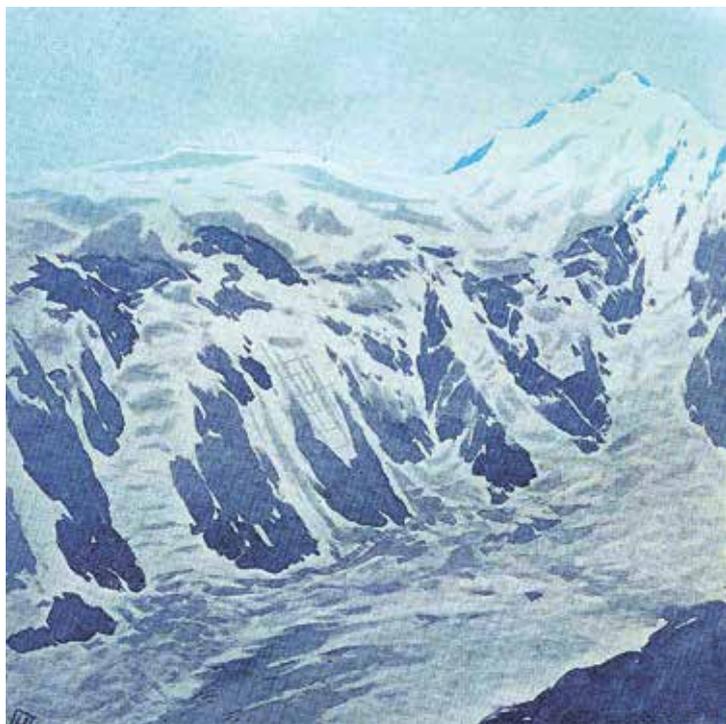


Рис. 11. «Висячие фирны» на Колке в 1902 г. Зарисовка Н.В. Поггенполя

с тёмными участками скал между ледниками (рис. 11). Однако мы видим, что рисунок, напротив, показывает обычную картину размещения ледников, фирна и скальных участков на склоне. Постоянство их положения видно и на старых снимках, и после подвижки ледника в 1970-е годы, вплоть до лета 2002 года.

Л.А. Варданынц (1932) писал, что Поггенполь был довольно близок к истине, но причиной обвала висячих ледников было не Шемахинское, а местные землетрясения, вызванные современным поднятием Дарьяльского горста (об этом будет сказано ниже).

Э.П. Штебер (1904, с. 244–245) отвергал версию землетрясения, поскольку оно не ощущалось в то время нигде в соседних селениях, а также потому, что обвал «не явился сразу, как бы от толчка и сотрясения почвы», а подготавливался заранее. Не могло быть и «поднятия температуры ледникового ложа от вулканических причин», так как не замечено изменений в источниках Кармадона и не было следов таяния «тонкого, состоящего из ледниковой пыли, покрова ледниковых лож ...в местах обрыва». Он отклонял также версию «чрезмерного накопления снегов и льдов» на леднике Колка, мотивируя это тем, что во всей местности в течение уже нескольких де-

сятков лет происходило отступление ледников, в том числе и Майли. О возможности избыточного накопления льда отдельным ледником тогда известно не было.

Э.П. Штебер выдвигал чисто метеорологическую причину — особенно сильное таяние ледников в жаркие летние сезоны 1901 и 1902 гг. Необычно жарким был июнь 1902 г. В начале его прошли сильнейшие ливни, после чего жара усилилась. Во второй декаде месяца температура во Владикавказе превышала норму на 2,7 °С. Пять всеячих ледяных потоков на северном склоне цирка до сих пор упирались нижними концами в поверхность ледника Колка; но теперь от сильной жары главный ледник стал быстро «уменьшаться в толщину», концы всеячих ледников «потеряли опору» и «сорвался весь накопившийся в течение многих лет фирновый лёд... подобно тому, как с покатых крыш во время оттепели сваливается накопившийся за зиму снег» (Штебер, 1904, с. 247).

Мы считаем наиболее вероятным, что событие 1902 г. началось с подвижки пульсирующего ледника, затем произошёл резкий переход к катастрофическому выбросу льда, который был вызван другими причинами, о чём будет сказано ниже.

Суммарный объём льда, перемещённого ледником Колка в 1902 г., оценён примерно в 100 млн м³ — порядка 70 млн м³ было выброшено в долину и не менее 30 млн м³ осталось в узком ущелье ледника Колка. Об этом можно судить по сообщению Н.В. Поггенполя: «всё ущелье Колки было завалено несметным количеством фирновых масс, а около самого Майлийского ледника лавинный снег лежал нагромождённый в целую гору, ежеминутно угрожающую рухнуть» (с. 9). В 1969 г. перемещённый подвижкой объём льда не превышал 80 млн м³. Обе цифры не слишком далеки друг от друга и могут характеризовать объём массы, сбрасываемой ледником при подвижках (Рототаев и др., 1983).

Таким образом, общая черта трёх известных подвижек (1834, 1902 и, как мы увидим, 1969 гг.) — лишь то, что они развивались постепенно, в несколько этапов, но финал их был совсем не одинаков.

Р.Р. Лейцингер писал, что местные жители очень мало удивляются этому грандиозному обвалу. Он справедливо считал, что «обвалы» Геналдонского ледника, «повидимому, составляют довольно частое явление, и в прежние времена, вероятно, происходили ещё в большем размере. На это указывают ледниковые камни и валуны ... гораздо ниже того места, до которого дошёл обвал 3-го и 6-го июля. Не без причины также ... построились так высоко от реки аулы Тю-



Рис. 12. Село Нижний Кани, расположенное высоко на склоне долины р. Геналдон. Фото Н.И. Осокина

менькоу и Кони... Эта предосторожность вызвана такими же обвалами, виденными предками современных жителей этих аулов» (Обвал..., 1904, с. 66).

Действительно, все старые аулы в Кармадонской долине, в отличие от других долин Кавказа, располагаются не на её днище – самом удобном месте для жилья, дорог, воды, а на склонах или даже гребнях ближайших хребтов (селения Тменикау, Кани, Горная Саниба) (рис. 12). Горцы никогда не прокладывали дорогу по Кармадонскому ущелью. Всё это, безусловно, связано с известной населению с давних времен опасностью здешних ледниковых катастроф.

С.С. Черноморец приводит документ – рапорт начальника Терской области, составленный в 1889 г., где говорится, что в 1881 г. Санибанское ущелье «посетил с научной целью учёный геолог Хатисов», который убеждал жителей, что им «грозит в недалёком будущем неизбежная опасность», так как «местность, на которой они поселены, имеет под собою вулканическую почву», и что они сами замечают, «что лежащие массами льды выше горячих источников образовали в себе трещины и начали оседать книзу, а в местности выше отселка Верхний Саниба, в 2 верстах от него, в балке, не покрывающейся никогда снегом, даже и зимою,... в ночное время ими

замечен был выходявший из земли через образовавшиеся трещины газ с запахом серы и слышен подозрительный гул на подобие лёгкого раската грома» (Черноморец, Адцеев, 2014, с. 339).

Э.П. Штебер (1904) сообщает, что местные жители знают о катастрофическом обвале ледника «в отдалённые времена», когда в долину Геналдона сорвался ледник, уничтожив ряд селений, в том числе и аул Генал с его отсёлками в 13 верстах от устья ущелья ледника Колка. Развалины одного отсёлка остались на правом склоне долины, у подножия Скалистого хребта на высоте 120–130 м над рекой. В.В. Агибалова и В.Л. Виленкин (1973) предполагали, что это событие 1834 года, но подобное заключение противоречит сообщению А.В. Пастухова (в 1834 г. ледник за семь месяцев спустился на полторы версты и остановился). Вероятно, аул Генал был разрушен более ранней крупной катастрофой, которая произошла, как предполагали (Рототаев и др., 1983), в конце XVIII – начале XIX столетий. В том же упомянутом рапорте начальника Терской области 1889 г. сказано, что ледник «по местному названию Колкай... несколько лет тому назад упал, уничтожив до основания 7 небольших отсёлков, называвшихся Генал» (Черноморец, Адцеев, 2014, с. 338).

М.Г. Бергер уточняет эту дату, отыскав интересные сведения в народной балладе, записанной осетинским писателем А.З. Чеджемты со слов 90-летнего народного сказителя. По тексту «Баллады о семи Геналах и семи охотниках» можно установить, что поселения Генал в Кармадонской котловине были уничтожены в 1752 г., когда ночью во время сильного дождя «сорвался белый ледник и вынес впереди себя семь Геналов» (Бергер, 2007б, с. 19), причём «источником беды» был ледник Колка, а не Майли.

Геоморфологические исследования экспедиции Института географии 1970-х годов в долине р. Геналдон позволили установить признаки старого и очень крупного выброса льда, следы которого сохранились перед выходом долины в Кармадонскую котловину, и мощного селя, прорвавшего эту плотину.

Здесь к левому склону был прислонен крупный массив с бугристой поверхностью, сложенный грубым несортированным материалом с беспорядочными обломками и отдельными очень крупными валунами. Состав обломков – это породы, вынесенные из верховий Колки: кристаллические и аспидные сланцы, порфиристы, зеленокаменные породы. Иногда в разрезе встречались характерные линзы тонкослоистых песков и глин, образованные при постепенном таянии глыб льда, включённых в толщу вынесенно-



Рис. 13. Кармадонская котловина в 1970-е годы. 1 – река Геналдон; 2 – фрагмент отложений древнего завала у левого склона котловины; 3 – русло стока вод в обход массива завала; 4 – вход в Кармадонское ущелье. Фото К.П. Рототаева

го материала. Верхняя граница его поднималась над рекой до 70 м, здесь тёмно-серый грубообломочный материал наложен на известняковую склоновую толщу. Хорошо видны фрагменты узкой глубокой ложбины стока, прорезанной рекой вдоль левого края бывшего завала, по которой в наше время проходила автомобильная дорога (рис. 13). На правом склоне такие же отложения обнажаются в 2–3-метровом слое на высоте 20–30 м над рекой, а также слагают 5-метровую террасу, прислоненную к массиву, и прерывистые селевые гряды и холмы, расходящиеся «веером» по дну котловины вплоть до входа в ущелье Скалистого хребта. Очевидно, плотина впоследствии была прорвана водой. Образовался мощный сель или серия селей с огромной массой вынесенного материала. В ущелье Скалистого хребта местами сохранились «примазки» гру-

бообломочного тёмного материала в углублениях отвесных скал в 10 м над рекой (Рототаев и др., 1983).

Все исследованные в 1970-х годах формы рельефа, оставленные этим выбросом в котловине, а также холмы и древнюю озёрную площадку на выходе Санибанской долины, Р.А. Тавасиев (2014) связывает с событием 1752 г., подчёркивая, что его масштаб был меньше по сравнению с катастрофой 2002 г.

При изучении геологами сейсмодислокаций в долине р. Геналдон и соседней долине Мидаграбиндон были обнаружены свидетельства более древних «ледово-каменных лавин (обвалов)» и связанных с ними подпрудных озёр. Характерные черты следов таких обвалов — беспорядочно-бугристый рельеф отложений, срезанные древние конусы выноса в долине, забросы крупноглыбового материала высоко на склоны долин и перевалы, чередование в составе отложений крупных валунов, речного аллювия, озёрных горизонтов. На стрелке рек Геналдон и Кауридон изучен разрез с остатками 5–6 древних ледово-каменных лавин. А палеопочва, захороненная в прошлом под отложениями подпрудного озера в Кармадонской котловине, имеет возраст около 5900 лет, что совпадает со временем образования озера в долине Кауридон и формирования лавового потока в долине Терека при последнем извержении в Казбекском вулканическом центре (Рогожин и др., 2004).

Наблюдения Института географии РАН проводились в 1970-е годы, а ледово-каменный сель 2002 г. навсегда уничтожил все следы прошлой истории долины.

Подвижка 1969 года

После долгого периода сокращения в 1920–30-е годы границы ледника Колка в 1940-х годах были наиболее стабильными. Но в конце 40-х годов фронт ледника начал смещаться вниз со скоростями 20–30 м/год и за 1946–1956 гг. продвинулся на 210 м, а до 1967 г. — ещё на 160 м. Такие изменения языка ледника Колка не согласовывались ни с метеорологической обстановкой тех лет, ни с поведением других ледников. С 1956 по 1969 г. поверхность языка ледника Колка повысилась на 20–25 м, в тыловой части ледника уровень льда достиг высоты левой береговой морены и появились серии трещин, фронт смещался уже со скоростью до 50 м/год.

В 1969 г. к июню ледник продвинулся на 150 м, а за три летних месяца ещё на 80 м. Весной и летом перед подвижкой сравнение мате-



Рис. 14. Край быстро движущегося ледника Колка (сверху) надвигается на лёд Майли. Фото К.П. Рототаева

риалов наблюдений К.П. Рототаева и фотоснимков двух альпинистских групп в мае и августе 1969 г. показало переход к новому типу движения (Рототаев, 1974). Поверхность ледникового языка заметно поднялась, поля трещин превратились в труднопроходимые зоны. Выше головного участка ледника появилось крупное вздутие поверхности, но тело ледника ещё представляло собой единый массив льда.

Переход к быстрому наступанию произошёл 28 сентября 1969 г., когда за шесть суток ледник Колка, грохоча обвалами льда, прошёл 1300 м и к 4 октября достиг края ледника Майли (рис. 14). К этому времени поверхность ледника поднялась, в своём движении ледник перекрыл гребни морен и местами перевалил через них. Головная зона раздробилась, превратилась в глыбовую массу. Сток реки с ледника нарушился, вода была насыщена взвешенным материалом. Ледник продвигался вниз со скоростью нескольких сотен метров в сутки, масса льда дробилась и перемешивалась.

По фотоснимкам очевидцев удалось восстановить, что ещё до 4 октября произошёл предварительный выброс льда из ущелья



Рис. 15. Фронт наступающего ледника в конце октября 1969 г. На переднем плане постройки Верхнее-Кармадонских источников. Фото В.Д. Панова

Колки; водно-ледовый сель оставил на дне долины раздробленную массу льда объёмом не менее 1 млн м³, почти достигшую Верхнекармадонских источников. Видимо, в начале быстрого наступания ледник перекрыл левый приток р. Колки (ручей Шау), а затем скопившаяся вода прорвала преграду. Водно-ледовый сель мог бы послужить тревожным сигналом подвижки, но наблюдателей в тот момент в Верхнем Кармадоне не оказалось.

В дальнейшем ледник ещё три месяца двигался неравномерно, с остановкой в конце октября на две недели, но в начале ноября мощное наступание возобновилось. Ледник Колка разрушил часть льда на языке Майли и втянул его в движение (рис. 15). Повернув вниз по долине, движущаяся масса раздробленного льда толщиной 100–130 м перекрыла Верхнекармадонские источники, заполнила верховье долины Геналдона по всей её ширине и спустилась до отметки 2340 м. С ледникового фронта высотой 30 м постоянно обрушивался лёд, гул и треск в ущелье не прекращались ни на минуту (рис. 16).

К 10 января 1970 г. ледник Колка, наконец, окончательно остановился против устья Белой реки, на отметке 1975 м над ур. моря,



Рис. 16. Поверхность ледника во время подвижки, январь 1970 года. Фото К.П. Рототаева



Рис. 17. Язык ледника Колка в 1970 г. – в своём максимальном продвижении. Фото К.П. Рототаева

продвинувшись за всё время наступания на 4800 м (Рототаев и др., 1983) (рис. 17). Средняя скорость движения за это время составляла 20–50 м за сутки, но в отдельные периоды превышала 200 м/сутки.

Фронт ледника сместился по высоте в целом на 975 м, за пределы прежнего ледника был вынесен объём льда порядка 75–80 млн м³. Верхнекармадонские источники оказались под 100-метровой толщей льда. Ширина нового ледника Колка на всей продвинувшейся части составляла от 600 м на верхних двух километрах от прежнего конца до 300 м внизу. После остановки ледникового фронта массы льда продолжали подаваться к языку ледника волнами, но продвижение конца прекратилось, а подача льда постепенно угасала на протяжении всего 1970 года.

Отток льда из цирка ледника Колка привёл к опусканию здесь поверхности на 70–90 м вдоль левого борта и около 40 м у правого (рис. 18). В результате происшедшей подвижки площадь ледника Колка возросла вдвое по сравнению с положением перед подвижкой. Длина ледника увеличилась более чем на 280% — это огромная величина в сравнении с «обычными» известными приращениями длины пульсирующих ледников (на единицы, максимум десятки процентов). Объединённая теперь система ледников Колка–Майли достигла 13 км², что поставило её в ряд крупнейших ледников Кавказа, а площадь общего ледникового бассейна Колка–Майли увеличилась до 35 км².

Для исследования редкой для Кавказа подвижки пульсирующего ледника в Институте географии Академии наук СССР сразу была организована экспедиция, которая работала здесь с 1969 по 1978 г. Её программа была составлена А.Н. Кренке, К.П. Рототаевым и В.Г. Ходаковым под руководством В.М. Котлякова, в то время члена-корреспондента АН СССР. Полевыми работами руководил начальник экспедиции К.П. Рототаев. Подвижка 1969/70 г. проходила в зимнее время, когда в бассейне почти не было талой воды, и завершилась спокойно, без катастроф. Ледник остановился, но оставалась необходимость следить за состоянием ледника и накоплением воды в его бассейне — ведь знаний и опыта наблюдений в таких обстоятельствах тогда совсем не было.

Масса льда перекрыла сток с ледников Майли и Колка, в теле ледника ещё не сформировалась новая гидросеть, и существовала реальная угроза прорыва вод вместе со льдом, скапливающихся под ледником и внутри его. Были выполнены прогнозные расчёты возможных объёмов прорывного паводков и дальности их трансформации вниз по долине. В специально созданную правительственную комиссию Северной Осетии регулярно передавались оперативные сводки с двух стационаров Института географии и двух постов ги-

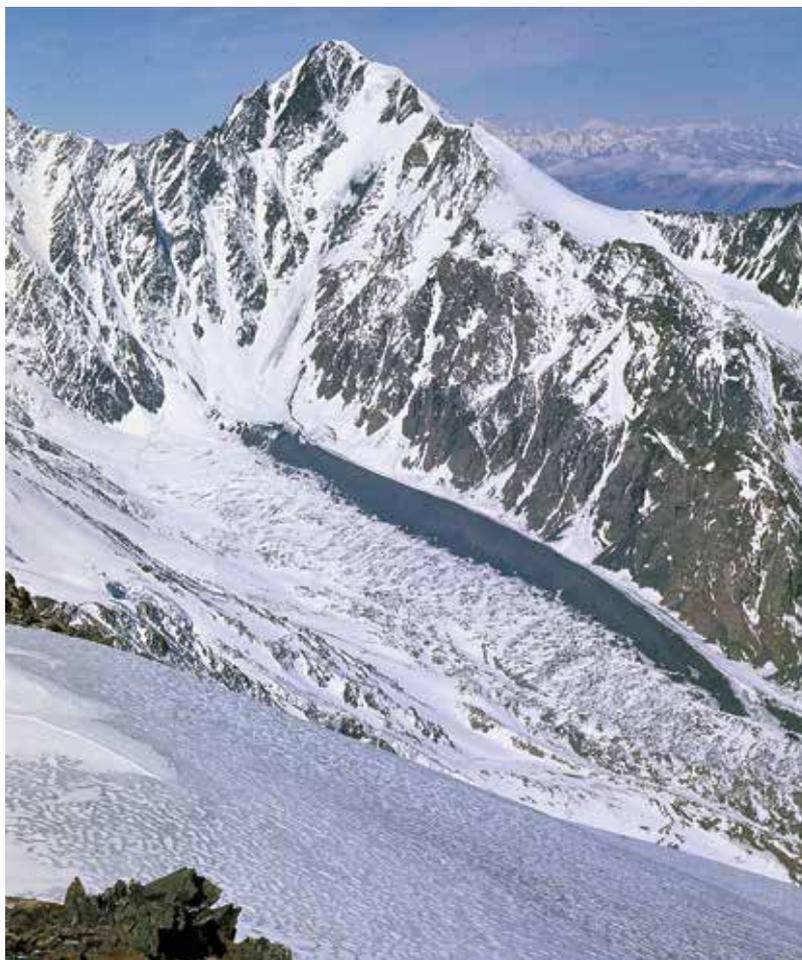


Рис. 18. Верхняя часть ледника Колка после подвижки. Гора Шау-Хох. Фото К.П. Рототаева

дрометеослужбы, которые находились в долине ниже языка ледника и в поселке Кармадон. Специалисты Гидрометбюро г. Орджоникидзе, нынешнего Владикавказа, постоянно имели тесную связь с экспедицией во все годы её работы.

Лето 1970 г. было холодным, и два следующих сезона были близки к норме по температуре и осадкам, так что под ледником успели сформироваться каналы стока и опасного скопления вод и селевых прорывов не произошло. В районе работ было организовано два полевых стационара. «Нижний лагерь» находился на левом склоне долины Геналдона против языка ледника, за Белой речкой на высокой



Рис. 19. Тающий язык ледника (1974 г.) и левый склон долины; отмечено место «Нижнего лагеря» на склоне. Фото О.В. Рототаевой

древней морене, где ровная поверхность с небольшим уклоном была удобна для посадки вертолета (рис. 19).

Но для основных работ полевой базой служил «Верхний лагерь», расположенный на высоте 2860 м в верхней части моренного «треугольника» между ледниками Майли и Колка (рис. 20). В первые годы работ, чтобы пересечь ледник, через него прорубали тропу среди ледяных тросов и трещин. Приходилось даже проводить лошадей с грузом для строительства домика.

Работа московской экспедиции вызывала большой интерес и взаимную поддержку местных жителей, хотя они были не многочисленны — всего лишь маленький посёлок Нижний Кармадон, в кото-



Рис. 20. У Верхнего лагеря. Перед маршрутом. Фото К.П. Роготаева

ром экспедиция базировалась, и высоко над ним на горе старинное село Тменикау. В полевых работах принимал участие и один из молодых представителей давно известной здесь династии — Аслан Царахов. Нередко поработать сезон на леднике приезжали студенты из города, но потом оставались на следующие годы, а некоторые из них с тех пор выбрали гляциологию своей профессией.

Условия для работы отрядов на Колке были сложными. Для изучения процессов аккумуляции на леднике, питание которого почти полностью зависело от ветрового переноса снега с южных склонов Казбека, приходилось проводить много измерений на гребне Джимарай—Майли и на высоких плато Майли и Суатиси в водораздельной части с ледником Колка. Без помощи вертолётa такие работы были бы невозможны. Экспедиции повезло, что она застала те времена, когда в горах летали замечательные машины МИ-4. Лётчикам нальчикского отряда благодаря виртуозному мастерству удавалось

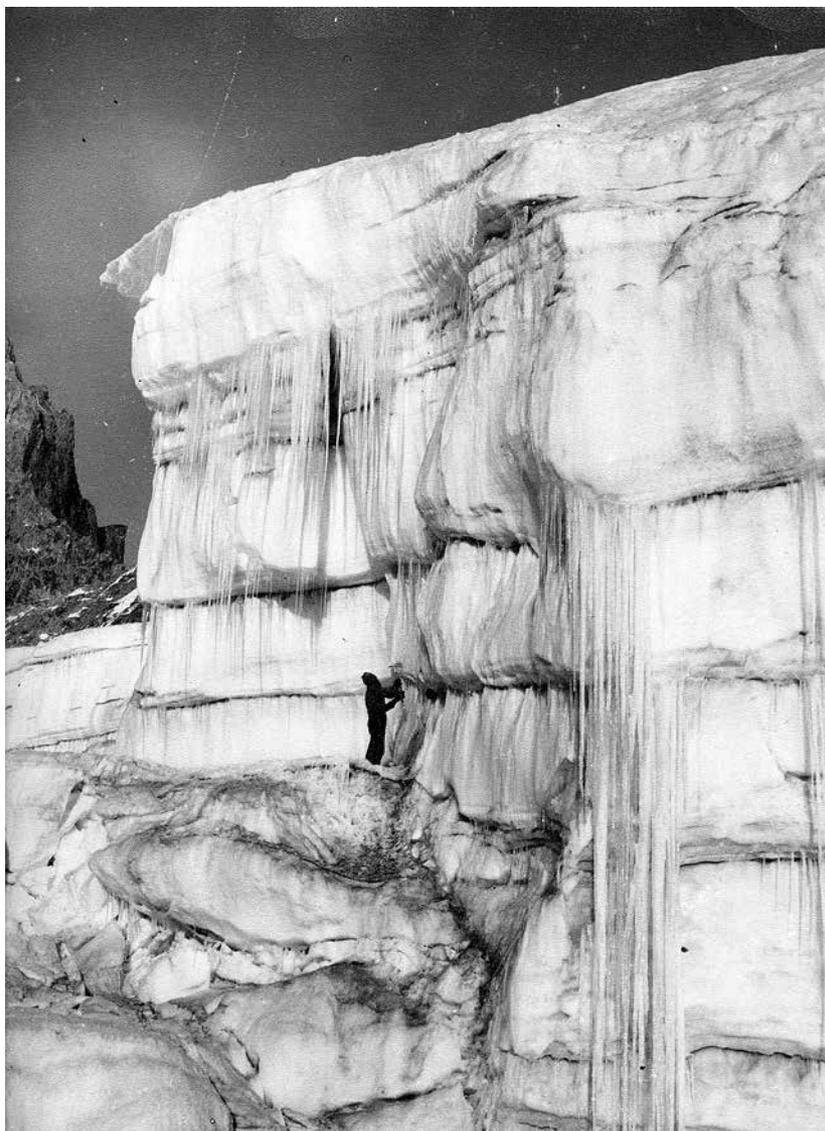


Рис. 21. Изучение многолетней снежно-фирновой толщи на леднике

совершать посадки на самых высоких точках и в очень сложных условиях, и отряд мог оставаться на плато на много дней для работы (рис. 21–24).

Однако и при этом однажды случилось несчастье — винт вертолёта задел гребень морены на подлёте к «Верхнему лагерю» (рис. 25). К счастью, люди серьёзно не пострадали.



Рис. 22. Снегомерные работы на гребне Джимарай-Суатиси. Фото К.П. Рототаева



Рис. 23. Ночёвка на верхнем уровне гор. Плато под гребнем горы Джимарай-Хох. Фото О.В. Рототаевой

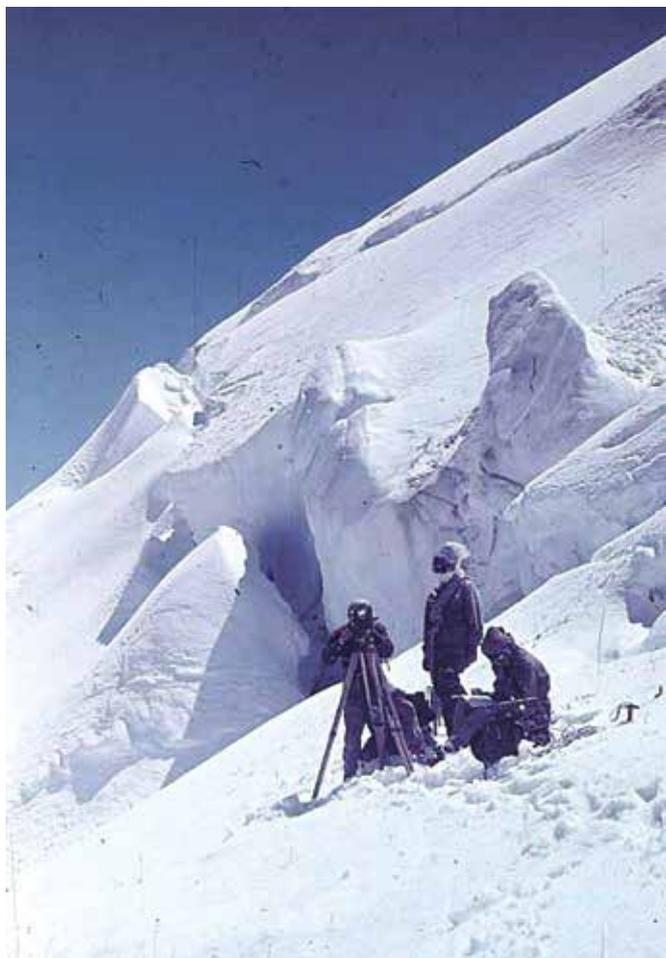


Рис. 24. Геодезические измерения на плато. Фото К.П. Рототаева



Рис. 25. Авария вертолётa недалеко от Верхнего лагеря экспедиции. Фото К.П. Рототаева



Рис. 26. Работы на леднике Майли по измерению таяния поверхности льда. Фото О.В. Рототаевой

Но не просто было работать и на самом леднике Колка. Были поставлены специальные наблюдения за процессами таяния в трещинах, на боковых поверхностях блоков льда, под мореной разной толщины. Для сопоставления хода таяния на изломанной поверхности ледника с обычными условиями проводили наблюдения также и на выровненных открытых площадках на леднике Майли (рис. 26). Уникальной особенностью наступившего ледника Колка было перекрытие его языком горячих источников Верхнего Кармадона. Их тепло пробилось через толщу льда только в 1977 году, когда на поверхности открылась отдушина диаметром около 10 м. Затем таяние вскрыло огромную полость глубиной 60–70 м с нависающей кровлей. Внутри оказалась сеть пустот и тоннелей с высотой сводов от 0,5 до 20 м (рис. 27). Ручьи горячих источников и талых вод выходили по центральному тоннелю к главному руслу Геналдона.

Экспедиция выполнила обширный комплекс работ. В течение девяти лет изучались структура и динамика ледника, условия питания и таяния ледников бассейна Колка–Майли, геоморфологические следы прежней истории долины р. Геналдон, изменения водного режима при подвижках ледников, велись постоянные метеорологические наблюдения. Такие работы вызывали большой интерес у зарубежных учёных, они нередко приезжали в экспедицию со своими экспериментами. Ледник Колку посещали экскурсии международных симпозиумов



Рис. 27. Измерения таяния в тоннеле под ледником Колка

(рис. 28). Впервые в мире была всесторонне изучена крупная подвижка пульсирующего ледника и её последствия. Результаты работ подробно изложены в монографии (Рототаев и др., 1983). В правительственные органы передавались отчёты экспедиции с обоснованными рекомендациями о запрещении строительства на опасных участках территории.

Когда заканчивались работы, ледник уже значительно растаял, поверхность его осела и постепенно выравнивалась (рис. 29). Но уще-



Рис. 28. Начальник экспедиции К.П. Рототаев (в центре) рассказывает о работах на леднике Колка. Слева – ведущий гляциолог США Марк Майер



Рис. 29. Ледник Колка в 1977 г. Фото К.П. Рототаева

лье ледника Колка было ещё забито тающим мёртвым льдом, он оставался и на языке ледника Майли, и р. Геналдон в верховьях долины вытекала по-прежнему из ледникового грота, ненамного отступившего от Белой речки.

КАРМАДОНСКАЯ КАТАСТРОФА 2002 ГОДА

Утром 21 сентября 2002 г. московское радио и телевидение сообщило о грандиозной катастрофе в долине р. Геналдон. Накануне в 8 часов вечера из верховьев долины вырвался гигантский вал льда, воды и камней и со страшным грохотом прокатился по долине, уничтожая всё на своём пути, сдирая на склонах лес и рыхлые отложения до высоты 100 м. За несколько минут эта раздробленная ледяная масса пронеслась 16 км, насыщаясь обломочным материалом и водой, вошла в Кармадонскую котловину и остановилась перед Скалистым хребтом и тесниной ущелья (рис. 30). «Лавина», по ряду свидетельств, сопровождалась мощной воздушной волной, которая ударила в стену Скалистого хребта, даже указывалось, что на скалах были замечены погибшие распластанные птицы.

Гигантское месиво раздробленного «ледового тела» длиной около 4 км закрыло Кармадонскую котловину, расположенную на высоте 1150–1300 м. Ниже через узкое ущелье с огромной силой был выдавлен водно-грязевой сель с обломками льда, который нёс дальнейшие разрушения на протяжении ещё 11 км и не дошёл всего 7 км до посёлка Гизель (рис. 31 и 32).



Рис. 30. Остановившаяся масса льда заполнила Кармадонскую котловину



Рис. 31. Последствия прохождения селя в долине реки Гизельдон. Фото Н.И. Осокина



Рис. 32. Остатки автомашины, попавшей в поток. Фото Н.И. Осокина



Рис. 33. На склонах долины р. Геналдон остались следы селя до высоты 50 м

Наутро открылась картина разрушений. Хотя количественных данных о сходе массы льда ещё не было, но уже был очевиден масштаб бедствия в долине. Полностью снесён маленький поселок Нижний Кармадон, построенный сравнительно недавно на днище долины, погребены скважины водозабора нижних минеральных источников. Здесь, в тыловой части завала, масса льда была заброшена на 50 м над рекой (рис. 33). Лёд проник и в начало узкого ущелья р. Геналдон, завалив оба входа в тоннель на автодороге (рис. 34).

Ниже по течению Геналдон впадает в реку Гизельдон, которая спускается с гор в сторону Владикавказа. Грязевым селом разрушено несколько баз отдыха на берегах этих рек ниже ущелья, 15 км автомобильной дороги, 1,5 км линии электропередачи. Расчистка селевых отложений в долине р. Гизельдон была начата практически сразу после прохождения селя.

При исследовании подвижки 1969 г. К.П. Рототаев писал: «Турбулентно-вязкий ледовый селя со значительным водосодержанием, подобный выбросу 1902 г., в современных условиях может, по-видимому, достигать выхода в Кармадонскую котловину. Такой селя обеспечивает отрыв масс от основного ледника и последующие ско-



Рис. 34. Тёмный лёд, заваливший склоны ущелья Кармадонские ворота. Фото Н.И. Осокина

пления за ним прорывающихся вод. ...Сель турбулентно-жидкого типа при ещё больших скоростях движения способен достигать Скалистого хребта и даже проникать в ущелье с образованием крупных заторов. Такой сель обеспечивает значительное взбегание волны на склоны при поворотах долины, интенсивно обогащается обломочным материалом склонов и поймы, превращается в высокоактивный смешанный сель. Он должен сильно разгружаться в пределах Кармадонской котловины, частично Скалистого хребта и особенно на Гизельском участке» (Рототаев и др., 1983, с. 89–91). Катастрофа именно такого масштаба разразилась в долине р. Геналдон 20 сентября 2002 г. (рис. 35).

Погибли и пропали без вести люди. Ничто не предвещало несчастья, и в одну из красивейших долин Северной Осетии, богатую минеральными источниками, приехали на выходные дни отдохнуть многие жители нижних сёл и Владикавказа. Здесь же оказалась киносъёмочная группа молодого режиссёра Сергея Бодрова, которая работала над новой картиной «Связной». Из 26 членов группы оста-



Рис. 35. Ледово-каменные массы бывшего ледника Колка образовали завал перед Скалистым хребтом. Фото НИЛ Геологоразведчик, 22 сентября 2002 г.

лись в живых только два человека — им посчастливилось находиться высоко, на перевале Даргавс, в то время как остальные после завершения съёмок вечером спустились вниз в долину, в бывший посёлок Нижний Кармадон.

Немедленно, в первые же дни начались поисково-спасательные работы, данные о них постоянно сообщались в прессе. Глава МЧС С.К. Шойгу срочно вылетел в район бедствия, чтобы на месте оценить масштаб трагедии и доложить Президенту России, что нужно сделать для того, чтобы помочь республике и людям (рис. 36). В поисковых работах, организованных отрядами МЧС России и Северной Осетии, было задействовано до 700 человек, около 100 единиц дорожной техники, три вертолёт, а также кинологи с поисковыми собаками (рис. 37).

Тела 17 человек спасатели обнаружили в первые недели после трагедии, позже усилия сапёров и дорожников становились всё более безнадёжными, а также опасными из-за начавшегося интен-



Рис. 36. Глава МЧС С.К. Шойгу в долине р. Геналдон сразу после катастрофы. Фото сайта www.15.mchs.gov.ru

сивного таяния льда. Дневные температуры поднимались до 20 °С, поверхность завала оседала, местами провалилась на 10–20 м, искать приходилось в сплошном месиве из грязи и камней (рис. 38).

По оценке специалистов, под стометровой толщей льда невозможно было найти ни погибших, ни тем более живых людей, однако родственники и друзья унесённых стихией людей надеялись, что кто-то мог в момент катастрофы проезжать в тоннеле и там остаться в живых. Они настояли на том, чтобы любым образом попытаться проникнуть внутрь бывшего автодорожного тоннеля в Кармадонском ущелье. Полтора года спасатели, специалисты-подрывники и



Рис. 37. Поисковые работы ведут сотрудники МЧС с собаками



Рис. 38. Поиски пропавших людей в завале

добровольцы пытались расчищать завалы, взрывали и бурили лёд в районе верхнего тоннеля, полностью погребённого под толщей ледниковой массы.

Первое время пытались с помощью взрывчатки разрушить лёд, но довольно быстро убедились, что лёд, в отличие от горных пород, разрывается очень слабо. Копали вертикальную штольню к северному portalу тоннеля (рис. 39). Но на глубине более 10 м стало очень опасно, так как лёд не был монолитным, а представлял собой спрессованный под собственным весом конгломерат, состоящий из обломков льда и камней; конгломерат был неустойчив, и шахта могла в любой момент разрушиться. Затем бурили скважины над сводом туннеля в надежде оттуда проникнуть внутрь. Было пробурено 19 скважин общей протяжённостью 974 м.

Руководство республики постоянно помогало поисковым работам. Весной 2003 г. к месту поиска из Владикавказа была доставлена огромными усилиями через перевал Даргавс 42-тонная японская буровая установка «Като». Платформу тянул КрАЗ, на который погрузили для равновесия пятитонный бетонный блок, ему помогали и страховали на подъёмах два трактора и бульдозер. Технику тащили днём и ночью, проходя за сутки не более 6 км.

Наконец, лишь в двадцатой скважине длиной 69 м мощный молот с «Като» (рис. 40) пробил свод тоннеля. Полость оказалась заполненной водой. Был привезён из Москвы и смонтирован сделанный по специальному заказу в Германии грязевой насос. Два насоса



Рис. 39. Штольня у северного входа в тоннель. Фото сайта www.15.mchs.gov.ru

качали воду круглосуточно, но уровень её в скважине не снижался. В лагерь спасателей «Надежда» прибыли водолазы из Владикавказа, из московского отряда «Центроспас» МЧС России, а также из Белоруссии, привезли специальное оборудование для обеспечения безопасности, подводную видеокамеру. Работы продолжались долго, водолазов опускали (рис. 41) на тросе через скважину на 70-метровую глубину в тоннель, но, как и следовало ожидать, ничего кроме песка, камней и мутной ледяной воды там не оказалось.

На этом закончился самый драматичный этап Кармадонской катастрофы. Позже, по уточнённым данным МЧС выяснилось, что в результате катастрофы погибло 128 человек.

Практически одновременно со спасательными работами ещё в сентябре начались работы по оценке последствий этой катастрофы. В тот момент было много неясного — устойчиво ли ледово-каменное тело в Кармадонской котловине, будут ли ещё сели, способные дойти до населённого пункта Гизель, где проживали несколько тысяч человек, надо ли готовиться к эвакуации населения или нет (рис. 42). Эти вопросы стояли перед руководством Республики Северная Осетия — Алания.



Рис. 40. Скважины над тоннелем пробивает буровая установка «Като»



Рис. 41. Спуск водолаза через 70-метровую скважину в тоннель, заполненный водой и камнями. Фото сайта www.15.mchs.gov.ru

28 сентября 2002 г. сотрудниками предприятия «Севосгеозко» В.Н. Дробышевым и В.В. Макликовым была проведена тахеометрическая съёмка завала, с применением безотражательного лазерного дальномера, в масштабе 1:10 000. Совместный анализ этих данных и

топографической карты масштаба 1:10 000 позволил оценить размеры ледового тела в Кармадонской котловине: объём 110–120 млн м³, площадь 2,1 км², длина 3,8 км, ширина 600–900 м. Толщина завала составляла в среднем 60 м, но во фронтальной части доходила до 130–140 м, а максимально до 160 м. Объём материала, отложенного селевым потоком ниже завала, на дне долин Геналдона и Гизельдона, оценивался в 3–5 млн м³.

Ледяная плотина в Кармадонской котловине перекрыла сток р. Геналдон, и в верхней части завала образовались значительные по площади озёра, которые быстро увеличивались и при прорыве, как считалось, могли сформировать мощный сель. Но через несколько дней подпруженная вода начала пропиливать каналы вдоль краёв завала. Уже в конце сентября появился

канал стока близ левого борта, по которому пошёл основной сток вниз по долине (рис. 43). Озёра в тылу завала начали сокращаться.

Вдоль правого борта вода пошла в боковую долину р. Кауридон, также перекрытую завалом. Здесь у селения Горная Саниба начало формироваться подпрудное озеро, оно быстро затопило дома, построенные в последние годы близ реки вопреки старым традициям (рис. 44). В первые четыре дня уровень озера поднялся на 20 м и затем в течение месяца продолжал постепенно расти, подтопив нижнюю часть села. Скорость подъёма воды до 5 октября составляла 40–50 см/сутки. В октябре уровень воды поднимался медленнее, со



Рис. 42. Долина р. Геналдон на космическом снимке ASTER (13 октября 2002 г.)



Рис. 43. Скопившаяся вода пропиливает себе русло у левого края завала. Фото Н.И. Осокина



Рис. 44. Затопленные дома в посёлке Горная Саниба. Фото НИЛ Геологоразведчик



Рис. 45. Вид с вертолѐта на завал и подпруженное озеро Саниба в сентябре 2003 г. Фото Г.А. Носенко

скоростью 20–30 см/сутки, и к 20 октября озеро достигло наибольших размеров – объём его составлял около 5 млн м³. Длина озера достигала 1300 м, а глубина в нижней части – до 40 м. Но 22 октября в ледовом теле сформировался канал стока, и вода стала понемногу уходить через внутренние полости. За несколько дней уровень озера понизился на 6 м.

За уровнем воды постоянно наблюдали специалисты гидрометеослужбы, «Севкавгипроводхоза» и МЧС Северной Осетии, готовые принять срочные меры в случае наметившегося прорыва – например, построить временный канал для спуска части воды вдоль борта долины. Площадь озера увеличивалась от 20 тыс. м² 22 сентября до 2,5 км² в середине октября. Но 16 июня 2003 г. произошёл сброс части воды озера через подлёдный канал и в результате паводком были разрушены два новых моста в устье р. Геналдон, построенные уже после катастрофы. Однако затем процесс стабилизировался (рис. 45) (Панов и др., 2002; Поповнин и др., 2003).

Масса промчавшегося ледово-каменного селя совершенно преобразила долину р. Геналдон (рис. 46). Вдоль всей долины, начиная с



Рис. 46. Долина р. Геналдон после прохождения ледово-водно-каменного селя: 1 – ледник Майли; 2 – р. Геналдон; 3 – тыловая часть завала; 4 – селение Тменикау; 5 – поселок Кармадон. Фото Севосгеозко



Рис. 47. Нижние части склона р. Геналдон, сложенные твердой мореной, после прохождения селя. Фото И.В. Галушкина

самых верховьев, в нижней части склонов, где прежде были леса и пастбища, рыхлые отложения были срезаны нередко до коренных пород, сорваны участки леса (рис. 47). Если на выходе из цирка раздробленная масса состояла преимущественно из льда, то при движении по долине она обогатилась каменным материалом, который в теле завала составлял около 30–40% (Панов и др., 2002). Сель захлестывал на склоны «волнами», перебрасываясь с одного борта на другой, забрасывая на высоту более 100–140 м над рекой глыбы льда и камней (рис. 48). Удары воздушной волны оставили вдоль верхней границы заплесков на правом склоне полосу поваленных деревьев; на левом склоне местами трава оказалась засыпана выбросами песка и щебня.

Ширина полосы воздействия на склоны составляла до 500 м. Почти вся масса ледника переместилась в Кармадонскую котловину, и лишь очень небольшие массивы чёрного льда остались на дне долины или были вмazаны в эрозионные врезы на её бортах.



Рис. 48. Рыхлые отложения, заброшенные на склоны долины выше 100 м. Фото НИЛ Геологоразведчик

На некоторых участках склонов можно заметить два следа ледово-каменного потока, один ниже другого. Весьма вероятно, что при высокоскоростном колебательном движении по долине ледового тела — «змеи» длиной в несколько километров — оно оставляло на склонах следы изгибов-заплесков, местами наложенные один на другой. Так, например, на рис. 49 виден след «хвоста», оставленный вторично в зоне воздействия уже прошедшей здесь части потока. Некоторые исследователи предполагают, что движение массы шло несколькими волнами. Научно-производственное предприятие «ИнфоТЕРРА» опубликовало на эту тему статью (Никитин и др., 1995). Авторы на основе изучения сложной структуры отложений завала в Кармадонской котловине по фотоснимкам (что заметно, например, на фотографии, рис. 50), космическим снимкам QuickBird, аэрофотоснимкам по залёту в ноябре 2002 г., а также математической модели, созданной специалистами из Швейцарии, считают, что формирование, транзит и аккумуляция материала имели три фазы.



Рис. 49. След «хвоста» ледово-каменного потока в долине р. Геналдон, оставленный в зоне воздействия уже прошедшей здесь основной его части. Фото НИЛ Геологоразведчик

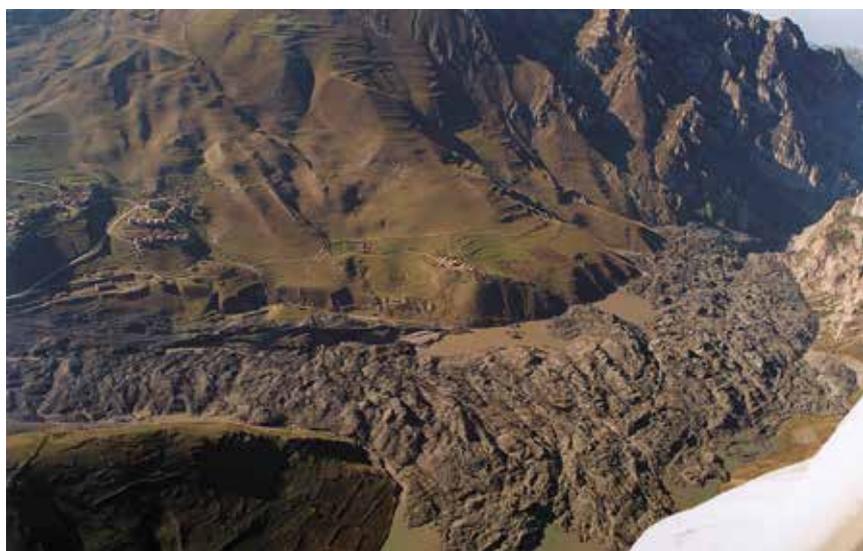


Рис. 50. Рельеф поверхности кармадонского завала отражает неоднородную структуру отложения материала. Фото Я.Д. Муравьева, октябрь 2002 г.



Рис. 51. Облако пара и газа в тыловой части цирка после схода ледника Колка. Фото И.В. Галушкина, 25 сентября 2002 г.

Первая волна с максимальным воздействием фронта на склоны долины заполнила в основном правую часть Кармадонской котловины; её высокий заплеск виден ниже развалин селения Генал. Материал второй, основной фазы занимает центральную и западную части котловины, имеет резко выраженный бугристо-грядовый рельеф и хорошо заметный контакт с первой фазой отложений. Финальная третья фаза возникла из хвостовой части ледово-каменного потока, двигавшейся по долине с меньшей скоростью и обогащённой водой. Её накопления наложены на предыдущие фазы с разворотом масс в сторону долины Кауридона.

Самая неожиданная картина открылась в верховьях, в цирке ледника Колка. Оказалось, что ледник ушёл из своего вместилища практически полностью, оставив открытым пустое скальное ложе с остатками раздробленного льда, внутренний склон левой морены и резкий уступ отрыва ледовых толщ вдоль подножья правого, питающего борта, где клубилось облако пара и газа (рис. 51). Такого не

случалось ещё нигде в мире, тем более что ледник не был висячим, а располагался в цирке и имел небольшой уклон поверхности — порядка 7—9°. Причём он ушёл с огромной скоростью и достиг Кармадонской котловины через считанные минуты. Очевидцы в Кармадоне рассказывали, что был слышен грохот высоко в горах, «словно налетели бомбардировщики», и затем нарастающий гул, «похожий на звук сотен идущих поездов».

Сейсмические станции в окружающем районе зарегистрировали в 20 час. 08 мин. сигналы поверхностного сотрясения земли, не характерные для землетрясений; они продолжались около 3,5 минут, а в 20 час. 13 мин. Севосэнерго зафиксировало разрушение высоковольтной ЛЭП, проходящей через долину р. Геналдон на уровне селения Кани. Таким образом, ледяные массы прошли 16 км за 4—6 минут, т.е. скорость потока, состоявшего из льда, камней и воды, достигала 150—200 км/час. Скорость до 200 км/час приводится и в статье ростовских гидрометеорологов (Панов и др., 2002). К сожалению, временные параметры, фиксировавшие событие, оказались неоднозначны и недостаточно точны (Васьков, 2004; Заалишвили и др., 2004; Запорожченко, 2003).

Но нам казалось слишком маловероятным, чтобы ледник мог «посуху» совершить такой дальний путь по долине со скоростью, достигающей 200 км/час. Для ледового «сея» во время Геналдонской катастрофы 1902 года оценка скорости выброса даёт около 100 км/час (Рототаев и др., 1983), но по некоторым описаниям очевидцев (указывается очень разное время — от 2—3 до 8 минут) также могла достигать 180 км/час. И даже в те далёкие годы Р.Р. Лейцингер отмечал: «обилию воды и талого снега приписывают то, что ледник с такой поразительной быстротой промчался по Геналдонскому ущелью» (Обвал..., 1904).

Стоит ещё напомнить, что в первые дни после катастрофы при облёте цирка ледника Колка на вертолётной группой МЧС на гребне правого крутого склона с висячими ледниками и на стене горы Джимарай-Хох были обнаружены ледяные обрывы и исчезновение больших участков фирново-ледовых полей (рис. 52). Тогда же сразу возникла версия, что причиной катастрофы стал гигантский обвал льда и горной породы, который ударил в ледник и сбросил его вниз по долине.

Для выяснения причин катастрофы требовались специальные исследования — гляциологические, климатологические, геофизические, геохимические, в которые включились учёные разных орга-



Рис. 52. Правый склон цирка ледника Колка со следами ледово-фирновых обвалов. Фото И.В. Галушкина, 25 сентября 2002 г.

низаций. И хотя подлинную картину катастрофы не видел никто и точно восстановить её уже невозможно, выяснен целый ряд факторов, сочетание которых привело к катастрофическому нарушению равновесия в цирке ледника Колка.

Об участии воды в сходе ледника

С самого начала при оценке событий 2002 г. мы полагали, что подобный выброс ледника мог произойти лишь при накоплении под ним особенно больших масс воды (Ледник..., 2002; Котляков и др., 2003 и др.).

Обилие воды в перемещённом 20 сентября массиве льда подтверждается мощным селевым потоком, выжатым через Кармадонское ущелье при остановке льда. Его объём оценивается ориентировочно в 5–10 млн м³ (Ефремов и др., 2007). В теснине волна этого потока достигала высоты 30 м, но и ниже на широкой пойме, даже при слиянии рек Геналдона и Гизельдона, он имел высоту 3–4 м

(Поповнин и др., 2003). Кроме того, в остановившейся массе самого ледового завала оставалось ещё много воды: на фотоснимках в первый же день после катастрофы видно множество мелких озёр вдоль обоих его краёв и в тыловой части (рис. 53, см. также рис. 35 и 46). Ледовый сель не только изначально содержал воду, но и в процессе движения по долине, безусловно, обогащался за счёт реки Геналдон и её, хотя и небольших, притоков.

О накоплении воды под ледником Колка говорит также факт схода селя из цирка 28 августа, до подвижки, когда водно-грязевой поток выбросил куски льда до створа Белой речки. Два озера были видны и в пустом цирке на снимках 2002 г. Одно из них вскоре исчезло, другое (рис. 54) мы застали при наблюдениях в июне 2003 г.

В первых работах мы также отмечали и признаки новых вулканических проявлений в цирке ледника Колка, что позволяло предположить особые термические условия под ледником, вызвавшие донное таяние на ложе, что ускорило сдвиг (Котляков, Рототаева, 2003; Kotlyakov et al., 2004a). Более поздние исследования, в первую очередь геологов, показали, что главные причины катастрофы следует искать в эндогенных факторах. Однако и при этом участие воды в процессе схода ледника очень велико.

Дополнительный материал для исследования механизма процесса, его масштабов и последствий могло дать непосредственное обследование зоны зарождения катастрофы – цирка ледника Колка и прилегающей к нему территории.

Следы катастрофы в ледниковом цирке по наблюдениям в июне 2003 г. В рамках организованной МЧС Межведомственной экспедиции гляциологическим отрядом Института географии РАН с участием Отдела гляциологии Кабардино-Балкарского научного центра РАН были проведены наземные полевые работы в конце июня, августе и конце сентября 2003 г. Они включали маршрутное обследование освободившегося цирка ледника Колка на всём его протяжении, моренного «треугольника» между ледниками Колка и Майли, а также поверхности языка ледника Майли и его долины. Во время этих работ были также взяты образцы снега, льда и воды на днище, проведены GPS-съёмки, фотосъёмки наземные и с борта вертолёта (Котляков и др., 2004; Kotlyakov et al., 2004б).

Подтвердилось участие большого количества воды в сошедшем ледово-каменном селе. По характеру нарушений и отложений, оставленных на бортах цирка и разделяющем ледники моренном массиве мы установили, что с правого края ледника Колка через мо-



Рис. 53. В остановившейся массе ледового завала образовалось много озёр. Фото НИЛ Геологоразведчик, 8 октября 2002 г.



Рис. 54. Одно из озёр в нижней части пустого цирка ледника Колка. Фото О. Рыжанова, 20 октября 2014 г.



Рис. 55. Следы потока воды со льдом на морене между ледниками Колка-Майли и на леднике Майли после схода ледника (фото НИЛ Геологоразведчик 24.09.2002 г., фрагмент): 1 – ледник Майли; 2 – эрозионные борозды на участке размыва моренного «треугольника» и левой морены ледника Майли; 3 – следы заплесков воды на краю прошедшего по льду потока; 4 – «ригель» – остатки льда на повороте цирка; 5 – ущелье р. Колка; 6 – следы русел ручьев, стекавших в ущелье с моренного «треугольника»

рену произошёл выплеск мощного потока воды, насыщенного обломками льда и камней (рис. 55).

Волна смыла поверхность моренного «треугольника» между ледниками и перехлестнула через язык ледника Майли на правый склон его долины. Об этом говорит целый ряд геоморфологических признаков. След выхода волны из ледникового цирка был хорошо заметен на снимках, сделанных в 2002 г. с вертолёта, в виде длинной полосы на снегу у подножья правого склона, направленной на верхнюю часть моренного «треугольника». На участке гребня правой морены ледника Колка, где прошёл поток воды, сформировался характерный микрорельеф поверхности с чётко направленной укладкой обломков, типичной для действия водного потока (рис. 56). Эта



Рис. 56. Типичная укладка камней на гребне морены под действием водного потока. Фото О.В. Рототаевой

водная укладка была особенно хорошо заметна при сравнении с соседней частью гребня той же моренной гряды, не тронутой потоком, где оставалось беспорядочное нагромождение грубообломочного несортированного материала. Интересно, что на участке перехлёста воды через гребень морены попадались скатанные в рулоны остатки дернины с тонким слоем почвы.

Правее и ниже гребня морены ледника Колка по направлению вниз, к леднику Майли поверхность моренного «треугольника» сильно размыва водой и пропилена эрозионными ложбинами и бороздами глубиной от 0,2 до 1 м, местами с застрявшими в них кусками льда (см. рис. 55). Эти борозды также свидетельствуют о работе воды. Структура поверхности самого ледника Майли практически не изменилась, но остался очень чёткий след заплесков воды с мелкообломочным материалом по верхнему краю прошедшего по льду потока. На льду местами сохранились участки прежней поверхностной морены, отличающейся по цвету от чёрного материала, вынесенного с ледника Колка.

Остатки льда застряли также в краевой ложбине правой морены ледника Майли, перед взлётом потока на склон долины над языком ледника. Верхняя граница волны хорошо заметна на длинных осыпях правого склона в виде узкого следа, отмеченного отдельными фрагментами льда на высоте более 200 м над рекой, вытекающей из ледника Майли (рис. 57). При этом безусловным доказательством водной



Рис. 57. След потока воды на осыпях над ледником Майли. Фото НИЛ Геологоразведчик, 24 сентября 2002 г.

волны служит ненарушенная форма осыпей с характерными прежними обрывами внизу и в целом сохранность всего рельефа этого участка склона, включая даже мелкие формы на правой морене ледника Майли и врез ручья за ней. Даже по снимкам осени 2002 г. видно, что рельеф не мог бы настолько хорошо сохраниться в случае прохождения здесь массы самого ледово-каменного селя. В сентябре 2003 г. осыпи уже имели облик практически как до подвижки (рис. 58).

Таким образом, по нашему убеждению, здесь прошёл водный поток со льдом. Поток имел большую скорость и устремился с ледника по прямому направлению, следуя ориентировке нижней части языка к востоку, к леднику Майли. Проследив границы потока по горизонталям карты, можно убедиться, что ему (а тем более «леднику», как считают некоторые авторы), нигде на этом участке не пришлось «захлёстывать» вверх по склону, вода на всём его пути стекала вниз.

Второй, сравнительно небольшой выплеск воды произошёл через нижний конец левой морены ледника Колка в устьевую часть речки Шау, где также не нарушен рельеф конуса выноса Шау с прежним глубоким селевым врезом (рис. 59). Отдельные короткие



Рис. 58. Вид осыпей над ледником Майли в сентябре 2003 г., не нарушенных потоком 20 сентября 2002 г. Фото Г.А. Носенко

выплески воды оставили также следы на гребне левой морены в её нижней части на высотах 3250 и 3100 м. И в самом тылу цирка у подножья левого склона за мореной остался небольшой чёткий след на склоне, куда захлестнула вода — подобный тому, как и на осыпях ледника Майли, с верхней границей, отмеченной оставшимися фрагментами льда под скалами на 3400 м, и также с сохранившимся рельефом рыхлых отложений. В ложбину за левой мореной на отдельных участках был выброшен и раздробленный лёд.

В то же время основная ледово-каменная масса двинулась по обычному пути — вниз по основному ущелью р. Колки и набрала дополнительную скорость в конце его, где уклон превышает 20° . Ущелье буквально выпахано ледником, борта его, сложенные плотной мореной, стёсаны и прорезаны многочисленными продольными экзарационными бороздами (рис. 60). Высоко на скалы левого склона теснины заброшен свежий чёрный материал сланцевой морены. Масса льда, двигавшаяся по ущелью, вероятно, соединилась с волной воды, перехлестнувшей на правый борт долины Майли, ниже конца ледника Майли на повороте долины Геналдона. Это доказывает и резкое увеличение скорости движения именно в этом месте, о чём будет сказано ниже.



Рис. 59. Днище цирка и нижняя часть левой морены в первые дни после схода ледника. 1 – выплески воды со льдом и мореной в устьевую часть речки Шау; 2 – выбросы льда через левую морену ледника Колка, 3 – поперечная гряда льда и камней – «ригель». Фото И.В. Галушкина

После прохождения льда по ущелью Колки часть воды ещё продолжала стекать с моренного «треугольника» по уклону его поверхности вдоль русла бывшего здесь прежде ручья и падала влево в ущелье Колки. На крутом правом борту ущелья хорошо видны следы этого стока: целый ряд неглубоких эрозионных борозд, направленных вниз к тальвегу ущелья, что нарушило на этом участке рисунок продольных шрамов на склоне, оставшихся после только что прошедшей массы льда (см. рис. 55).

Между двумя этими потоками – воды со льдом, захлестнувшей на ледник Майли, и основной массы ледника, прошедшей по ущелью, на высоком гребне моренной гряды, разделяющей долины Майли и Колки, местами остались нетронутыми участки с сохранившейся растительностью. В июне 2003 г. мы шли здесь по «оазисам» зелёной травы и цветов среди каменного хаоса свежих разрушений.

Одним из объектов, вызывавших вопросы, был обнаруженный с воздуха после схода ледника «ригель» на днище цирка – возвы-



Рис. 60. Эскаррационные борозды на склонах ущелья Колки. Фото О.В. Рототаевой

шающаяся в нижней его части поперечная гряда (рис. 61, см. также рис. 59). За ним образовалось озеро, которое представляло потенциальную угрозу в случае прорыва. Предполагалось, что «ригель» — это выступающий порог, сложенный коренными породами, который служил препятствием для стока льда в бывшем леднике, и даже обсуждался вариант его разрушения взрывом для предотвращения подвижек ледника в дальнейшем. Судя по данным радиолокационного зондирования 1988 г. (Никитин и др., 2005), толщина прежнего ледника Колка в нижней части цирка полого уменьшалась, тыловая часть ложа переуглублена, особенно ближе к левому борту, однако никакого порога на ложе не определялось. Как показало наземное обследование, «ригель» оказался подковообразной поперечной грядой, состоящей из нагромождения глыб льда и обломочного материала (рис. 62), круто спускающейся тремя ступенями вниз по долине. Абсолютная высота гребня в центральной части гряды составляла 3025 м и у бортов долины 3060 м; слева она была нагромождена на склон боковой морены. Выходов коренных пород мы не обнаружили.

Мы полагаем, что причиной образования гряды служил не только подъём ложа, но сужение и поворот долины на этом участке. Всё это вместе затруднило уход наиболее крупных и тяжёлых остатков



Рис. 61. Поперечная гряда – «ригель», нагромождение льда и обломочного материала. Фото О.В. Рототаевой

разрушившегося ледника, и произошёл отрыв «хвоста» — крупного массива льда и камней — от основной массы движущегося потока.

Озеро за «ригелем» (рис. 63) в конце июня имело размеры 150×50 м — примерно вдвое меньше, чем на снимках осенью 2002 г. (см. рис. 54). Судя по морфологии береговой линии, уровень озера не стабилен. Борта его сложены обломочным материалом с выходами льда, ширина плотины в средней части около 50 м, превышение её здесь над озером составляло всего 10–15 м, хотя в краевых частях в два — три раза больше. Рыхлый материал плотины с тающим льдом обеспечивал постепенный сток воды. Действительно, в течение лета уровень плотины постепенно понижался, и к концу сентября озеро совсем исчезло без катастрофических последствий.

Было обследовано также днище бывшего ледника. Остатков снега зимнего накопления на ложе в последних числах июня не оказалось, хотя у правого борта и под склонами тыловой стены цирка сохранились отдельные лавинные конусы. Рельеф днища неровный, и всё оно покрыто толщей обломков разной величины. Остатки раздробленного льда, хорошо видные на снимках первых дней после схода ледника, в основном в виде полос вдоль левого борта, раста-



Рис. 62. Глыбы льда на «ригеле»



Рис. 63. Озеро за «ригелем». Фото О.В. Роготаевой



Рис. 64. Перемещённый по ложу тающий ледяной останец, июнь 2003 г.

яли в конце тёплой осени 2012 года. В июне 2003 г. остались лишь самые крупные массивы льда, такие как уже упомянутый поперечный «ригель» на повороте из цирка, или сохранившийся немного ниже надвинутый к правой морене узкий ледяной останец длиной около 0,5 км (рис. 64), сложенный ледниковым льдом со слабо заметной слоистостью, очевидно, перемещённый движущейся массой вдоль правого борта на 300–500 м.

Ещё один крупный массив льда на днище остался под стеной горы Джимарай-Хох в виде двух хорошо выраженных поперечных ступеней, заваленных сверху мореной (рис. 65). Весной 2003 г. тыловой участок цирка был по-прежнему наиболее активной частью, здесь вновь начал формироваться обвальный конус, теперь из обломочного материала.

На гребне правого склона цирка контур верхнего ледяного обрыва мало изменился после осени 2002 г., но регулярное падение камней со склона мы наблюдали при посещении в июне и августе 2003 г., т.е. обвалы горной породы ещё не затихли полностью и год спустя. В конце сентября они практически прекратились, но на запорошенной свежим снегом стене горы Джимарай-Хох чётко выделялись тёмные полосы потёков воды и мелкозёма вдоль длинной трещины ниже края висячего льда. Активные процессы на склоне не закончились.

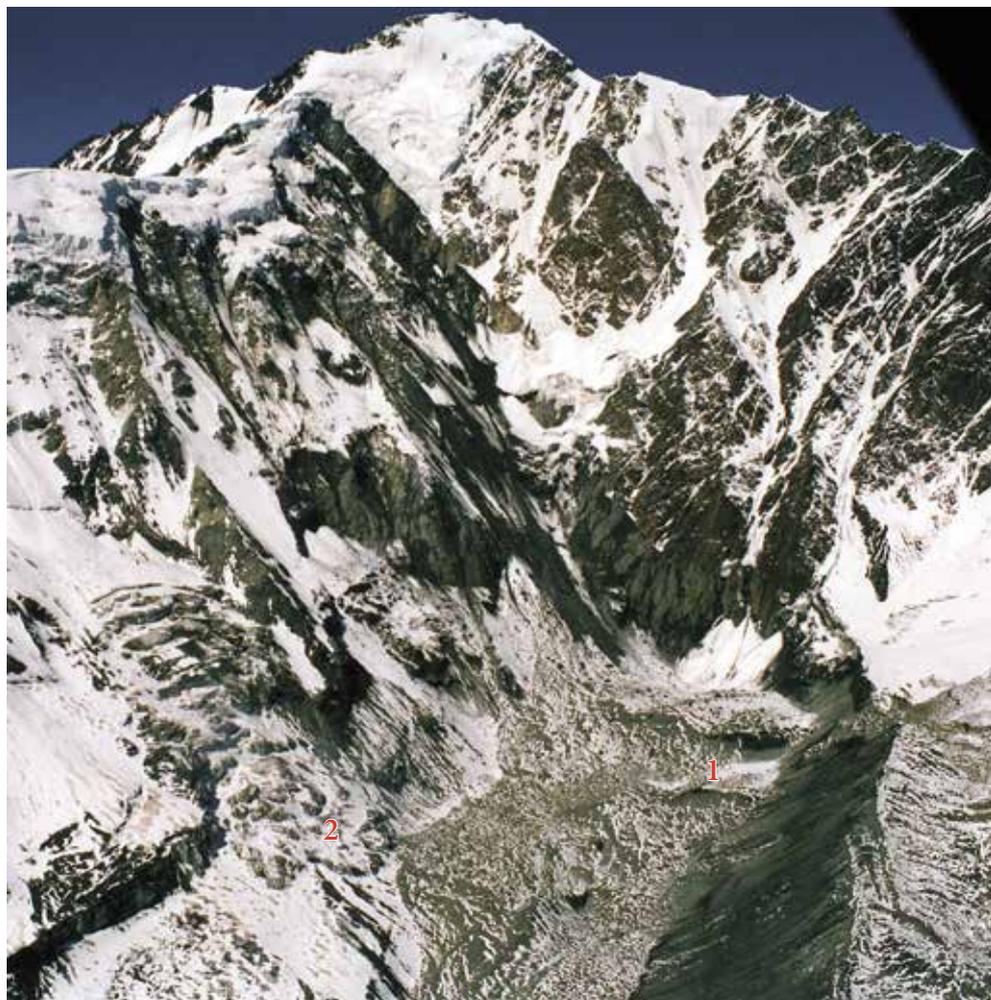


Рис. 65. Сохранившийся массив льда под стеной горы Джимарай-Хох (1). Сентябрь 2003 г. Под правым склоном цирка заметно начало продвижения бокового ледника (2). Фото Г.А. Носенко

В сентябре 2003 г. мы попытались провести измерения радиояростной температуры ложа бывшего ледника и прилегающих склонов для определения возможных современных локальных источников геотермального тепла. Использовался дистанционный термометр Termopoint с точностью измерения, равной $0,5^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от -10 до $+50^{\circ}\text{C}$. Наблюдения вели в утренние и вечерние часы, когда солнце было скрыто за ближайшими вершинами и не могло вносить существенных помех при дистанционном измерении.

Температурный фон ложа в утренние часы составлял 5–6 °С тепла, в вечерние 11–12 °С сразу после захода солнца и 7–8 °С через полчаса после захода. Но никаких источников тепла на ложе и склонах по данным этих измерений мы не обнаружили.

Донный лед обнаружен также на дне ущелья ледника Колка ниже «ригеля» — здесь, вероятно, был снесён чехол морены с погребённых мёртвых льдов, оставшихся после прошлой подвижки ледника Колка. Ранее, например, в сентябре 2001 г., остатки мёртвого льда наблюдали в ледниковой долине ниже конца уже давно деградирующего языка ледника Колка на протяжении 3 км (Поповнин и др., 2003).

У подножья правого борта в цирке сохранились фрагменты старого донного льда, избородённые поверхностными водотоками, уходящими у подошвы склона под рыхлую толщу. Сразу после схода ледника в правой части днища обращала на себя внимание целая серия параллельных валиков и борозд, вытянутых поперёк оси долины по направлению движения сползающего льда боковых притоков. Эти борозды и унаследовали сейчас ручьи талых вод (рис. 66).

Рис. 66. Поверхность днища цирка, покрытая множеством «муравьиных куч», и поперечные борозды на правом склоне, по которым стекают ручьи талых вод. Сентябрь 2003 г. Фото Г.А. Носенко





Рис. 67. Муравьиные кучи» разной величины и непонятного происхождения (в районе «ригеля»). Фото Г.А. Носенко

Большой интерес вызывает происхождение «муравьиных куч» — конусов правильной формы высотой до 0,5–1 м, сложенных мелкообломочным материалом (рис. 67). Лишь в нескольких из них внутри был обнаружен лёд. Обычно такие формы редки, они, как известно, остаются в случае медленного таяния поверхности ледников на месте прежних ледниковых мельниц и колодцев. Здесь же они оказались широко распространены, достаточно равномерно усеивая буквально всю поверхность пустого ложа ледника (см. рис. 66). Их происхождение пока так и не разгадано.

В цирке ледника Колка была обследована также левая береговая морена (рис. 68). Высота её обнажившегося внутреннего склона достигает 100 м. В двух местах сохранились следы заброса через её гребень ледовых масс, здесь линия гребня нарушена и на склоне морены видны следы свежей эрозии. Главный, верхний ледовый выброс, хорошо видный в 2002 г. (см. рис. 59), остался в июне 2003 г. в ложбине между мореной и склоном в виде длинного языка на высоте



Рис. 68. Опустевшее днище цирка и левая береговая морена ледника Колка. 1 – днище бывшего ледника; 2 – ледово-каменная плотина – «ригель»; 3 – озеро; 4 – левая боковая морена; 5 – выброс льда в краевую ложбину; 6 – массив льда, оставшийся в тылу цирка под обвальным конусом. Фото Г.А. Носенко 27 июня 2003 г.

3340 м. Он мог образоваться либо вследствие переваливания части ледникового льда через морену при подвижке, либо в результате крупных обвалов с правого склона, достигших левой морены. Возможность таких обвалов, перекрывающих всю тыловую часть цирка ледника и достигающих левой морены, подтверждается даже аэрофотоснимками прошлых лет (рис. 69).

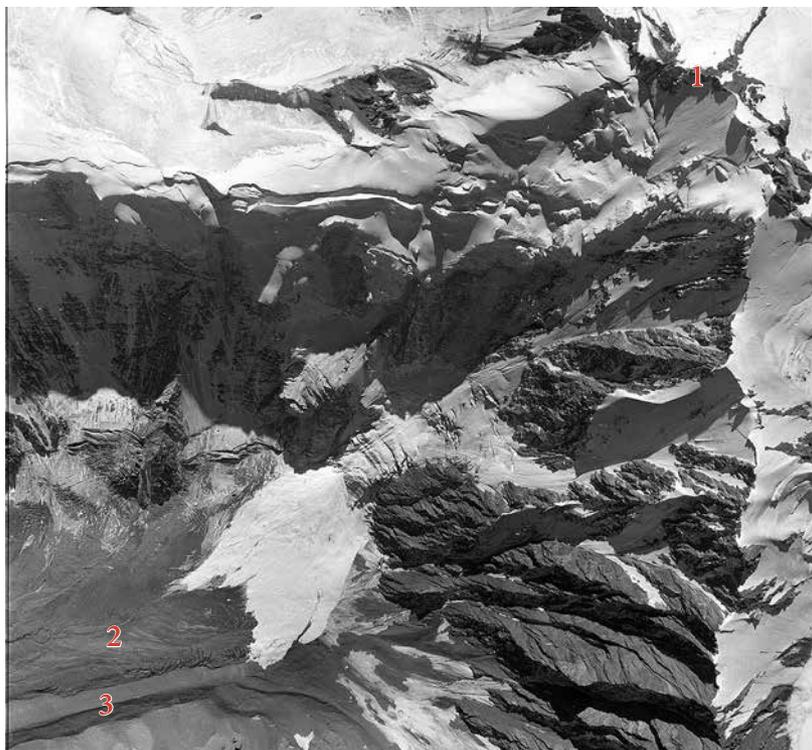


Рис. 69. Лавинно-обвальные конусы в тыловой части ледника Колка могут достигать левой боковой морены. Аэрофотоснимок 1987 г. 1 – гора Джимарай-Хох; 2 – ледник Колка; 3 – левая морена

В июне мы отобрали пробы для химического анализа снега и льда на днище, а также воды из озера, ручьёв в цирке и реки Колка внизу, в месте выхода её из ущелья. Запаха газа в цирке не было обнаружено.

Роль климатического фактора в накоплении воды. Таким образом, при изучении следов катастрофы мы получили доказательства большого участия воды в подвижке. Но почему могло образоваться так много воды? Высказывались мнения, что одна из причин накопления воды в бассейне ледника заключается в изменении климатических условий – увеличении осадков и аномальном таянии льда и снега в высокогорной зоне Кавказа в последние четыре года, вызванных высокими температурами воздуха. Это подтверждается наблюдениями на ряде ледниках Кавказа – Гарабаши, Джанкуат и др.

Летом 2000 г. прошли катастрофические сели в бассейне р. Баксан, разрушившие часть города Тырныауза. Лето 2002 г. было осо-

бенно дождливым. В июне в результате экстремального количества осадков произошли сильнейшие наводнения и активизировались оползни в Ставропольском крае, Северной Осетии и Ингушетии, в августе — на Черноморском побережье. Лето 2002 г. было хотя и не таким жарким, но особенно дождливым, катастрофические наводнения случились в разных районах Кавказа. Всё это могло привести к накоплению в рыхлых толщах под ледником и в самом леднике больших запасов воды. Но такое заключение надо было проверить.

Для ответа на поставленный вопрос были проанализированы основные метеорологические показатели в Казбек-Джигарайском районе за вековой период и в том числе за последние десять лет перед катастрофой 2002 г. На основе данных метеостанций Владикавказ, работавшей с 1891 г., Казбеги-высокогорная и Кармадон гляциометеорологическими методами были вычислены значения летней температуры воздуха и годовых сумм осадков в бассейне ледника Колка, отдельно (на средних высотах) в разных высотных частях бассейна — для ледникового языка (3100 м), области аккумуляции (3400 м), скального лавиносбора в тылу цирка (3700 м) и на краях фирновых полей, висящих над ледником (в среднем 4000 м) (Лебедева, Рототаева, 2005).

В период 1891–2002 гг. температуры приледникового воздуха колебались около средней многолетней величины, равной 2,7 °С, и были, за редкими исключениями, меньше ± 1 °С вплоть до середины 1990-х годов (рис. 70). В этот же период суммы годовых осадков незначительно отклонялись от средней величины 118 см в.э., причём доля жидких осадков почти ежегодно составляла 20–30%. Колебания температуры и осадков носили противоположный по знаку характер. Климатические условия, благоприятные для формирования положительного баланса массы ледника, чередовались с менее благоприятными; при этом надо отметить, что условия для ускоренного нарастания массы ледника создавались в десятилетия, предшествующие подвижкам 1902 и 1969 гг.

С середины 1990-х годов установилось иное соотношение: летние температуры и годовые осадки стали устойчиво повышаться. Впервые за 100 лет температуры лета превышали норму семь лет подряд, вплоть до Кармадонской катастрофы осенью 2002 г. Одновременно увеличились и осадки, однако вместе с повышением температуры воздуха росла доля жидких осадков, которая теперь достигла 50%.

Причиной принципиальных изменений в климате кавказского региона с начала 1990-х годов была резкая смена атмосферной цир-

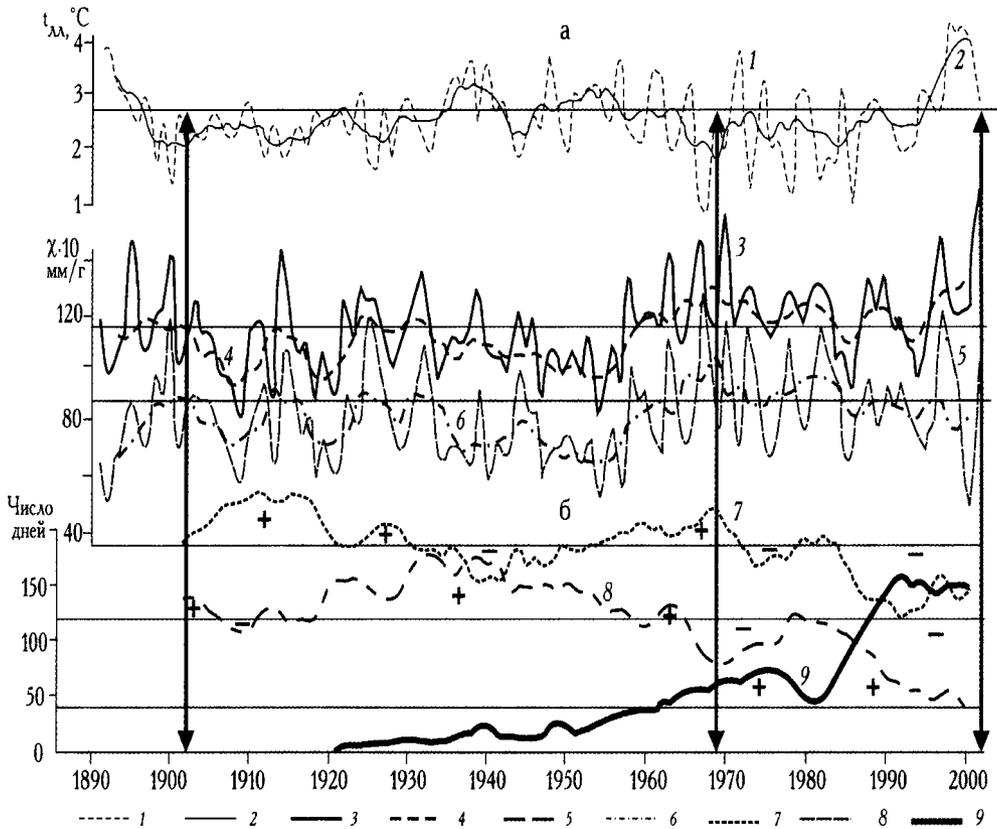


Рис. 70. Вековой режим средней летней температуры ($t_{лл}$) приледникового слоя воздуха, годовой суммы общих и твёрдых атмосферных осадков в области аккумуляции ледника Колка на высоте 3400 м. а: Ход $t_{лл}$ по ежегодным значениям (1) и сглаженный по пятилетиям (2), ход осадков X по годовым суммам (3) и сглаженный по пятилетиям (4), ход твёрдых осадков по годовым суммам (5) и сглаженный по пятилетиям (6); б: Вековые изменения циркуляции атмосферы по Н.К. Кононовой (2003), сглаженные по пятилетиям – число дней с циркуляцией: северной меридиональной (7), зональной и некоторыми нарушениями зональности (8), южной меридиональной (9). Горизонтальные прямые – средние многолетние значения соответствующих показателей; вертикальные линии – годы подвижек ледника

куляции. Небывалый поток южных средиземноморских циклонов вызвал устойчивое потепление в высокогорной зоне всего Кавказа, а также увеличение дождей. По многолетним данным, именно с южным меридиональным типом макроциркуляции связано большинство наиболее сильных погодных аномалий и катастрофических природных процессов (Кононова, 2003).

Таким образом, климатические условия в период 1993–2002 гг. не способствовали накоплению массы ледника Колка – в противоположность двум десятилетиям, предшествовавшим подвижкам 1902 и 1969 гг.

Годовой прирост массы ледника перед подвижкой составил в среднем за 10 лет 1,39 млн тонн; при этом в годы большого таяния шло не накопление, а потеря массы. Полученная величина близка к расчётной ежегодной прибавке вещества: 1,3–1,5 млн тонн, необходимой для накопления ледником Колка за 70 лет критической массы при неизменных климатических условиях (Рототаев и др., 1983). Таким образом, по прошествии 30-летнего периода восстановления ледника после разгрузки в 1969 г. для накопления критической массы ему потребовалось бы ещё несколько десятилетий.

Реакция на потепление была более заметна в высокой, «чистой» части ледника, чем на языке, забронированном моренным плащом. Даже на краю фирнового плато, на высоте 4000 м, за последние восемь лет обычно отрицательные средние летние температуры сменились на положительные. Доля жидких осадков здесь увеличилась от нескольких процентов до 10–15%, таяние и сток усилились в 1,5–2 раза по сравнению со средней многолетней нормой. В связи этим в течение последних лет прочность фирновых толщ, вероятно, ослабевала, что способствовало усилению обвалов. Особенно интенсивно это происходило по нижнему краю, в полосе карнизов, насчитывающих, по наблюдениям 1970-х годов, до 10–20 годовых слоёв толщиной порядка 1 м (рис. 71).

Расчёт водного баланса бассейна ледника Колка для каждой его части показал, что в сумме количество воды, образующейся в бассейне, начиная с 1995 и до 2002 г. составляло ежегодно от 10,2 до 13,7 млн м³, что значительно выше среднего многолетнего (6,8 млн м³). Это превышение в течение восьми лет подряд составляло от 50 до 100%. Правда, эти цифры представляют только сумму объёма стока из бассейна и количества воды, задержанной в леднике и под ним; но определить, какая часть этой воды уходила в сток, а что оставалось в бассейне ледника в годы, предшествовавшие подвижке, увы, невозможно.

Согласно математическому моделированию, выполненному А.Н. Божинским (2005), для движения водно-ледово-каменного потока, преодолевшего за 7 минут расстояние в 20 км (от тыла ледника Колка до Кармадонских ворот), в леднике перед катастрофой должно было накопиться как минимум 11 млн м³ воды. Поскольку по-

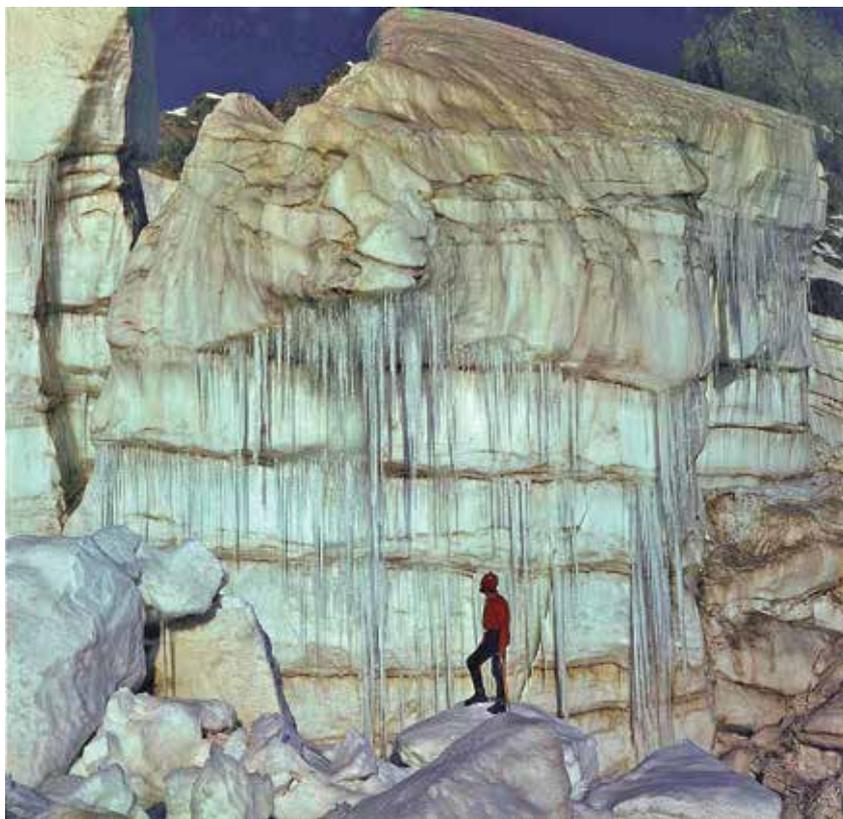


Рис. 71. Годовые слои на гребне Джимарай-Суатиси в разгар летнего таяния 1978 года. Фото К.П. Рототаева

лученные нами суммы стока и задержки воды в бассейне близки к этой цифре, можно считать, что задержка воды была намного меньше необходимого количества. Но совсем исключить этот фактор было бы неправильно.

Примечательно, что в год подвижки объём воды, образовавшейся в бассейне, на 62% превысил среднее значение. Это объясняется очень длительным периодом положительных температур воздуха — на языке ледника с апреля по октябрь. В сентябре (а 20 числа началась подвижка), средняя месячная температура в бассейне ледника была на 3 °С выше нормы. Доля жидких осадков на высоте 3400 м достигла 40% в общем количестве осадков, которые были самыми большими за более чем 100 лет, предшествовавших катастрофе.

Однако не вызывает сомнений, что всего этого было совершенно недостаточно для подобной резкой реакции ледника.

Новые вулканогенные проявления

В сентябре 2002 г. на холодной северной стене в зоне обвалов на высоте 4300–4500 м были хорошо видны локальные очаги таяния с длинными чёрными шлейфами потёков воды — по мнению вулканологов, типичные фумаролы (рис. 72). Очевидно, выходы фумарол были вскрыты обвалами.

Было и ещё одно чрезвычайное интересное наблюдение. Сразу после схода ледника в тыловой части пустого ледникового ложа был обнаружен резкий запах газа — вероятно, сернистого газа или сероводорода, и облако пара и газа, которое стекало вниз в ущелье Колки (рис. 73). Группа МЧС, совершавшая облёты района катастрофы, сообщила: выход газа настолько интенсивен, что в цирке почти невозможно дышать. Это облако, хорошо видимое на снимках, сохранялось в цирке, увеличиваясь и уменьшаясь, в течение месяца.

В наших первых публикациях отмечалось, что и этот факт, и активно разрушающийся расположенный рядом склон — вероятно, следствие новых вулканических проявлений Казбека. В таком случае можно предположить и особые термические условия под ледником, вызвавшие донное таяние (Котляков, Рототаева, 2003; Kotlyakov et al., 2004a). Отметим, что за 9 лет работы экспедиции на леднике Колка в 1970-е годы никаких проявлений фумарол или выхода газов не было. Запаха газа не было замечено и через полгода после катастрофы, при наблюдениях в цирке весной и летом 2003 г.

Пробы газов в цирке сразу после схода ледника отобрать не удалось, но весьма информативными оказались результаты химического анализа образцов льда и воды, взятых нами на днище цирка во время полевых работ в июне 2003 г. Они были исследованы Я.Д. Муравьевым в лаборатории Института вулканологии ДВО РАН (Котляков и др., 2008; Муравьев, 2005). Анализ проб показал значительные отличия состава вод от наблюдаемого раньше, до событий 2002 г.

Один из главных показателей вулканогенного компонента в составе воды — содержание сульфатов. Оказалось, что концентрация ионов SO_4 в остатках ледникового льда в средней части днища ледника Колка составляет 17–22 мг/л — в 10–15 раз больше фоновых его значений в находящемся рядом лавинном снеге этой зимы. Но больше всего сульфат-иона оказалось в воде озера — 600–950 мг/л, т.е. в 500 раз больше, чем в том же снеге, и в 50 раз больше, чем в ручье на морене между ледниками Колка и Майли. При этом в пробах, взятых у верхнего края озера, куда впадают ручьи из цирка,



Рис. 72. Проявления фумарол в зоне обвалов под гребнем северной стены цирка ледника Колка. Фото О. Рыжанова 20 октября 2002 г.

общая минерализация и содержание сульфат-иона были в 1,5 раза выше, чем на нижнем его конце, близ контакта с ледяной плотиной.

Даже в пробах воды р. Колка концентрация сульфатов (до 600 мг/л) была в 10–15 раз выше по сравнению с измеренными прежде, в 1968 г. Д.М. Пхалаговой (1976), причём и общая минерализация воды 1004 мг/л оказалась в 5–6 раз больше.

Ещё одним показателем связи с глубинным процессом вулкано-логи считают соотношение в воде серы и хлора. По измерениям в прежние годы в водах р. Геналдон, во льду ледника Майли и минеральных источниках Верхнего Кармадона и Колкинской группы отношение S/Cl составляло сотые, десятые доли, редко первые единицы (Пхалагова, 1976). Но сейчас в водах р. Колки оно оказалось более 30, а в озере достигало 100–150, т.е. на три–четыре порядка выше, чем прежде.

Очевидно, что и спустя год после освобождения цирка от ледника здесь продолжался вынос глубинных сульфатных кальциево-магние-вых вод высокой минерализации — до 1000–1500 мг/л. Всё это



Рис. 73. Облако пара и газа в первые дни после катастрофы в тыловой части цирка Колки. Фото НИЛ «Геологоразведчик» 24 сентября 2002 г.

доказывает, что геохимическая картина связана с активными процессами, происходящими в недрах Казбек-Джимарайского вулканического массива, и что в катастрофическом процессе, вероятно, участвовал гидротермальный фактор (Муравьев, 2005).

Последние извержения Казбека происходили 6–7 тыс. лет назад, и он считается не потухшим, а «спящим» вулканом, подземный аппарат которого не окончательно потерял свою силу (Гурбанов, Богатиков, 2004). Недаром массив со всех сторон оконтурен выходами минеральных углекислых вод. Долина Геналдона — давно известный геотермальный район с многочисленными горячими источниками, что не может не сказываться на режиме ледников. В верховьях Геналдона недалеко от конца ледника Майли, в правой боковой морене и даже под ледником, а также у самой поймы реки в 3 км выше посёлка Кармадон (рис. 74) находятся несколько очагов знаменитых лечебных хлоридно-натриевых минеральных вод. Особенно богаты макро- и микроэлементами самые изученные Верхнекармадонские гипертермальные источники на левом склоне близ конца ледника Майли, на высоте 2300 м, с температурой воды от 20 до 59 °С (рис. 75). Циркулируя по сети трещин в недрах земли вблизи вулка-



Рис. 74. Нижние Кармадонские источники, ванное здание и скважины у дна долины в 1970-х годах. Фото К.П. Рототаева



Рис. 75. Верхне-Кармадонские источники после подвижки 1969/70 гг. Фото К.П. Рототаева

нического аппарата Казбека, воды насыщаются углекислотой, калием, железом, магнием, сульфатами, радоном и многочисленными более редкими элементами, такими как сурьма, серебро, литий, мышьяк, ванадий, титан и т.д. С давних времён источники, как уже



Рис. 76. Травертины на горячих Верхне-Кармадонских источниках в сентябре 2003 г. Фото Г.А. Носенко

говорилось, используются в лечебных целях, при этом особенно ценится постоянство химического состава этих минеральных вод.

В 2003 г. мы брали пробы из этих источников, они открылись на прежнем месте после разрушения ледником склона. Среди камней текли горячие ручейки; температура на выходе воды была равна 45–55 °С (рис. 76).

Гидрохимические пробы минеральных вод Казбека, полученные в 2000 г. в ИГЕМ РАН, уже тогда, до катастрофы, позволили предположить активность глубинного магматического очага и, возможно, появление близповерхностных вулканических камер (Гурбанов и др., 2004). Это было подтверждено принципиально новыми геофизическими и геологическими данными, полученными летом 2003 г. Гравиметрические исследования вдоль долины р. Геналдон выявили интенсивную отрицательную аномалию силы тяжести, начинающуюся к

югу от селения Тменикау и резко возрастающую на расстоянии всего 3–4 км по направлению к вулкану Казбек. Установлено приближение к северному краю промежуточной близкой к поверхности магматической камеры с кровлей на глубине 1–2 км ниже уровня моря. Аномалия пониженной плотности вещества может объясняться тем, что магматический расплав насыщен водными флюидами и имеет очень высокую температуру – более 1000 °С. По профилю, пройденному вдоль соседней долины р. Мидаграбиндон, в 10 км западнее геналдонского профиля и выходящему за пределы Казбекского вулканического центра, аномалии силы тяжести не обнаружили.

Другим независимым методом – электроразведки – также определены северные структурные элементы близповерхностной камеры в районе языка ледника Майли, с кровлей предположительно на глубине 4 км ниже уровня моря, а также глубинного магматического очага на глубине 20 км.

При наличии подобных близких камер толща горных пород над ними должна прогреваться, и на земной поверхности могут возникать тепловые аномалии. Для проверки этого был привлечён метод теплового дистанционного зондирования. По 83 ночным тепловым космическим снимкам высокого разрешения с американских спутников NOAA за ряд лет изучалась динамика теплового поля земной поверхности в районе Казбека. Рассматривались различия на парах снимков разных лет для одинакового времени года – летних сезонов. Сравнение снимков 1990 и 2002 гг. не выявило существенных различий, тогда как пара 1990–2003 гг. показала резкую положительную тепловую аномалию с чёткими контурами прямо на месте ледника Колка. Она включала также участок гребня и плато на перегибе к леднику Суатиси, район языка Майли ниже ледопада и левый борт долины Геналдона в его верховьях, до Верхне-Кармадонских источников. Аномалия явно проявилась именно в 2003 г. – после схода ледника, который до катастрофы, вероятно, служил экраном, задерживающим выход глубинного тепла. «Тепловой поток от предполагаемой промежуточной камеры мог вызвать таяние льда в подошве ледника и образование водяной подушки в его основании, которая, наряду с тектоническими подвижками, могла сыграть свою роль в процессе схода лавины» (Корниенко и др., 2004, с. 29).

Таким образом, не остаётся сомнений в том, что проявление новой активности Казбекского вулканического центра оказалось одним из решающих факторов, подготовивших катастрофический сход ледника Колка.

Активизация тектонических процессов

Как уже упоминалось, при облёте зоны бедствия 22 сентября специалистами МЧС и Управления природных ресурсов по Республике Северная Осетия – Алания, были обнаружены крупные отколы льда на висячих ледниках северной стены горы Джимарай-Хох и отходящего от неё к востоку края Майлийского плато. В первые дни после катастрофы газета «Северная Осетия» от 24 и 25 сентября опубликовала статьи А.П. Полквого и О.А. Гончаренко с версией гигантского обвала льда и горной породы, который преодолел более 1000 м по вертикали, обрушился на расположенный ниже ледник Колка, «выбил» его и сбросил вниз по долине. Все сообщения в средствах массовой информации, освещавших небывалую катастрофу, считали эту версию очевидной. В МЧС поступали даже предложения сбросить остатки висячего льда взрывами (рис. 77), но от этого быстро отказались. Гляциологи Северо-Кавказского УГМС В.Д. Панов и Ю.Г. Ильичев считали, что обвал был спровоцирован землетрясением 8 сентября на Черноморском побережье, отголоски которого докатились до Северной Осетии. На висячем леднике горы Джимарай-Хох образовались трещины, он стал сползать, и к этому добавились перегрузки снегом, которого зимой в Осетии выпало на 60–70% больше нормы. Ледник не выдержал напряжения и рухнул вниз на Колку.

Большинство научных статей первых лет после события опирались на версию обвала, который считался «вполне достоверно установленной» причиной катастрофы (Запорожченко, 2003; Панов и др., 2002; Поповнин и др., 2003 и др.). Однако вскоре собранные Л.В. Десиновым (2004) свидетельства и фотоснимки очевидцев, побывавших в этом цирке в конце июля и первых числах сентября, показали, что необычно активное разрушение ледников и горной породы на этом склоне началось уже давно. Стало известно, что с 28 августа по 5 сентября 2002 г. группа туристов из Краснодара, которая бывала здесь и в прошлые годы, наблюдала совершенно необычные, непрекращающиеся обвалы камней и льда именно на этом склоне. В цирке ледника Колка стоял непрерывный грохот, и склон менялся буквально на глазах (рис. 78).

Фотоснимки группы туристов документально показали, что уже в это время почти полностью сформировалась линия отрыва льда, зафиксированная МЧС при облётах три недели спустя. Мы подтвердили это сравнением по маркировочным точкам фотографий склона по состоянию на 2 сентября 2002 г. со снимками, сделанными после катастрофы (рис. 79). Ширина полосы обвалов достигала 1 км. Важно



Рис. 77. Взрывать висячий край ледников было опасно и бесперспективно



Рис. 78. Состояние правого борта ледника Колка в первых числах сентября 2002 г. На первом плане – массы обвального материала на поверхности ледника, достигшие левой морены. Фото краснодарской группы туристов

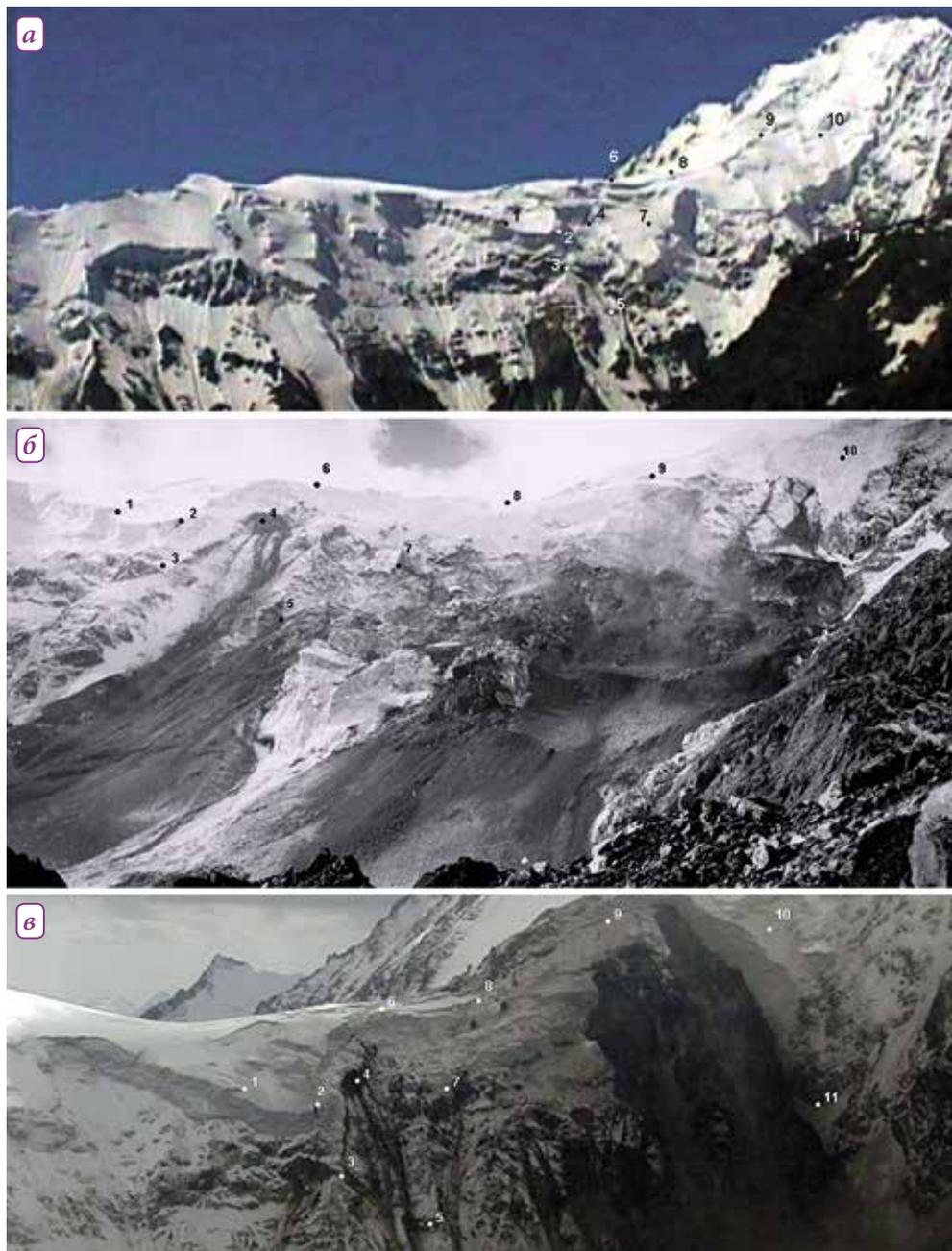


Рис. 79. Гребень горы Джимарай-Хох с участком обвала висячего льда и горной породы на правом борту ледника Колка. а – 2001 г., б – 1.09.2002 г., в – 22.09.2002 г. Цифрами показаны характерные точки в зоне разрушения



Рис. 80. За 54 дня до катастрофы висячие ледовые поля на склоне горы Джимарай-Хох были не нарушены. Фото Э. Манукянца

отметить, что уже на этих снимках — до катастрофы — в зоне обвалов проявились выходы фумарол с чёрными шлейфами потёков воды. И даже при внимательном рассмотрении фотографий от 27 июля 2002 г., сделанных Э. Манукянцем (2003), можно заметить тонкую чёрную струйку талой воды под обрывом висячего края плато.

Начало активного разрушения этого склона другая группа — из Владикавказа — отметила ещё 22 июля. До этого, на снимках, сделанных в цирке альпинистами 5–6 мая 2002 г., в зоне будущих обвалов ничего, кроме следов многочисленных лавин, ещё не было. Также и при наблюдениях группы Э. Манукянца (2003) с гребня над ущельем Гольда 27 июля, за 54 дня до катастрофы, на стыке стены Джимарай-Хох с правым гребнем над ледником Колка, висячие ледники оставались на прежнем месте (рис. 80).

На фотографиях краснодарской группы также видно, что к осени 2002 г. массы льда и горной породы заполнили тыловую часть ледника Колка. В результате необычайно активного действия обвалов на поверхности ледника сформировался мощный конус выноса, покрытый грядами разнообломочного материала; выбросы наиболее крупных обвалов достигали противоположного края ледника (рис. 81). Возможно, что ими была сформирована и длинная полоса льда с брекчеевидной структурой, оставшаяся после схода ледника в ложбине за левой мореной. По другой версии, этот лёд был заброшен в момент срыва ледника, что также вероятно.



Рис. 81. Обломочный материал на поверхности ледника Колка в первых числах сентября 2002 г. Фото краснодарской группы туристов

Такое развитие событий подтвердило затем и дешифрированные космических снимков. В работе О.В. Тутубалиной с соавторами (2005) отмечены на снимке Landsat 7 ETM+ от 19 августа линии отрыва крупных ледовых обвалов и обвальные шлейфы на поверхности ледника, перехлестывающие через весь ледник и его левую береговую морену. А на снимке 20 сентября – за 8,5 часов до катастрофы – обвальный склон выглядит именно так, как и после катастрофы. Авторы считают, что обвалы льда висячих ледников на ледник Колку к 20 сентября практически завершились, и это подтверждается сравнением снимка Landsat 7 ETM+ от 20 сентября с фрагментом снимка со спутника QuickBird от 25 сентября, опубликованным в работе (Huggel et al., 2005).

Так что обвалы начались здесь задолго до подвижки, и обрыв льда на гребне сформировался не за один раз. А камнепады, сползание и оплывание горной породы на том же склоне, как мы видели, продолжались и летом 2003 года.

Оценка всего объёма обрушений льда и твёрдых пород представляет большой интерес, но измерения многих параметров уже невозможны, а расчёты их по неточным картам и фотоснимкам слишком приблизительны, о чём пишет ряд авторов (Поповнин и др., 2003; Васьков, 2004; Тутубалина и др., 2005). Общая площадь обвалившегося льда также имеет разные оценки; подсчёт по космическим снимкам в работе (Тутубалина и др., 2005) даёт величину 0,34 км².

По предварительным расчётам И.М. Васькова (2004), объём обрушившихся скальных пород составлял 25 млн м³, а льда и фирна — до 35 млн м³. В.В. Поповнин с соавторами (2003) считал объём исчезнувших висячих ледников равным 18 млн м³. Л.В. Десинов (2004) оценивал массу горных пород не менее 40 млн тонн, упавшего льда — 15 млн тонн, считая их объёмы равными; а площадь обрушений 0,45 км².

Снимки со спутника QuickBird с географической привязкой позволили, вероятно, точнее оценить объём исчезнувшего участка фирново-ледяных полей на гребне (Huggel et al., 2005). Авторы разделяют область обвалов на две зоны: верхнюю, более пологую, где толщина уступов льда после обвалов составляла 10–15 м, и нижнюю с толщиной отрыва на висячих ледниках 30–40 м. Общий объём потерянного льда они оценили величиной от 8,5 до 13 млн м³. Определить объём обвалившейся горной породы сложнее, приблизительно приведена величина 10–14 млн м³. В сумме объём обрушений по этим подсчётам составляет от 18,5 до 27 млн м³.

Детальное исследование сейсмической обстановки в Северной Осетии в 2002 г., выполненное В.Н. Дробышевым по данным Геофизической службы РАН, показало, что самым сейсмически активным месяцем в том году был июль: за 18 суток массив Джимарай-Хох испытал шесть сейсмических ударов (Drobyshev, 2006). 14 июля произошло самое большое землетрясение: в эпицентре, который находился всего в 8 км к западу от вершины, сила подземного толчка достигала 5,2 баллов. В этот же день было ещё два удара, оказавших воздействие на гору силой 2–3,5 балла.

Следующее значительное землетрясение силой 3,4 балла зафиксировано здесь 22 августа, с эпицентром в 70 км к северо-северо-западу от горы Джимарай-Хох. На сейсмограмме станции Цей, расположенной в 42 км от эпицентра, во время толчка прервалась запись из-за механического смещения прибора. Эффект этого толчка в Нальчике и Владикавказе составил 3 балла. По мнению В.Н. Дробышева, влияние землетрясений такой интенсивности на висячие фирновые поля над ледником Колка может вызвать их значительные механические повреждения, снизить устойчивость блоков горных пород на горе Джимарай-Хох на 9%.

Возможно, что сильные летние толчки могли способствовать не только развитию обвалов, но и нарушению динамических параметров и внутренней структуры самого ледника. Скорее всего, землетрясение 14 июля спровоцировало начало необычных обвалов в тылу ледника Колка. Это подтверждает и космический снимок Terra

ASTER от 18 июля 2002 г., где на заснеженном склоне уже можно заметить чёрные полосы свежих обвалов.

В сентябре отдалённое землетрясение на Черноморском побережье Кавказа силой в эпицентре 2–3 балла на сейсмограммах станции Цей не отразилось. В.Б. Заалишвили с соавторами (2004) в обзоре о первых результатах исследования эндогенных процессов в районе катастрофы сообщали, что сейсмостанциями локальной сети Северной Осетии были зафиксированы землетрясения 13, 15, и 17 сентября.

Л.В. Десинов отмечает интересное событие в 2 часа ночи 20 сентября. В это время за гребнем хребта, ограничивающего ледник Колка слева, в 2 км к северу от него, трое ночевавших охотников были разбужены сильным толчком и содроганием земли, что сопровождалось мощным гулом. Автор считает, что тыловая часть ледника, насыщенная водой и газом и находившаяся под давлением газов снизу, была потрясена геотермальным взрывом от дегазации внутренних полостей во льду и воды на ложе (Десинов, 2004). Однако на следующий день, судя по космическому снимку, ледник оказался целым, так что взрыва не было. М.Г. Бергер (2014) считает этот горный удар характерным и важным предвестником газодинамического выброса ледника, вызвавшего катастрофу в 8 часов вечера.

В то же время выброс самого ледника, как показало изучение сейсмограмм, сопровождавших этот процесс, не был вызван землетрясением в данном районе. Но В.Б. Заалишвили с соавторами (2004, 2014) указывают, что в течение 19 и 20 сентября самые чувствительные из окружающих станций и некоторые станции Грузии, в том числе Тбилиси, зарегистрировали ряд сигналов от удалённых землетрясений (из Китая, Японии и др.). 20 сентября волны одного из них (в Западном Ириане) достигли района катастрофы как раз в последние минуты перед ней, и, возможно, послужили «спусковым крючком» для схода ледника.

Мало вероятно и другое заключение – Л.В. Десинова, который считает, что колебания, импульсы и толчки 19 и 20 сентября до 20 часов, отмеченные несколькими станциями Грузии и Северной Осетии, исходили из района ледника Колка и могли означать движение уже за 2 часа до катастрофы фронтальной части языка ледника, которая к этому времени сместилась в узкий каньон и к морене, разделяющей ледники Колка и Майли. Для такого заключения нет убедительных доказательств.

В 20 час. 08 мин. 30 сек. (16 час. по Гринвичу) включились сразу все окружающие сейсмостанции, что авторы (Заалишвили и др., 2004, 2014) связали с предшествующим сходу ледника событи-

ем: это мог быть либо крупный обвал всячего ледника (вслед за И.М. Васьковым, 2004), либо воздействие большой массы накопившейся воды, как говорилось в первых статьях Института географии РАН (Котляков и др., 2003), либо газодинамический выброс ледника по М.Г. Бергеру (2007б). Мы полагаем, что эти сейсмические события отражают начало схода самого ледника.

В то же время мало вероятно и другое заключение – что колебания, импульсы и толчки 19 и 20 сентября до 20 часов, отмеченные несколькими станциями Грузии и Северной Осетии, исходили из района ледника Колка и могли означать движение фронтальной части языка ледника уже за 2 часа до катастрофы, которая к этому времени сместилась в узкий каньон и к морене, разделяющей ледники Колка и Майли. Для такого заключения нет убедительных доказательств.

В 20 час. 08 мин. 30 сек. (16 час. по Гринвичу) включились сразу все окружающие сейсмостанции, что авторы (Заалишвили и др., 2004, 2014) связали с предшествующим сходу ледника событием: это мог быть либо крупный обвал всячего ледника (вслед за И.М. Васьковым, 2004), либо воздействие большой массы накопившейся воды, как говорилось в первых статьях Института географии РАН (Котляков и др., 2003), либо газодинамический выброс ледника по М.Г. Бергеру (2007б). Мы полагаем, что эти сейсмические события отражают начало схода самого ледника.

На графиках, отражающих на сейсмограммах 20 сентября моменты главного выделения энергии, авторы (Заалишвили и др., 2004, 2014) интерпретируют первый наибольший высокочастотный импульс как удар о скалы правого борта на повороте долины ниже языка ледника Майли, а далее связывают серию сейсмических пульсаций с несколькими пиками, возникавшими по ходу движения ледово-водно-каменного селя. Согласно этой интерпретации, максимальный пик энергии с серией последующих волн совпадает с ударом ледовой массы о стену Скалистого хребта, а весь процесс схода ледника продолжался 10 мин. 31 сек., при этом амплитуда колебаний начала уменьшаться уже с 20 час. 14 мин.

В.Н. Дробышев (Drobyshev, 2006) на основе записей сейсмограмм и расчётов по геометрии следа «лавины» выполнил расчёт распределения скоростей двигавшейся массы вдоль всего пути транзита. Оказалось, что самые большие скорости были на первых километрах движения – до 8–9 км от стены горы Джимарай-Хох в цирке – здесь они превышали в среднем 220 км/час. После 10 км пути скорость движения начала постепенно снижаться и составила

155–145 км/час при столкновении со Скалистым хребтом и проталкивании ледово-каменной массы в ущелье над тоннелем.

Согласно этим расчётам, начальная скорость движения ледника резко возросла до 230 км/час (максимальное значение на всём пути!) на расстоянии 5 км от исходной точки, т.е. именно там, где, по нашему мнению, масса льда в ущелье соединилась с волной воды, перелестнувшей на правый борт долины ледника Майли (см. рис. 57). Это может служить ещё одним косвенным доказательством присутствия потока воды, сразу увеличившего скорость движения всего ледово-водно-каменного селя.

В целом роль землетрясений в формировании обвалов льда и горных пород не следует переоценивать. Весь Кавказ лежит в зоне высокой сейсмической активности, но многолетние фирново-ледяные поля и всяческие ледники существуют постоянно. С другой стороны, обвалы льда и лавины служат постоянным источником питания ледника Колка и в «спокойные» периоды. По нашим наблюдениям в 1970-е годы, ледовые обвалы здесь происходят постоянно и летом и зимой, и днём и ночью. Однако такого разрушения склона, с которого происходит основное питание ледника Колка, как в 2002 г., прежде никогда не наблюдалось.

Очевидно, что новые сильные землетрясения, как и глубинные процессы в недрах вулканического массива, были вызваны активизацией тектонических процессов в районе Казбека. Долина ледника Колка находится в зоне крупных разломов, где возможны смещения отдельных блоков и часты землетрясения. На это ещё в 1930-е годы указывал Л.А. Варданянц, анализируя причины выбросов льда Казбекских ледников, в том числе и Геналдонской катастрофы 1902 г. Он указывает на очень крупный широтный разлом, круто падающий к северу, с поднятым северным крылом, который проходит вдоль долины р. Каба-хи, по водоразделу между ледниками Девдорак и Чач и дальше к западу «скрывается... под ледяным покровом северного склона горы Казбек» (Варданянц, 1932, с. 53).

Кроме того, постоянное поднятие Дарьяльского горста вызывает нарастание «напряжений, постепенно усиливающихся и приуроченных преимущественно к поверхностям разрывов», и резкие «разряды» с сильным сотрясением, приводящие к расколам льда ледников. Варданянц считал, что ледовые выбросы вызваны землетрясениями и формируются обвалами всячего «этажа» ледников, характерного для всех ледников Казбека. От «ледяной стены всячей части ледников должны отрываться целые “ленты” льда».

При этом не предполагалась возможность подвижки главного ледника, хотя было известно, что, например, перед Геналдонским событием 1902 года фронт ледника Колка, разбитый на блоки, придвинулся к краю ледника Майли. И сам Л.А. Варданынц пишет в той же статье, что по съёмке 1902 г. (масштаба 1:16800), выполненной перед самой катастрофой, Геналдонский ледник «составлялся» из двух: западного (Колка) и восточного. Ледник Колка был на 1 км длиннее, и поверхность его имела уровень более высокий по сравнению с Майли, а не наоборот, как он это наблюдал позже, во время своих исследований в 1920-х годах.

По мнению Л.А. Варданынца, событиям Геналдонской катастрофы 3 и 6 июля (выбросу масс льда) «безусловно предшествовали явления глубинного характера, т.е. сейсмические». Как доказательство он отмечает некоторые явления, которым не было уделено должного внимания первыми исследователями катастрофы. Например, изменение режима горячего источника близ конца ледника: вода его помутнела, дебит увеличился и стал пульсирующим. Страшный воздушный вихрь, возникающий впереди движущейся массы льда, автор считает следствием сильного толчка, «сейсмического сотрясения». Кроме того, как указывал Н.В. Поггенполь, «с мая месяца были слышны трески в верхней части ледника» и «частые падения камней и значительных глыб в таких местах долины, где раньше они падали весьма редко» (Поггенполь, 1905, с. 9–10). Но Н.В. Поггенполь полагал это следствием Шемахинского землетрясения, хотя оно произошло ещё в феврале 1902 г. и было значительно удалено от Казбека.

Заключительный этап подвижки 1902 г даже современные исследователи иногда связывают с землетрясением (Казбекским, с координатами 42,8° с.ш. и 44,2° в.д.), зарегистрированным именно 3 июля (Рогожин и др., 2004). Очевидно, об этом событии исследователи в те годы ничего не знали.

Неотектонические процессы в этом районе подтверждаются исследованиями геологов в районе катастрофы 2002 г. Ледник Колка находится на пересечении двух разломов – крупного субширотного, на котором расположена и долина Колки, и субмеридионального, проходящего в тыловой части ледника. А.Г. Гурбанов и др. (2004) установили современные проявления новейшей тектоники в этом районе путём сравнения космических снимков ASTER от 3 октября 2001 г. и 6 октября 2002 г., т.е. полученных до и после катастрофы. Выявлен новый субширотный разлом, проходящий вдоль линии селение Кани – высоковольтная опора на водоразделе рек Геналдон и Кауридон – Санибан-

ская долина. По этому разлому произошло смещение каменно-ледовой массы в Кармадонской котловине. Выявлен и более крупный разлом северо-восточного простирания, возникший незадолго до катастрофы, по которому, скорее всего, откололись от массива горы Джимарай-Хох блоки коренных пород, затем обвалившиеся вместе с ледовой «шапкой» на ледник Колка (Гурбанов и др., 2004).

Космические снимки позволили также судить о «подновлении» некоторых тектонических нарушений — расширении зоны дробления вдоль крупного разрывного нарушения в районе массива Джимарай-Хох, а также появления нескольких новых элементов в рельефе северной части ледника Майли и в долине р. Геналдон. Тектоническая активность может также способствовать вертикальному теплопереносу из глубин по разломам и разрывным нарушениям, что приводит к температурным аномалиям вдоль разлома (Корниенко и др., 2004).

И.М. Васьков (2004) приводит данные о современном активном надвиге в Казбек-Джимарайском массиве со скоростью поднятия около 7 мм/год и горизонтальным смещением порядка 11–13 мм/год, что постоянно увеличивает крутизну правого склона над ледником Колка и уменьшает его устойчивость. В зоне активного надвига происходят подвижки блоков в северном направлении по плоскостям смещения, имеющим падение на юг под углом 30°. Это постоянно увеличивает крутизну правого склона над ледником и способствует развитию обвалов.

Добавим ещё, что стены массива Джимарай-Хох, обращённые к леднику Колка, и отходящего на восток правого гребня сложены в основном сильно трещиноватыми палеозойскими метаморфическими сланцами с плитчато-сланцеватой текстурой, с наклоном слоёв 35–40° на северо-восток при таком же среднем уклоне самого склона (Huggel et al., 2005). Всё это, безусловно, создаёт слишком неблагоприятные условия для устойчивости горного склона.

Отсутствие признаков пульсации ледника

После внезапно случившейся катастрофы мы писали, что по всем признакам на этот раз ледник Колка как пульсирующий ледник не был готов к очередной подвижке (Ледник..., 2002; Котляков, Рототаева, 2003). Отмечалось множество явлений, никак не объяснимых с позиций «очередной» пульсации.

При изучении подвижки 1970-х годов был рассчитан необходимый прирост постоянного положительного баланса массы ледни-

ка Колка для достижения критической величины (40–50 млн тонн), когда разгрузка неизбежна, и сделан прогноз — при постоянстве климатических условий и отсутствии аномальных внешних воздействий необходимая для подвижки масса должна накопиться через 60–70 лет (Рототаев и др., 1983), а значит, не ранее 30-х годов XXI века. Интервалы между известными подвижками ледника (1835, 1902, 1969 гг.) составляли также около 70 лет. Однако такой период нельзя считать абсолютно достоверным, поскольку в 1930–40-е годы наблюдения за ледником не проводились, как и во второй половине XIX в. Но во всяком случае точно известно, что катастрофических событий в долине Геналдона в годы с отсутствием наблюдений не случилось.

Интервалы между подвижками ледника Колка могли со временем измениться в связи с деградацией оледенения на Кавказе, усилившейся с конца XX века. Из-за уменьшения площади и толщины ледников подвижки нескольких пульсировавших прежде кавказских ледников вообще прекратились. Для ледника Колка, по расчётам В.Д. Панова, период пульсаций должен был сократиться до 45–50 лет (Ефремов и др. 2007). Со времени последней подвижки прошло 32 года, и до очередной пульсации требовался ещё длительный период подготовки.

Вообще подвижка пульсирующего ледника — это увеличение скорости движения льда на 1–2 порядка с перемещением массы из зоны выноса в верховьях ледника в зону привноса в его низовьях, что приводит к понижению поверхности ледника в первой зоне и к повышению во второй. В результате подвижки конец ледника продвигается вниз по долине, а по завершении её интенсивно тает на всём протяжении пульсировавшей части.

Внешние признаки готовности пульсирующего ледника к подвижке очень характерны, они были ярко выражены на Колке и в 1969, и в 1902 гг. Продвижение фронта начиналось заранее, за несколько месяцев. Перед самой подвижкой поверхность ледника повышалась, постепенно весь наступающий язык увеличивался в объёме, покрывался трещинами, разбивался на блоки и дробился, т.е. кардинально изменял свою структуру. Фронт ледника, до того медленно наступавший, резко ускорял продвижение и входил в узкое ущелье Колки слева от языка Майли.

Катастрофа 2002 г. произошла без такой подготовки, фотоматериалы и космические снимки показывают отсутствие этих признаков вплоть до последних дней перед 20 сентября. Ледник «ушёл» из своего вместилища одновременно и практически полностью (по приблизительным оценкам, вся масса «ушедшего» ледника состави-

ла 100 млн м³), на днище остались лишь небольшие скопления раздробленного льда. Причём «ушёл» ледник с огромной скоростью — буквально «вылетел» в сторону ледника Майли.

Начиная с 90-х годов, специальных регулярных наблюдений за ледником также не было. Проведённый нами анализ аэрофотосъёмки 1972, 1981 и 1987 гг. позволил показать, что процесс увеличения объёма ледника шёл примерно с той скоростью, что и в прогнозе. Это показали и расчёты годового прихода вещества на леднике за последние 10 лет перед 2002 г., о чём говорилось выше (Лебедева, Рототаева, 2005).

Продвинувшаяся в 1970 г. часть ледника Колка растаяла к 1995 г. По сообщению И.М. Васькова, летом 1995 г. конец ледника Колка находился на высоте 2950 м, ниже него в долине на протяжении 450 м ещё оставался после подвижки мёртвый лед, покрытый мореной. 12 сентября 2000 г., по измерениям гидрометеорологической службы Северной Осетии, язык ледника находился на высоте 2960 м над ур. моря, в 450 м от устья речки Гольда.

В 2000 г. верховья Геналдона посетили специалисты Росгидромета и ничего угрожающего не обнаружили. В том году поверхность ледника по сравнению с 1968—1969 гг. была ниже на 30—40 м (Панов и др., 2002).

В сентябре 2001 г. гляциологи Московского университета обследовали ледники Майли и Колка, «последний имел типично отступающий вид без признаков активизации» (Поповнин и др. 2003). На фотоснимках В.Н. Рындина, сделанных в 1997 г. (рис. 82), В.Н. Дробышева в августе 2000 г. (рис. 83), С.С. Черноморца в сентябре 2001 г. (Поповнин и др., 2003) видно, что ледник Колка ещё слишком далёк от набора критической массы. Его ровная заснеженная поверхность без всяких признаков активизации просматривается также и на снимках альпинистов в мае 2002 г., и на космическом снимке ASTER 18 июля 2002 г.

Группа краснодарских туристов, посетившая ледник в конце августа — начале сентября, также не отметила на языке ничего особенного, хотя в верховьях О.В. Неподоба и Д.Е. Солодкий видели и фотографировали необычные, не прекращающиеся обвалы камней и льда. А на космическом снимке от 19 августа обвальные шлейфы уже перехлёстывают через весь ледник и его левую береговую морену (Тутубалина и др., 2005).

На снимке, сделанном с борта Международной космической станции «Альфа» 13 августа 2002 г., т.е. за 38 дней до события, к сожалению, видна лишь нижняя половина ледника, и не ясно, что происходит в верхней части (рис. 84). Хорошо видно, что поверх-



Рис. 82. Язык ледника Колка в 1997 г. Фото В.Н. Рындина



Рис. 83. Язык ледника Колка в 2000 г. Фото В.Н. Дробышева

ность ледникового языка ещё не повышена и не имеет трещин, конец его скрыт под моренными отложениями. В районе конца ледника видны несколько дугообразных валиков, следующих друг за другом. Л.В. Десинов с первых своих работах (Десинов, 2004) и до сих пор считает, что это волны активизации, отмечающие фронт на-



Рис. 84. На снимке 13 августа 2002 г. с борта МКС нет видимых признаков начала подвижки ледника Колка

чавшейся пульсации ледника, которая затем продолжала развиваться. Но соавторы Л.В. Десинова в данной работе, как и все другие исследователи, изучавшие процесс катастрофы, с этим не согласны.

«Однако данные валы мало чем отличаются от многих других похожих образований на поверхности ледника – морен, следов действия поверхностных водотоков, огив» (Поповнин и др., 2003, с. 9).

Тем более нельзя согласиться с Л.В. Десиновым, когда он полагает, что фронтальная часть ледника начала продвигаться и переместилась в узкий каньон и к морене, разделяющей ледники Колка и Майли. Никаких доказательств связи этих «колебаний», «импульсов» и «толчков» на сейсмограммах в Грузии с продвижением ледника вниз в ущелье нет.

На более поздних снимках с борта американского спутника Landsat-7 от 19 августа, 4 сентября и утром 20 сентября 2002 г. видно, что кинематических волн на языке ледника нет и конец его находится на прежнем месте. Ледник оставался практически стационарным до момента катастрофы; изменений в языковой части Колки между 19 августа и 20 сентября не было (Тутубалина и др., 2005).

Вызывает также сомнение предположение о начавшейся за 8 часов до катастрофы активизации движений в самом теле ледника, высказанное в работе О.В. Тутубалиной с соавторами (Тутубалина и др., 2005). Анализируя мелкомасштабный снимок со спутника Landsat-7 ETM+ 20 сентября, где ледник плотно закрыт свежевыпавшим снегом, авторы пишут, что, «по-видимому, к утру 20 сентября произошло образование разлома, отделяющего пологую часть ледника от его правых притоков... из-за проседания поверхности ледника под воздействием обвалов». Признаками разлома они считают трещины длиной около 250 м на двух участках в нижней части правого склона цирка. Но вместе с тем справедливо отмечают, что такие трещины существовали и прежде, даже приводят в доказательство фотографию 1997 г. Можно привести и еще множество фотографий с этими трещинами в нижних частях притоков Колки в разные периоды его существования.

Кроме того, на снимке 20 сентября признаками той же активизации ледника авторы статьи (Тутубалина и др., 2005) считают тёмную полосу в тыловой части левой боковой морены. Они пишут, что вероятнее всего это тень крутого уступа, образовавшегося вследствие подъёма и вспучивания поверхности начавшего продвижение ледника, наползающего на боковую морену. Предполагается, что перегрузка тыловой части ледника обвалами привела к появлению участка активизации и началось ускоренное движение льда по ложу поперёк оси ледника к левой морене, в то время как язык и фронт ледника Колка оставались в стационарном состоянии. Однако с этим нельзя согласиться. Необходимо понимать, что если бы ледник

просел с одной стороны и сдвинулся на одном тыловом участке поперёк оси, поверхность его неизбежно должна была быть нарушена. На самом деле она оставалась спокойной и не изменилась.

Более того, при сравнении мелких снимков Landsat от 19 августа и 20 сентября и снимка метрового разрешения со спутника QuickBird 25 сентября (Huggel et al., 2005), приводимых теми же авторами (Тугубалина и др., 2005), можно видеть на каждом из них одни и те же, повторяющиеся элементы рельефа, света и теней на этом участке. Гораздо больше оснований поддержать второе предположение авторов – что это край «обвального тела», а точнее, поверхности ледника, которая уже повысилась из-за обвального материала и перекрыла тыловую часть морены. Во всяком случае, снимок 20 сентября не даёт никаких оснований для вывода о начавшемся движении в теле ледника.

В целом совершенно очевидно, что подвижка ледника Колка в 2002 г. не была очередной его пульсацией. Преждевременный срыв ледника и колоссальный масштаб катастрофы были определены внеледниковыми экстремальными факторами.

Причины катастрофы

Объяснение такого сложного и многопланового события, как Кармадонская катастрофа 2002 г., очевидно, не может дать отдельный исследователь. Разные специалисты предлагают свои, неодинаковые решения, но задача у них общая – найти причины необычного природного явления, чтобы понять возможности его повторения и предупреждения в будущем.

В своих публикациях сразу после Кармадонской катастрофы (Котляков, Рототаева, 2003; Котляков и др., 2003; Kotlyakov et al., 2004a) мы предполагали главным её виновником огромное количество воды, скопившейся в леднике и под ним, ставшее основной причиной преждевременной подвижки пульсирующего ледника. Но там же писали, что это кажется недостаточным для такой невероятной реакции ледника и привлекали очевидные факты вулканогенных проявлений и активизации тектонических процессов. Наличию воды на ложе вообще придаётся большое значение при анализе причин подвижек ледников и высоких скоростей движения льда. Известны термины «водная постель», «внутренние плотины», «всплывание ледяной массы». В связи с событием 2002 г. С. Huggel с соавторами (Huggel et al., 2005) также рассматривает гипотезы, связанные с накоплением воды и гидравлическим эффектом. Подлед-

никовая и внутриледниковая вода может уменьшать силу давления ледника, и в чрезвычайном случае он может всплыть. При этом в качестве источника подлёдного таяния рассматривается геотермическое тепло. По расчётам для района Казбека оно может дать всего 1 см талой воды за год, а по сведениям для других вулканических областей с более высоким положением магматического очага — примерно 10 см. Авторы расчётов полагают, что этого недостаточно для нарушения стабильности ледников типа ледника Колка с небольшим уклоном ложа, хотя этот эффект нельзя исключать.

При изучении следов катастрофы в верховьях Геналдона мы получили доказательства очень большого участия воды в подвижке. Её накопление было связано в определённой степени с климатическими причинами. Но было совершенно очевидно, что это не могло объяснить всей грандиозности катастрофы. По мере накопления геологических и геофизических данных на первое место вышел эндогенный фактор.

Здесь область доказательств принадлежит геологам, но даже и внешние признаки после схода ледника свидетельствовали об участии этих процессов: локальные точки таяния высоко на холодной стене, запах сероводорода в цирке, активно разрушающийся склон над ледником, неоднократные летние землетрясения... Исследования геологов определили положительную тепловую аномалию прямо под ледником Колка, связанную с близповерхностной магматической камерой. Нередко катастрофу всё же связывают с землетрясением. «Понятно, что ...действовали многие другие факторы, но очевидно, что сейсмический толчок в какой-то степени «подготовил» эту катастрофу. Можно говорить лишь о том, что ход экзогенных процессов (особенно катастрофических) в таких активных с разных позиций районах, как Горная Осетия, в значительной мере обусловлен эндогенными, в том числе сейсмическими процессами» (Рогожин и др., 2004, с. 49).

Камчатский гляциолог Я.Д. Муравьёв (2005) предлагает гипотезу геотермального извержения вследствие взрывообразного расширения газов во льду. Он связывает подготовку катастрофы с перестройкой сложной гидротермальной системы под ледником, приуроченной к трещиноватой зоне глубинного разлома вдоль ущелья Колки и имеющей в качестве источника тепла неоинтрузию горы Джимарай-Хох или сам магматический очаг вулкана Казбек. При изменении гидростатического равновесия в этой системе, т.е. температуры и давления под ледником на границе с гидротермальным резервуаром, в нём происходит преобразование химических элементов.

Если ледовая «крышка» внезапно разрушается (например, обвалом), сброс давления на ложе и проникновение воздуха вызывают мгновенное освобождение из термальных вод растворённых в воде под большим давлением углекислого газа и сероводорода в виде взрыва и газоводяного фонтанирования со скоростью до сотен м/сек. Недаром после схода ледника в течение многих дней в цирке висело облако пара и газа, и спустя год после этого здесь продолжался вынос глубинных минеральных вод с необычным сульфатно-кальциевым составом, который резко отличался от всех природных вод этого района и свидетельствовал о вулканогенном факторе. Взрыв газов в теле ледника с «эффектом шампанского» привёл к огромному ускорению его выброса из ложа.

По мнению Я.Д. Муравьёва, такие же причины — изменения газо-термодинамических условий на ложе ледников — могли вызывать и обвалы всяких ледников, которые перекрывают неointрузии стены горы Джимарай-Хох, а также частые «обвалы» Девдоракского ледника в первой половине XIX в., «сидящего» на том же широтном разломе (Муравьёв, 2005, с. 53).

Эта гипотеза представляется весьма вероятной для объяснения причин Кармадонской катастрофы. Но дальнейший сценарий, предлагаемый Я.Д. Муравьёвым, мы не можем поддержать. По его мнению, разрушение ледяной «крышки» на леднике Колка было вызвано очень крупным обвалом со стены Джимарай-Хох, который образовал фирново-ледяную лавину. Она прокатилась по леднику, «вызвав многочисленные сотрясения в его теле», вовлекла его в ускоряющееся движение, и далее неслась по долине 14 км впереди основного вала ледниковой массы и преобразовалась затем в каньоне Скалистого хребта в селевой поток. С этим, как мы видели, нельзя согласиться.

М.Г. Бергер (2007а, 2007б, 2014) объясняет катастрофу не перестройкой сложного гидротермального аппарата под ледником с выбросом газов и воды, разрушивших ледник, а внезапным газодинамическим выбросом самого ледника. Он отрицает участие воды не только в подготовке, но и в самом процессе катастрофы. Причиной события автор считает скопление под ледником огромного количества глубинных поствулканических газов с аномально высоким давлением и направленной миграцией вверх к земной поверхности.

Этот процесс вызвал усиленное трещинообразование и разрушение скальных пород в горном окружении тыловой части ледника, что явилось причиной длительных летних обвалов. Давление сжатых газов под ледником постепенно нарастало и 20 сентября превысило силы сцепления ледника с ложем и бортами, произошёл динамиче-

ский удар и взрывоподобный выброс ледника с гигантской зоной разлёта обломков. Газ, расширяясь при выбросе, породил также колоссальную по силе ударную воздушную волну.

Безусловно, обе гипотезы достаточно близки между собой, так как основным фактором действующих сил полагают накопление на глубине под ледником большого количества газов, источником которых служат длительные процессы поствулканической деятельности в Казбек-Джимарайском регионе. К моменту катастрофы создались условия, когда давление газов превысило критический уровень, что вызвало гигантский взрыв, сорвавший ледник. После выброса ледника в цирке резко усилилось выделение газа. Только такой взрыв может объяснить образование воздушной волны огромной силы, опережавшей ледово-водно-каменный поток, а также колоссальную скорость выброса ледника из цирка – свыше 200 км/час именно на первых километрах движения. Подобную скорость не могло обеспечить ни само по себе большое количество воды под ледником, ни, как говорили В.В. Поповнин с соавторами, «разгон ледово-каменного материала в верхнем секторе своего пути ... по кровле мёртвых льдов, которые прослеживались в долине ...ниже фронта ледника Колка» (Поповнин и др., 2003, с. 8).

Вместе с тем следует отметить, что, например, Р.А.Тавасиев (2014) приводит ряд весомых доказательств отсутствия сильной ударной воздушной волны, достигшей Скалистого хребта. Однако очевидно, что стремительное движение ледово-каменной массы по долине сопровождалось мощными вихрями воздушного потока. Об этом свидетельствуют следы вдоль верхней границы прохождения «селя»: на правом склоне местами видна узкая полоса деревьев, поваленных воздушной волной (рис. 85), на обоих склонах иногда трава засыпана выбросами песка и щебня.

Непосредственным спусковым механизмом, последним импульсом, по Я.Д. Муравьёву, могло быть внешнее воздействие с нарушением структуры тела ледника, например, очень крупный обвал, разрушивший ледовую «крышку». М.Г. Бергер считает, что такого триггера могло и не быть; газодинамический выброс ледника в сложившихся условиях был неизбежен.

С некоторыми утверждениями М.Г. Бергера, которые повторяются в разных его публикациях, посвящённых катастрофе (например, Бергер, 2007а, 2014 и ряде других), трудно согласиться.

Мы по-прежнему остаёмся в убеждении, что скопление больших объёмов воды под ледником (а также, возможно, добавленной при



Рис. 85. Поваленные деревья вдоль верхней границы прошедшего по долине каменно-ледового вала. Фото НИЛ Геологоразведчик

взрыве и излиянии геотермальных вод), сыграло чрезвычайно важную роль в процессе схода ледника, подготовив его к дальнейшему сценарию катастрофического развития событий. Вода обеспечила отрыв разрушенного ледника от ложа целиком и дальность прохождения всей массы вниз по долине. Присутствие воды подтверждают и расчёты А.Н. Божинского (2005), о которых говорилось выше. Если взрыв выбросил ледник из цирка, то далее для движения ледово-водно-каменного потока, преодолевшего за 7 минут расстояние почти 20 км (от тыла ледника Колка до Кармадонских ворот) было необходимо участие не менее 11 млн м³ воды. Без этого масштаб катастрофы не был бы столь ярко выражен.

По мнению М.Г. Бергера, при газодинамическом выбросе ледника произошёл «высокоскоростной разлёт продуктов его разрушения», «метание обломков» «вверх и в стороны от эпицентра выброса» на правый и левый борта и «на десятки километров». Кроме

того, в цирке образовалась «гигантская воронка выброса», на выходе газоподводящего канала возникло «воронкообразное (мульдообразное) расширение с диаметром в несколько сотен метров».

Однако на пустом ложе ледника не было ничего похожего на «гигантскую воронку выброса», это видно на всех снимках (см., например, рис. 66 и 68) и подтверждено при наземных обследованиях цирка. Нет также никаких признаков «разлёта обломочного материала», о чём пишет автор, но есть чёткие морфологические следы работы воды — потока со льдом, который смыл верхнюю часть моренного «треугольника» между ледниками, оставил эрозионные борозды от стекавшей воды на крутых спусках к леднику Майли и в ущелье Колки и захлестнул на правый борт долины Майли. Эта волна, промчавшись по леднику Майли, соединилась с массой разрушенного ледника, сходящего по ущелью, и обогатила его водой, ещё больше увеличив его скорость.

Есть также ясная картина направленного выброса бывшего ледника именно вниз по ущелью Колки и долине Геналдона в виде ледово-водно-каменного потока. Он имел огромную эродирующую силу, оставив после себя долину, выпаханную движением всей массы льда, воды и камней, с останцами льда, вмазанными в углубления на скальных бортах или оставленными на склонах на высоте более 100 м (рис. 86, см. также рис. 46 и 48). Эти изменения нельзя представить себе как результат «вихреобразного флюидного» «дисперсного потока взвешенных в газовой среде» продуктов разрушения ледника, пронёсшихся по долине до Скалистого хребта, «но не затронувших почвенный и травяной покровы в зоне транзита на днище Геналдонского ущелья», как пишет М.Г. Бергер (2007а, с. 139).

В свете последних данных становится очевидным, что и в 1902 г., хотя событие и началось с подвижки пульсирующего ледника, заключительный этап Геналдонской катастрофы 3 и 6 июля по всем признакам был аналогом событий 2002 года, только в меньшем масштабе. «Пушечная пальба» в верховьях ледника, «страшный ветер предшествовал обвалу», «с гор пронёсся ураган, и из ущелья Колка с неимоверным шумом вырвалась страшных размеров черная масса камней и льда, ...в один миг покрыла нижний конец ледника Майли... ударившись о правую морену, перекинулась на левую... и ринулась вниз»... (Штебер, 1904, с. 241). Такой стремительный выброс ледника с образованием мощной ударной воздушной волны мог быть и тогда вызван взрывом накопленного под ледником большого количества вулканических газов. Об этом пишут и Я.Д. Муравьёв, и М.Г. Бергер.



Рис. 86. Долина Геналдона, выпаханная движением массы льда, воды и камней. Фото Н.И. Осокина

Очевидно, что в Казбек-Джимарайском массиве и в будущем возможны повторения событий, вызванных той же эндогенной причиной, и одно из них уже произошло в мае 2014 г. на Девдоракском леднике, о чём будет сказано ниже.

Однако, к сожалению, несмотря на исследования и доказательства геологов, на детальный гляциологический анализ, во многих публикациях обвал висячего ледника по-прежнему считается главной причиной катастрофы на Колке 20 сентября 2002 г. Снова публикуются статьи Ш.С. Муратова с соавторами (Ледник..., 2014), которые полагают, что обвал был причиной не только катастрофы 2002 г., но даже и подвижки ледника в 1969/70 г.

В числе гипотез, связывающих катастрофу на леднике Колка 2002 года с обвалами, можно вспомнить такие. Причиной срыва ледника в сентябре 2002 г. был либо гигантский обвал висячего фирнового поля, вызванный землетрясением (например, Ефремов и др., 2007; Drobyshev, 2006) или современными тектоническими под-

вижками (Васьков, 2014), либо очередной из серии обвалов, происходивших до катастрофы, который «выбил» ледник. Предлагается даже такой сценарий: «обвалы били в юго-западный угол ледника подобно кию, ударяющему по бильярдному шару. Один из таких обвалов вечером 20 сентября 2002 г. ...ударил в нестабильный ледяной массив и сдвинул его вниз по долине» (Тутубалина и др., 2005, с. 70).

Обвалы льда или фирновых карнизов не бьют в ледник и не падают на него сверху как бомба. Несостоятельны версии и тех исследователей, которые занимались расчётом силы прямого «вертикального» удара фирново-ледяного поля (тем более всего объёма сразу), упавшего на ледник и заставившего его сорваться. Необходимо учитывать, что правый склон цирка, который был подвержен обвалам, хотя и очень крут (в среднем 35°), но имеет резко расчленённый рельеф с множеством острых гребней, скальных выступов и ступеней. Глыбы фирново-ледовых обвалов (как и куски горной породы) падают не на ледник, а на этот склон, разбиваясь на множество всё более мелких обломков, и рассыпаются на поверхности ледника широким шлейфом. Поэтому грохот обвала всегда слышится долго и стихает постепенно.

Тем не менее, длительные обвалы льда и горной породы с гребня в тыловой части ледника Колка сыграли определённую роль в подготовке подвижки. Они привели к увеличению его массы, повышению нагрузки и давления в подлёдных горизонтах и напряжений во всём его теле. Развитию обвалов способствовали новые тектонические подвижки вдоль линий омоложенных разломов в теле вулканического массива, а также землетрясения. Возможно, на эти процессы влиял и прогрев скального основания ледников выходящими газами фумарол. Некоторое значение имело также уменьшение прочности висячих фирновых толщ из-за аномального таяния в последние годы до события. Мы считаем обвалы не причиной, а следствием, проявлением прежде всего тех же эндогенных процессов, что привели к катастрофе.

В дискуссиях о причинах и механизме Кармадонской катастрофы каждый специалист находит факты, отвечающие его точке зрения. И они действительно есть, так как необычность события и грандиозность его масштаба вызваны именно целым комплексом факторов, сложившихся на северном склоне вулканического массива Казбек. И всё же, хотя накоплен уже большой ряд фактов и доказательств, раскрывающих разные аспекты грандиозного события, и сейчас остаются справедливыми слова Э.А. Штебера: «Что происходило в ущелье Колка, никто не знает» (Штебер, 1904, с. 242).

ИЗМЕНЕНИЯ В РАЙОНЕ КАТАСТРОФЫ В 2003–2014 гг.

Процессы восстановления ледника Колка

Дискуссию о причинах и механизме произошедшей катастрофы продолжает тема об угрозе её повторения. Особый научный интерес вызывает отдельный вопрос — может ли вообще возродиться ледник в пустом цирке в современных климатических условиях, при повсеместной деградации кавказских ледников. Спустя год после схода ледника Колка, на следующее лето 2003 года Институт географии РАН начал регулярные полевые исследования в этом районе, которые продолжаются до настоящего времени. Они включают наблюдения за изменениями в бассейне ледников Колка–Майли, в долине р. Геналдон и в районе ледово-каменного завала, образовавшегося перед Скалистым хребтом. Основная задача заключается в слежении за процессами восстановления в цирке самого ледника Колка. В ходе наземных маршрутных работ выполняются GPS-наблюдения, фото-съемка с реперных точек, получены температурные данные и пр.

После катастрофического разрушения и выброса ледника из цирка 20 сентября 2002 г. вдоль правого борта в нижней части склона осталась полоса ледяного обрыва; бывшие крутопадающие притоки ледника Колка оказались «отрезанными» и лишёнными своих языков (рис. 87). Они потеряли и значительную часть своего питания, так как обвалы, предшествовавшие катастрофе, привели к исчезновению мощных наметённых карнизов и фирново-ледяных



Рис. 87. Отрыв языков ледников – правых притоков Колки при выбросе ледника Фото Севостгеоэко



Рис. 88. Наметенные фирновые поля, питающие притоки Колки, на восточной части гребня Джимарай-Майли, не тронутой обвалами 2002 г. Фото К.П. Рототаева, 1970-е годы

полей на гребне правого борта ледникового цирка. С начала 1970-х годов, когда площадь этих полей с висячими ледниками составляла 1,3 км² (Рототаев и др., 1983), и за последующие 30 лет вплоть до 2002 г. она почти не изменилась (рис. 88).

Однако в настоящее время продолжают процессы метелевого переноса снега с юга и юго-запада, с Майлийского плато и верховьев ледника Суатиси через гребень в цирк ледника Колка. В тыловой части цирка, как и прежде, накапливается лавинный снег — всё это даёт питание бывшим притокам ледника. Из них в наилучших условиях, очевидно, оказались ледники на западном участке гребня, где он полого снижается, и сюда устремляются потоки ветрового переноса снега вдоль южного отрога Джимарайского массива (Чернов, Рототаева, 2010). Уже в 2003 г. наиболее крупный из прежних правых притоков, потерявший надёжную «опору» после схода ледника, как видно на рисунках 89 и 65, первым начал продвигаться вниз. Вероятно, причиной его быстрой реакции было не только поступающее питание, но и сползание масс льда, накопленных в этой боковой мульде на склоне ещё до подвижки.

По наблюдениям в сентябре 2006 г., язык нового активно наступающего ледника выдвинулся по направлению к левой боковой море-



Рис. 89. Начало продвижения бокового ледника в сентябре 2003 г. Фото Г.А. Носенко

не Колки поперёк днища цирка уже далее его середины. Его крутой выпуклый фронт высотой более 20 м был разбит многочисленными трещинами, а поверхность языка засыпана большим количеством каменно-обломочного материала, поступающего со склона (рис. 90).

Под тыловой стеной цирка уже начинал формироваться второй участок накопления льда на ложе, хотя здесь масштаб процесса был значительно меньше по сравнению с выдвиганием правого притока. Источник накопления снега и льда — огромный лавиносбор на склоне горы Джимарай-Хох. Здесь и во времена прошлого существования ледника Колка находился его узкий юго-западный исток с наиболее высокой верхней отметкой — 3850 м, на 400 м выше начала ледника в цирке. Из года в год лавины постоянно сходили по крутым кулуарам, собирая снег со всей скальной стены массива от вершины до подножья, и формировали в верховье ледника мощный многолетний снежно-ледяной конус. Рядом находились ещё два лавинных конуса меньшего размера.



Рис. 90. К 2006 г. новый ледник достиг середины ложа. Фото Б.Р. Мавлюдова

После «ухода» ледника в тыловой части днища под стеной Джимарайского массива осталась небольшая часть льда, заваленного мореной, в виде двух хорошо выраженных «ступеней» (см рис. 65). Сюда же после катастрофы ещё в течение года достаточно интенсивно продолжал поступать материал обвалов горной породы. Эти моренные ступени теперь начинали закрываться новым льдом.

К середине сентября 2009 г. фронт выдвинувшегося ледника окончательно пересёк ложе и достиг подножья левого моренного вала ледника Колка (рис. 91). Поверхность языка заметно выровнялась. Значительная часть льда сместилась в его концевую часть, высота фронта достигала 25–30 м при ширине около 200 м. На крутых его откосах наблюдались частые обрушения, сползания морены, вызванные летним таянием и движением льда.

Второй участок нового льда в тыловой части цирка к этому времени значительно расширился, поверхность его повысилась и представляла собой крупные бугры, засыпанные мореной и разбитые трещинами. Тыловые участки нового льда пока ещё не соединились и формировались отдельно, но процесс заполнения льдом бывшего ложа ледника продолжался.

Одновременно в средней и нижней частях ледникового ложа происходит и другой процесс — таяние остатков донного «мёртвого» льда,



Рис. 91. В сентябре 2009 г. фронт выдвинувшегося ледника у подножья левой морены. На первом плане термокарстовые воронки на поверхности днища. Фото Р.А. Чернова

покрытого обломочным материалом морены. Уже летом 2003 г. на днище начали развиваться термокарстовые процессы. Формированию многочисленных воронок и провалов вдоль обоих бортов ложа способствует сток талых вод. На свободной ото льда поверхности днища не обнаружено ни озёр, ни поверхностного стока. Ручьи, обильно стекающие с правого склона, сразу исчезают в толще морены. Но наиболее крупные термокарстовые воронки образуются ближе к левому борту, где под мореной проходит сток от продвинувшегося фронта молодого ледника. Здесь, судя по глубине провалов, толщина погребённого льда могла достигать 10–15 и более метров (см. рис. 91).

В 2010 и 2011 гг. три участка нового ледника в тыловой части цирка сомкнулись своими краями, образовав на ложе единый ледовый массив, с трёхлопастным краем неравномерной высоты и сложной конфигурации. Левая граница его вплотную примкнула к подножью боковой морены ледника Колка (рис. 92). По результатам



Рис. 92. Массив нового льда в цирке ледника Колка, сентябрь 2011 г. Фото Р.А. Чернова

GPS-съёмки длина всего ледникового массива на днище достигла 1300 м, высота поверхности составляла в среднем 3300 м.

Передовой фронт общего ледового тела принадлежал по-прежнему основному активно наступавшему в прошлые годы леднику, но его продвижение за год было не велико. Поверхность языка на пологом участке днища цирка значительно выровнялась, крупные трещины, наблюдавшиеся ранее, исчезли. Моренный покров полностью закрыл поверхность языка. Фронт высотой до 30–35 м по всему периметру был окаймлён шлейфом осыпающегося моренного материала, чего не наблюдалось в предыдущие годы. Ширина языка составила 300–350 м, нижняя точка ледника находилась на высоте 3100 м.

В 2010 г. была отмечена активизация ещё одного из прежних правых притоков ледника Колка — на расстоянии около 500 м ниже фронта нового ледника (рис. 93) Поверхность его языка в виде плоского конуса заметно повысилась и покрылась трещинами, что ука-



Рис. 93. Признаки активизации ещё одного из прежних правых притоков ледника Колка, 2010 г. Фото А.Я. Муравьева

зывало на перемещение масс льда в сторону днища. Однако в следующие годы процессы активизации ледника не получили развития.

На протяжении следующих лет (2011–2014) объём ледника продолжал нарастать. Ещё один короткий приток достиг средней части нового ледника и принял участие в его формировании. Несмотря на стабильность положения фронта, высота поверхности ледника увеличилась ещё на 15–20 м. В средней части его левый край расширился и надвинулся на подножье моренного вала ледника Колка, поднявшись на 25–30 м. На снимке с борта вертолёта, выполненном в июле 2014 г., хорошо видны асимметричный характер питания ледника и его основные источники – три боковых притока и лавинные конусы в тыловой части под стеной Джимарай-Хох (рис. 94). Но в целом можно видеть, что в цирке уже лежит настоящий ледник (рис. 95).

Структура поверхности ледового массива свидетельствует о неравномерном характере накопления льда и изменениях границ ледника за прошедшие 12 лет после катастрофы. В первые четыре года доминировало выдвигание правого притока Колки, начавшего наступать первым уже в 2003 г. Затем основные изменения происходили в тыловой зоне цирка, где продолжалось накопление льда, особенно активно под лавиносбором массива Джимарай-Хох. Первый

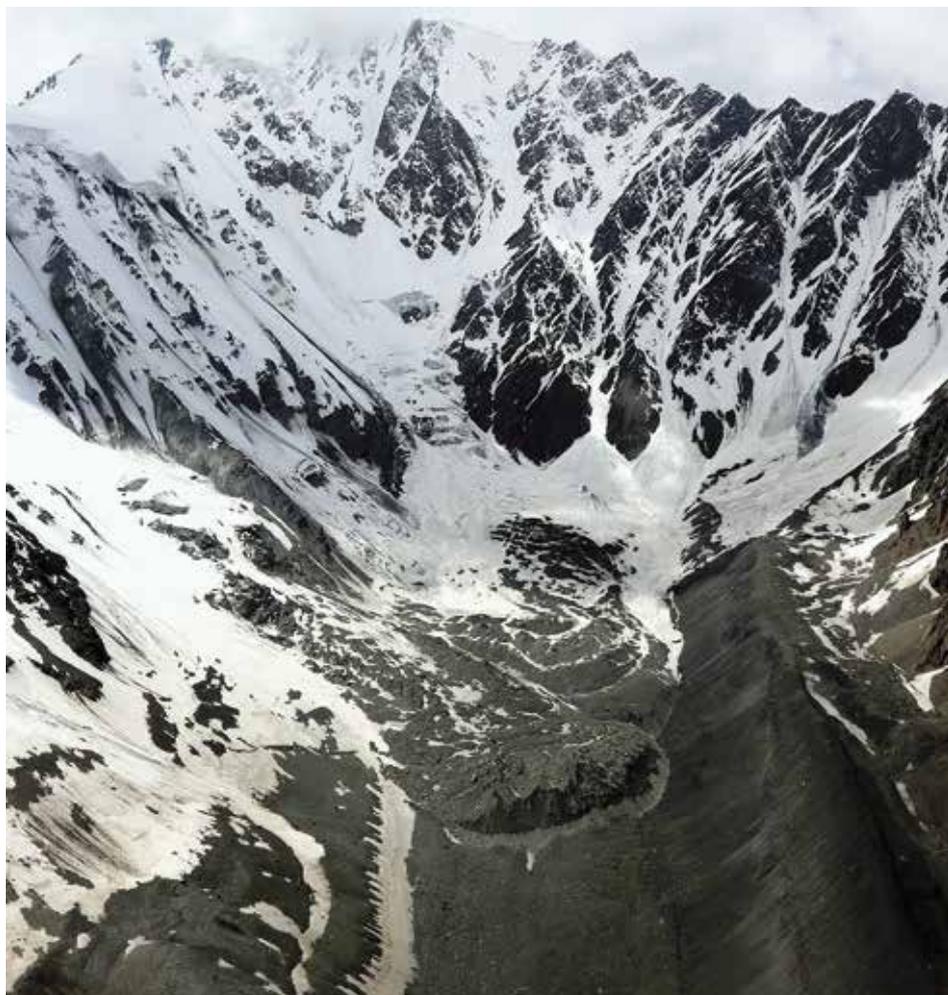


Рис. 94. Асимметричный характер питания нового ледникового массива. Слияние трёх потоков. Фото с вертолёта Г.А. Носенко

приток, перегородивший ложе, и сам стал некоторым препятствием для ледовых масс, поступающих из расположенной выше области питания. Между ним и левой мореной ледника Колка лёд боковых притоков заполнял ложе ледника, увеличивая в основном высоту его поверхности. За последние четыре года ледник почти не изменил площадь, но продолжал увеличиваться в объёме.

Положения границ с 2006 по 2014 г. были восстановлены по данным наземных GPS-съёмок и космическим снимкам разных лет (рис. 96). Если считать неизменной верхнюю границу ледника на



Рис. 95. За десять лет в пустом цирке сформировался настоящий ледник длиной 1,3 км. Фото Р.А. Чернова

правом борту его цирка, то площадь ледника изменялась следующим образом:

Годы	Площадь ледника, км ²
2006	0,43
2009	0,77
2010	1,01
2012	1,03
2014	1,07

Эти цифры дают количественную характеристику динамики заполнения льдом освободившегося ложа, из которой следует, что к 2010 г. скорость изменения площади уменьшилась и последние четыре года она остаётся практически постоянной – примерно 0,015 км²/год.

Оценить толщину вновь образующегося ледника позволили результаты наземной радиолокационной съёмки, выполненной экспедицией Института географии РАН в июне 2014 г. Большое количество крупнообломочного материала затрудняло передвижение по поверхности ледника при проведении съёмки и ухудшало качество радиосиг-

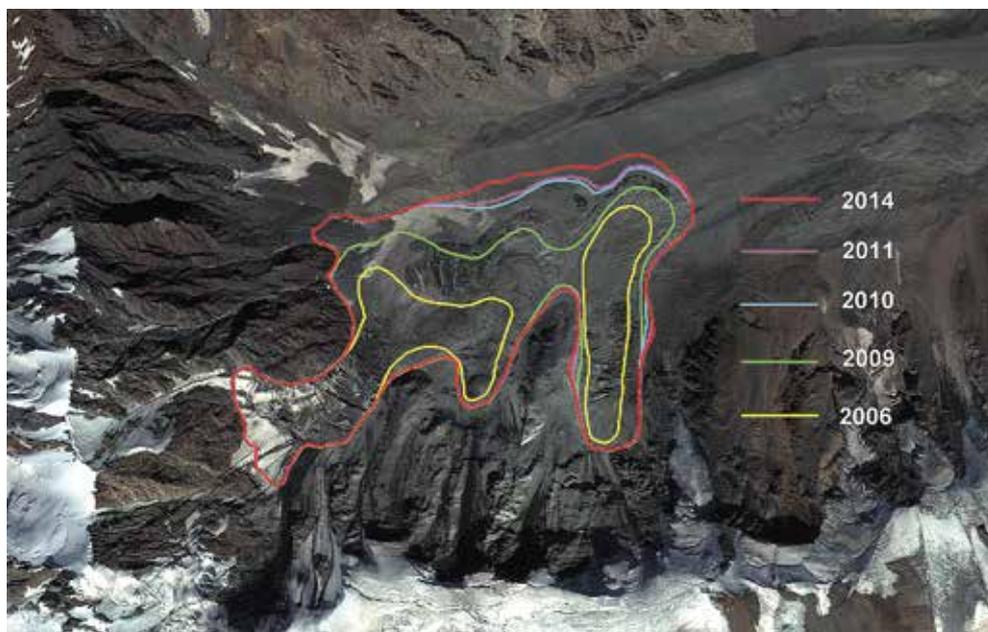


Рис. 96. Изменение границ нового ледника в цирке ледника Колка за годы наблюдений с 2006 по 2014 г.

нала, увеличивая рассеяние. Тем не менее, для ключевых участков, к которым относятся сам возрождающийся ледник, не заполненная ещё льдом часть ложа бывшего ледника и так называемый «ригель» на выходе из цирка, была получена информация о наличии и толщине слоя льда. Маршруты съёмки и её результаты показаны на рис. 97.

На месте ледового вала, условно названного прежде «ригелем», образовавшегося после схода ледника на выходе из цирка и служившего подпором озеру, сохранились ещё значительные остатки льда. Уже в 2006 г. эта гряда понизилась в центральной части на 10 м по сравнению с 2003 г., но у её краёв сохранялись крупные останцы льда, прикрытые мореной. В дальнейшем поверхность ледово-каменной гряды на более пологих участках покрылась слоем вытаявших обломков толщиной порядка 1 м. Результаты радиолокации 2014 г. показали, что льда в ледово-каменной плотине всё ещё много, и толщина его в отдельных местах достигает 20–40 м. В части, обращённой вниз по долине, местами были видны обнажения льда и продолжались термокарстовые процессы.

Днище цирка выше «ригеля» в 2003 г. представляло собой относительно ровную поверхность, покрытую обломочным материалом



Рис. 97. Маршруты радиолокационной съёмки 2014 г. Оттенками синего цвета показаны изменения толщины льда на маршруте

и «муравьиными кучами», которые были хорошо видны и в последующие годы. Вероятно, под донной мореной сохранялись остатки льда, так как в первые несколько лет наблюдений здесь были хорошо выражены типичные термокарстовые явления в виде воронок и значительных просадок поверхности. Однако в последние годы поверхность этого участка днища выровнялась и остаётся сейчас практически неизменной. Маршрутами радиолокации в июле 2014 г. обнаружить лёд здесь не удалось. По-видимому, если он ещё и присутствует, то фрагментарно, в виде отдельных небольших линз, сохранившихся под большим слоем морены (см. рис. 97).

Измерения, выполненные на языке возрождающегося в цирке ледника, показали, что в краевых частях у бортов долины толщина льда составляет 10–20 м, а в центральной зоне достигает 50 м. Проведение измерений по всей площади ледника было ограничено соображениями безопасности из-за частых камнепадов со склона. Если на основании полученных данных предположить, что средняя толщина нового ледника составляет как минимум порядка 20 м, то к 2014 г. объём на-

копленного льда оказался не менее $0,0214 \text{ км}^3$, или при самой низкой оценке порядка 16,3% общего объёма ледника Колка, измеренного в 1988 г., через 19 лет после подвижки 1969 года (Никитин и др., 2005).

В настоящее время из-за асимметрии питания движение масс льда происходит в основном в поперечном направлении по отношению к оси долины и ограничено левой боковой мореной. Язык ледника реагирует на увеличение давления от поступающего сверху льда появлением радиальных трещин и пока незначительным, ощутимым лишь с помощью GPS-съёмки, перемещением вниз по оси долины, до нескольких метров в год.

В целом языки ледников могут разрастаться лишь до тех пор, пока не будет достигнуто балансовое равновесие. Как мы видим, наступавший первым боковой ледник, конец которого служит фронтом нового ледника в цирке, после 2010 г. практически прекратил своё продвижение. Вероятно, этот ледник в отдельности уже приблизился к своему современному равновесию. В 2014 г. его фронтальная часть имела вид ледяного обрыва крутизной до 70° . Высота фронта достигала 40 м, ширина – около 350 м (рис. 98 и 99). Однако в тыловой части цирка постоянно продолжается накопление ледовых масс, что в дальнейшем может привести к более активному продвижению общего фронта.

Интенсивность и характер этого процесса будут зависеть от соотношения условий питания и расхода вещества ледника.

Условия накопления и таяния нового льда. Прежний ледник Колка питался за счёт метелевого переноса снега, лавин и обвалов фирна и льда с правого склона.

По нашим наблюдениям в первые годы после катастрофы, уже в конце июня на пустом днище цирка стаивал весь зимний снег, не оставались даже крупные снежники и лавинные конусы. Таким образом, не следует ожидать здесь накопления фирна как источника питания нового ледника. Впрочем, так было и в прошлом: в прежние годы твёрдые осадки, выпадавшие непосредственно на поверхность ледника Колка, давали ничтожный вклад в аккумуляцию – не более 15% (Рототаев и др. 1983).

В настоящее время питание нового массива льда зависит почти исключительно от количества лавинного снега. В тыловой его части левее главного лавиносбора на склоне горы Джимарай-Хох восстановились ещё два крупных лавинных конуса, а в 2010 г. сформировалась полоса фирнового поля, которое питается лавинным снегом (рис. 100). Ширина полосы от нескольких десятков метров в пра-



Рис. 98. Фронт ледника в июле 2014 г. Фото С.А. Никитина



Рис. 99. У подножья фронта ледника Колка, сентябрь 2014 г. На заднем плане склон левой морены Колки

вой части поля до 400–500 м в левой, ближе к моренной гряде. Поверхность фирна в конце периода таяния всегда бывает усыпана обломками камней и щебнем, что подтверждает большую лавинную и



Рис. 100. Новый ледник имеет небольшую фирновую область. Фото Р.А. Чернова, 2011 г.

обвальную активность в этой части цирка ледника Колка. Осенью 2012 г. на фирновом поле наблюдалось множество крупных камней, образовавших «ледниковые грибы» высотой до 60–80 см, что косвенно указывает на величину летнего таяния.

В июле 2014 г., после обильных весенних снегопадов следы деятельности лавин сохранились по всему периметру тыловой части цирка (рис. 101). Лавинные отложения достигали двухметровой толщины.

В бассейне бывшего ледника Колка значительных изменений в количестве льда, занимающего «верхние этажи» цирка, пока не обнаружено, хотя уже заметно образование новых снежных карнизов. В настоящее время начали восстанавливаться всяческие фирновые поля у гребня, и обвалы льда продолжают. Ещё больше сократилось ледовое покрытие стены Джимарай-Хох (рис. 102). Нижняя граница его после обвалов в 2002 году была ровной, всяческое поле было «обрезано» вдоль косой тектонической трещины. В последние годы край льда стал неровным и заметно отодвинулся вверх по склону.



Рис. 101. В июне 2014 г. в тыловой части цирка ледника Колка осталось особенно много лавинного снега. Фото Р.А. Чернова

Во время маршрутов в осенние месяцы 2009–2014 гг. ни одного ледового обвала со стены горы Джимарай-Хох или с правого гребня не произошло, но падение камней наблюдалось практически всегда.

Дальнейшее развитие процессов восстановления ледника существенно зависит от процессов таяния. Внезапное освобождение цирка от ледника в сентябре 2002 г. вызвало резкое изменение температурных условий таяния. Исчезло охлаждающее влияние ледника, располагавшегося на дне и склонах цирка, открылась огромная пустая чаша, покрытая тёмным обломочным материалом. Общее снижение высотного уровня поверхности на 50–100 м до прежнего ложа ледника Колка, нагрев открытого пространства морены и скал, значительное уменьшение суммарного альбедо и, следовательно, общее изменение теплового баланса в цирке ледника Колка способствует усилению таяния снега и льда на бывшем ледниковом ложе. Над левым краем нового формирующегося ледника поднимается на 50–100 м крутой склон чёрной боковой морены, обращённый на юг, что создаёт дополнительный нагрев приледникового воздуха.

С другой стороны, таянию поверхности нового ледника препятствует неизбежное увеличение толщины моренного чехла на его по-



Рис. 102. Край ледового покрытия стены Джимарай-Хох в сентябре 2002 г. (а) и в сентябре 2011 г. (б). Хорошо видны изменения, произошедшие за девять лет

верхности. После исчезновения в результате катастрофы большей части висячих ледников, с оголившейся стены правого борта поступает значительно больше обломков горной породы, чем прежде.

Для контроля температуры подстилающей поверхности в сентябре 2009 г. ниже фронта нового ледника (на высоте 3090 м) и на бровке левой боковой морены (на такой же высоте) были установлены автоматические термометрические датчики. Они помещались на горизонтальных участках среди камней и были защищены от прямой солнечной радиации. Запись температуры продолжалась в течение всего года, а также с перерывами на протяжении последующих лет. С осени 2011 г. датчики были укреплены на высоте 2 м над подстилающей поверхностью, так что их показания в 2011 и 2012 гг. давали температуру приземного слоя воздуха.

По данным измерений на поверхности ложа, в 2009/10 г. самый холодный период с минимальными значениями средней суточной температуры до $-13,0^{\circ}\text{C}$ на днище наблюдался с конца ноября до середины декабря, в дальнейшем температура возрастала; снег полностью растаял в первых числах июня (рис. 103). Период отрицательных температур продолжался 252 дня при среднем значении $-4,5^{\circ}\text{C}$. Средняя летняя температура в 2010 г. составила 12°C , а дневные температуры неоднократно понимались до $20-23^{\circ}\text{C}$. Конечно, в этом случае надо учитывать рекордно высокие температуры воздуха именно летом 2010 г. и на всей Европейской части России, и в высокогорье Кавказа (по данным метеостанции Терскол средняя температура каждого летнего месяца с июня по сентябрь превышала норму за полувековой период на 2°C). Это отразилось и на величине средней годовой температуры на ложе, которая составляла $-0,7^{\circ}\text{C}$, а в 2011/12 г. была на 1 градус ниже.

Измерения на гребне боковой морены, в отличие от ложа, показывают положительную среднюю годовую температуру. В 2011/12 г. она составила $1,0^{\circ}\text{C}$, тогда как на ложе была равна $-1,7^{\circ}\text{C}$. (рис. 104). Средняя температура в зимний период здесь выше, чем на ложе, на 3–4, и снежный покров на морене сходит весной на 1,5 месяца раньше, чем на днище. На графиках непрерывной записи термодатчиков обоих лет видно, что температура воздуха над ложем и мореной больше всего различается в конце осени и зимой. Летом различия более заметны для ночных минимумов температуры, на ложе в июне они опускались до нуля, когда выпадал снег и не ставил за день. Но дневные максимумы летом сближаются, а нередко они на ложе даже выше.

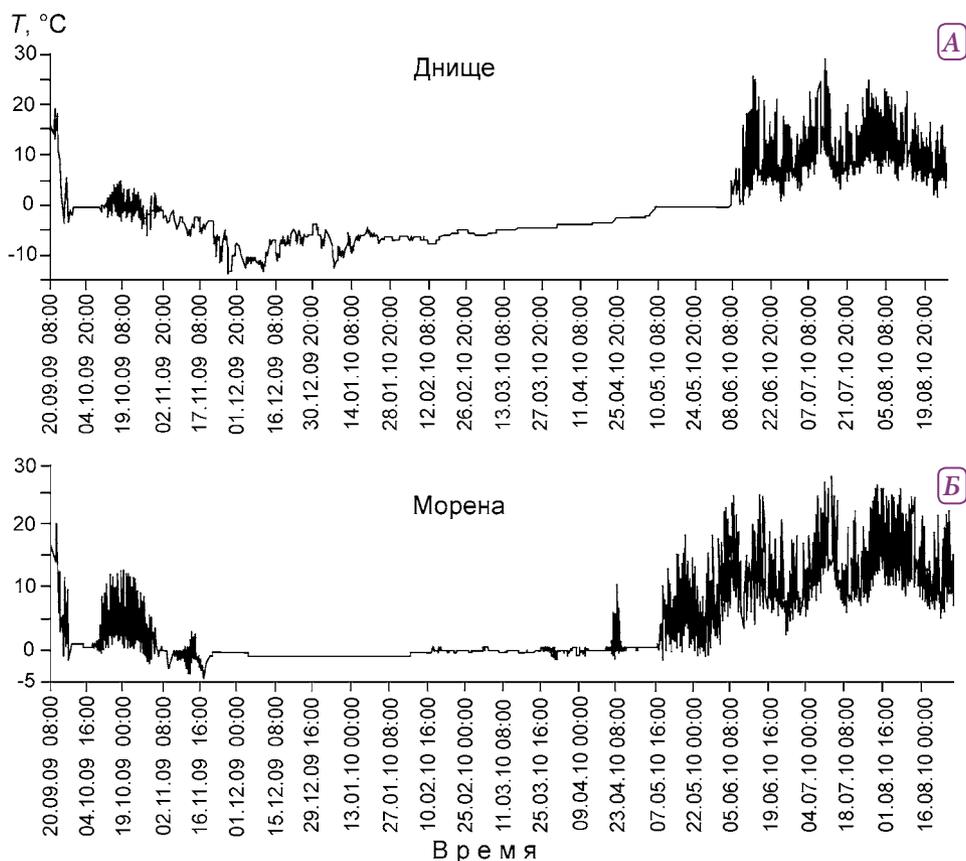


Рис. 103. Ход температуры воздуха по записи термодатчиков в 2009–2010 гг.: А – на днище цирка близ конца ледника, 3100 м; Б – на морене, 3135 м

В целом ложе ледника выхолаживается зимой и в среднем за год значительно больше, а летом днище и морена прогреваются сильно и относительно более равномерно.

Сток талых вод. Заметных ручьёв и других признаков таяния на поверхности нового массива льда в цирке осенью не было видно. Талые воды, очевидно, просачиваются в толщу ледника через трещины. Но весной, в июне 2014 г. в понижениях поверхности центральной части ледника мы обнаружили несколько озёр, самое большое протяжённостью около 60 м (рис. 105). Скорее всего, эти озёра временные, они возникают в результате таяния сезонного снега, и вода из них постепенно находит путь к днищу ледника.

Несмотря на очевидно большое количество воды, поступающей на ледник со склонов и образующейся в результате его таяния, по-

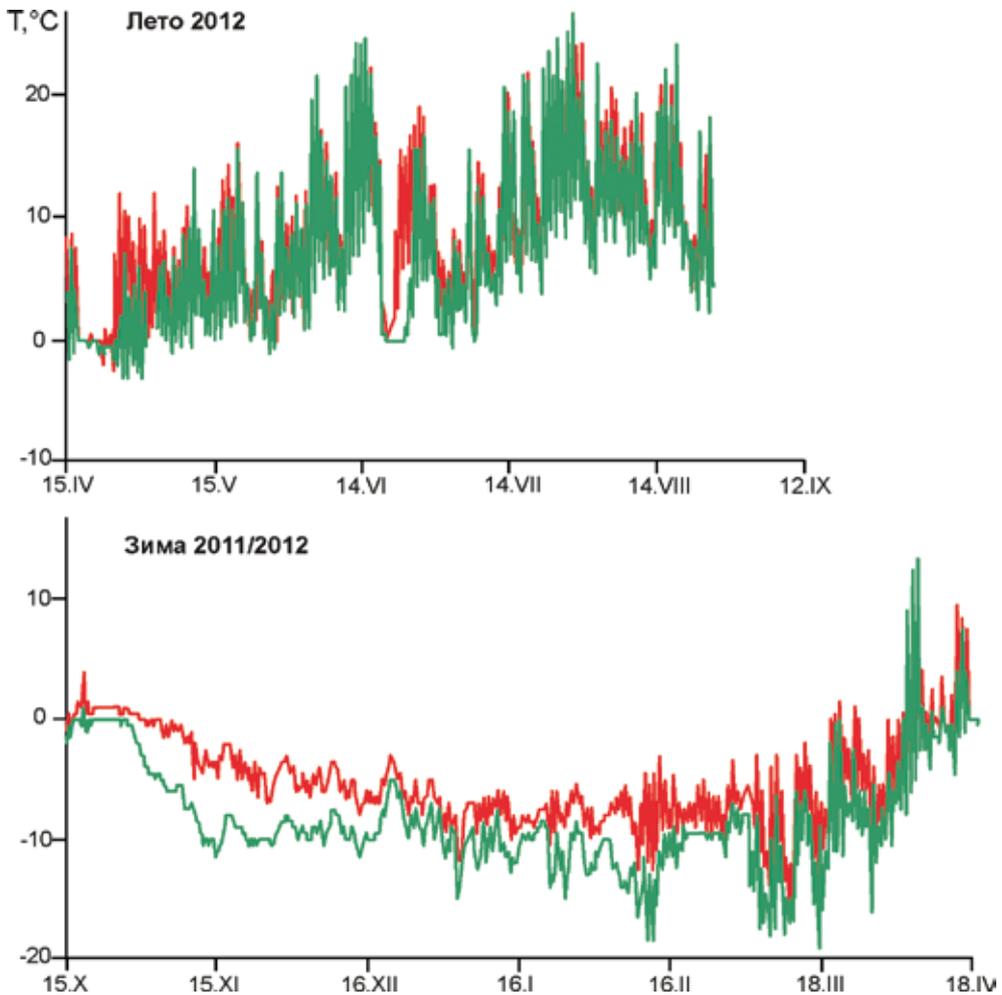


Рис. 104. Зимние и летние температуры воздуха в 2011/12 г. на днище цирка (зеленные линии) и морене (красные линии)

верхностная дренажная сеть на днище цирка между языком ледника и «ригелем» до настоящего времени не сформировалась. Единственный водоток, берущий начало из остатков льда одного из притоков на склоне, образовался ещё в 2003 г. и с тех пор его положение не меняется. Русло этого водотока идёт под правым бортом и через 350–400 м уходит в воронку (рис. 106).

Таким образом, остаётся предположить, что основной сток талой воды идёт через внутреннюю дренажную сеть в толще морены, покрывающей днище. Выход воды из цирка на поверхность в виде не-



Рис. 105. Одно из временных озёр на поверхности центральной части ледника в июне 2014 г.



Рис. 106. Воронка на месте ухода основного поверхностного водотока на днище цирка под морену в 2014 г. Фото Г.А. Носенко

скольких потоков происходит уже ниже «ригеля», на расстоянии около 500 м от него. Перестройка дренажной системы на ложе приводит к миграции истоков р. Колка и перераспределению расхода воды в них. Наблюдавшийся в 2009–2011 гг. мощный правый поток

к 2014 г. иссяк почти полностью, его расход уменьшился до $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$. Основной выход воды в настоящее время формируется ближе к левому борту долины, расход воды в здешнем ручье около $0,5\text{--}1 \text{ м}^3/\text{с}$.

На днище цирка поверхность в последние годы подверглась некоторому выравниванию; развитие термокарстовых процессов продолжается менее активно, чем в первые годы после катастрофы, дренаж через морену идёт свободно. Основные крупные формы термокарста, которые сформировались и быстро развивались в первые годы после схода ледника, пришли в состояние стабилизации. Наиболее заметные воронки и провалы у правого и левого краёв днища визуально не изменились с 2009 г. Более интенсивно термокарстовые процессы идут в районе «ригеля», что заметно по изменению крупных форм — валов, пирамид, провалов. Обнажения льда на крутых участках рельефа ригеля фиксируются из года в год.

Вулканические проявления после катастрофы

При наблюдениях в цирке ледника Колка каждый раз особенно привлекает внимание активность камнепадов в тыловой его части. Во все годы нашего посещения этих мест не прекращались частые обвалы камней и льда на соединении правого гребня с массивом Джимарай-Хох. Постоянно видны на заснеженных стенах горы Джимарай-Хох и под ледовыми обрывами правого гребня локальные участки, где зарождаются и камнепады, и чёрные полосы потёков талой воды и мелкозёма. Важно отметить, что эти локальные участки таяния вот уже в течение 12 лет наблюдаются на тех же местах, что и выходы фумарол в сентябре 2002 г. Можно сравнить, например, рисунки 73 (2002 г.), 65 (2003 г.), 90 (2006 г.) и 107 (2010 г.). Те же фумаролы чётко проявлялись и до катастрофы (см. рис. 78).

Для выявления тепловых аномалий на поверхности стены, которые могли бы объяснить происхождение талой воды, в 2014 г. совместно с Институтом физики атмосферы РАН была выполнена инфракрасная съёмка в ближнем ($0,78\text{--}1,2 \text{ мкм}$) и дальнем ($8\text{--}12 \text{ мкм}$) ИК-диапазонах с помощью двух камер Xeva FPA бельгийского производства Xenics.

Полученные снимки показали сложную тепловую картину на скально-ледовом склоне, обусловленную потёками воды и перераспределением мелкозёма (рис. 108). Структура этих потоков, благодаря достаточно высокому тепловому контрасту с окружающей поверхностью, отчётливо читается на снимках в ближнем ИК-диа-



Рис. 107. Локальные участки таяния наблюдаются в разные годы на тех же местах, что и выходы фумарол в сентябре 2002 г. Сентябрь 2010 г. Фото Р.А. Чернова

пазоне. На изображении того же участка стены в дальнем ИК-диапазоне, в котором должно преобладать собственное тепловое излучение поверхности, картина не столь однозначна из-за более низкого пространственного разрешения аппаратуры и сложного рельефа, создающего интерференционные эффекты. Тем не менее, полученные снимки свидетельствуют о наличии тепловых аномалий на этом участке стены.

На снимках экспедиции Института географии РАН с борта вертолёта в июле 2014 г. (рис. 109) хорошо видно, что самые высокие выходы потёков воды на гребне расположены вдоль одной линии и приурочены к границе между фирново-ледяными пластами верхнего плато и коренными породами гребня. Можно предположить, что фумарольные выходы находятся на краю самого Майлийского плато, и образование воды происходит здесь под толщей фирна и льда, а на стене мы наблюдаем уже её выход на поверхность.

В июне 2014 г. в цирке ледника Колка были отобраны для химического анализа образцы лавинного снега и ледникового льда в тыловой части нового ледника, талых вод из двух временных озёр на его поверхности, из ручьёв — на скалах горы Джимарай-Хох, на поверхности ледника с мореной, у фронта ледника, под склоном и под

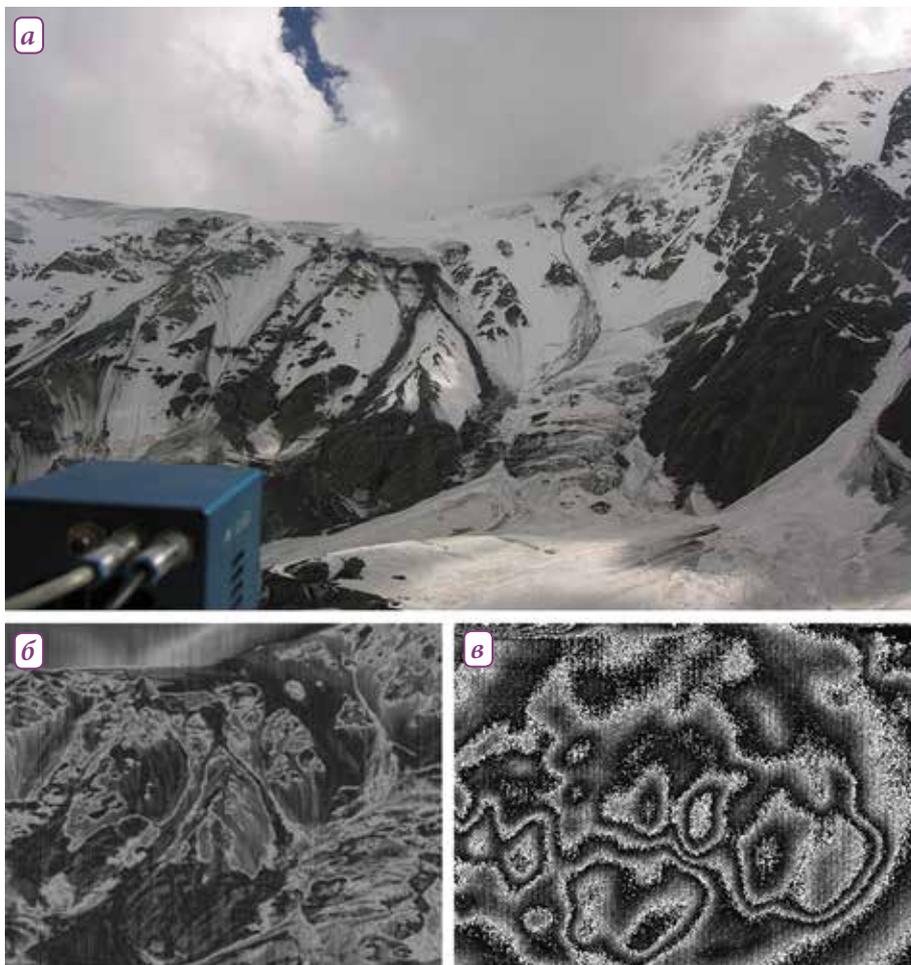


Рис. 108. Съёмка тепловых проявлений на склонах Джимарай-Хох: *а* – участок съёмки в оптическом диапазоне; *б* – тот же участок в ближнем ИК-диапазоне (0,78–1,2 мкм); *в* – в дальнем ИК-диапазоне (8–12 мкм)

грядой «ригеля». Взяты также пробы воды на Верхнее-Кармадонских источниках.

Отобранные образцы воды были доставлены в Москву. Анализ химических примесей в воде по 63 элементам был выполнен в лаборатории отдела минералогии, изотопной геохимии и геоэкологии Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов. Определение проводилось с использованием метода ICP MS – масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

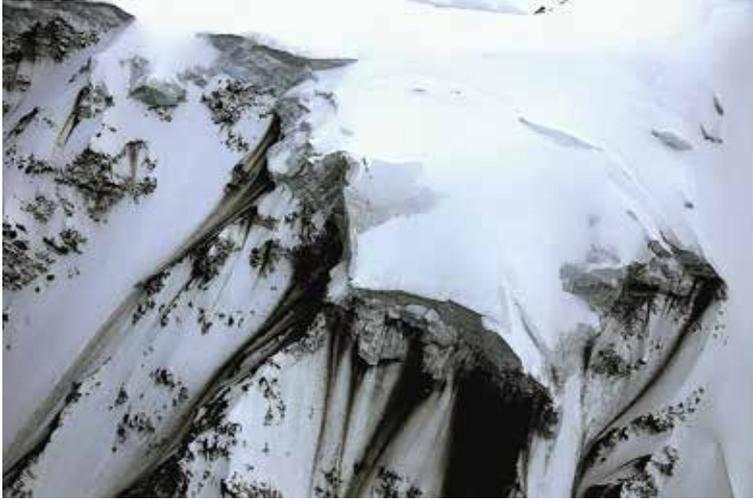


Рис. 109. Потёки воды и мелкозема, отмечающие выходы фумарол под обрывами фирновых толщ на гребне Майли-Джимарай-Хох на высоте 4000 м. Фото И.И. Лаврентьева с борта вертолёта, июнь 2014 г.

Анализ пространственной изменчивости загрязнения снега и льда показал закономерное увеличение по большинству элементов от снега и фирна лавинного конуса к ледниковому льду и талой воде в озёрах на леднике, в которой оказалось наибольшее содержание элементов и по их числу, и по количеству каждого элемента в мг/л.

Аналогичное пространственное распределение примесей, правда, по меньшему количеству элементов, было получено и Я.Д. Муравьёвым (2004) при анализе образцов, отобранных нами летом 2003 г. в цирке ледника Колка. Сравнение по тому же набору элементов (Na, K, Ca, Mg) в снегу, ледниковом льду и в озёрах на леднике показало, что в настоящее время по сравнению с 2003 г. содержание этих элементов незначительно увеличилось.

Образцы были взяты в конце июня 2014 г., когда завершалась многоснежная весна и тыловая зона цирка была больше обычного закрыта снегом. Очевидно, что пробы, взятые в другое время, при открытых от снега склонах, показали бы ещё большее содержание примесей. В летние сезоны с активным таянием полосы чёрных потёков растекаются шире, в нижней части склона на скалах превращаясь в грязевые ручейки и микросели. В 2012 г. в конце лета у истока нового ледника сформировался даже крупный конус селевых выносов из основной зоны активного проявления таяния вдоль косой трещины на стене горы Джимарай-Хох (рис. 110).



Рис. 110. Конус селевых выносов из зоны активного проявления таяния на стене Джимарай-Хох, сентябрь 2012 г. Фото Р.А. Чернова

Аналогичные фумарольные выходы были обнаружены гляциологами Института географии РАН на другом вулканическом массиве Кавказа — на Восточной вершине Эльбруса на высоте 5600 м. Там температура открытой поверхности фумарольной площадки составляет около $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на глубине 20 см она возрастает до $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако атмосферные условия на вершине Эльбруса более жёсткие и происходящие там процессы таяния не приводят к образованию воды из-за интенсивного испарения при отрицательных температурах воздуха. Хотя в то же время тепла и влаги хватает на поддержание жизни мха и лишайников на её поверхности (рис. 111).

При таком постоянстве тепловых проявлений в цирке ледника Колка, связанных с фумаролами, очевидно, что вулканогенные процессы, в значительной степени ответственные за Кармадонскую катастрофу, не прекратились и после неё. Подтверждения этому появляются и на других ледниках Казбек-Джимарайского района.

Р.А. Тавасиев (2014) сообщает о частичном обвале двух весячих ледников на леднике Зариу (северный склон горы Шау-Хох), который произошёл в 2003–2004 гг. После этого, в марте 2006 г. здесь были видны такие же чёрные потёки талой воды от скал вниз по ледниковому склону, как и на Колке. Они увеличились в августе и замёрзли в сентябре, но чётко видны и до сих пор.



Рис. 111. Фумарольная площадка на Восточной вершине Эльбруса на высоте 5600 м, сентябрь 2010 г. Фото Г.А. Носенко

В той же работе Р.А. Тавасиева на основе анализа аэрофотоснимков приводятся данные о том, что в августе–сентябре 2002 г. на Майлийском плато над правым бортом ледника Колка, на ледоразделе Майли–Суатиси, на высоте 3900 м, было обнаружено покрытое льдом озеро длиной 32 м. Оно увеличилось до 80 м летом 2004 г., а в августе 2009 г. имело длину около 300 м и было подо льдом лишь наполовину. Возможно, в его образовании играло роль глубинное тепло. Автор приводит сведения ещё о двух озёрах, появившихся в областях питания ледников в бассейне Мидаграбина, о селевом потоке, вы-

рвавшемся из-под льда на ледопаде Майли в июле 2010 г., предполагая «эндогенный прогрев» в отдельных частях Казбекского окружения. Однако необходимо также учитывать особенно резкое усиление таяния ледников в последнее десятилетие на всём Кавказе (особенно катастрофическое таяние 2010 г.), охватившее и верхние зоны ледников. Оно привело и к образованию озёр и вытаиванию коренных гряд на фирновых склонах, чему есть множество примеров.

Но последним ярким примером проявления именно вулканической активности стал обвал на Девдоракском леднике, о котором будет сказано ниже.

Состояние фронта ледника Майли

Как уже было сказано, ледник Майли был косвенным участником произошедшей в 2002 г. катастрофы, сохранив на своей поверхности следы водного потока, несущего лёд и камни, перехлестнувшего из цирка ледника Колка через моренный вал, разделяющий оба этих ледника. Поток прошёл по поверхности языка Майли ниже ледопада и до его конца, сохранив при этом её структуру и целостность (рис. 112).

Ледник Майли — один из крупнейших на Кавказе, его площадь составляет почти 7 км², а перепад высот ледника превышает 2200 м (рис. 113) Ледник берет начало с Майлийского плато на высотах свыше 4000 м (рис. 114) и спускается на северо-запад в сторону долины Геналдона.

Центральная часть ледника Майли наиболее крутая, здесь он сильно разбит трещинами, образуя мощный ледопад (рис. 115). Ниже ледопада на высотах около 3000 м ледник поворачивает на северо-восток, и его поверхность выполаживается. Средние уклоны поверхности в этой части ледника составляют 15–20%. Широкий и длинный язык ледника Майли ближе к концу сужается и зажат между валами боковых морен, за левым валом Майли течёт в глубоком ущелье с крутыми обрывистыми склонами р. Колка. Фронт ледника в левой части наползает на широкий моренный вал, деформируя его поверхность. Справа конец языка спускается ниже и прижат к правой морене, здесь ледник оканчивается гротом, из которого вытекает р. Майли. Вскоре она сливается с Колкой и образует реку Геналдон.

Наблюдения за ледником Майли начаты очень давно. Г.С. Хатисян, будучи постоянным участником комиссий, созданных в 1862–1864 гг. для изучения обвалов Девдоракского ледника, за 25 лет исследований посетил все ледники Казбекского района и устано-



Рис. 112. След потока воды из цирка ледника Колка на льду ледника Майли. Фото НИЛ Геологоразведчик, 24 сентября 2002 г.

вил повсеместное их отступление. В частности, о леднике Майли он писал, что в 1887 г. Тменькавский ледник отступил на «17 сажен от горячего серно-щелочного источника, бьющего у самого ледникового устья, тогда как в прошлом году источник этот отстоял от конца ледника всего только на 5 сажен, а в 1882 году находился как раз под конечным сводом этого ледника». Иногда конец ледника был «настолько выдвинут вперёд, что источник оставался под ледником, и действием его теплоты образовался во льду... колодец, выпускавший горячие пары» (Хатисян, 1888, с. 343).

В 1889 г. А.В. Пастухов видел конец ледника Майли всего в 30 м от источников (см. рис. 14). На фотографии М.П. Преображенской 1901 года (рис. 116) также видно, что ледник находится совсем рядом с ними (Преображенская, 1904). Сравнение фотографий ледника Майли, сделанных со стороны Верхнекармадонских источни-



Рис. 113. Ледник Майли в октябре 2002 г.

ков в 1901 и 2014 гг. (рисунки 116 и 117), наглядно демонстрирует изменения конца ледника за прошедший вековой период.

Перед подвижкой 1969 г. ледник Майли оканчивался на высоте 2360 м (Рототаев и др., 1983), т.е. за 80 лет он отступил более чем на 600 м. Перед событиями 2002 года по данным космических съёмок высота его конца составляла уже 2430 м. В 2003 г. в маршруте после схода ледника Колка язык Майли не преграждал путь по моренно-



Рис. 114. Область питания ледника Майли. Вершины Казбека, Майли-Хох и Майлийское плато. Фото Г.А. Носенко с вертолѐта, 2003 г.

му валу, хотя поверхность ледника поднималась почти вровень с его гребнем. Это был наиболее доступный вариант подъѐма в цирк ледника Колка, которым пользовались исследователи (рис. 118).

В последующие три года поверхность ледника повышалась, и его левый край надвигался на моренный вал. С этой стороны язык ледника имеет крутой фронт, ледяные откосы высотой от 20 до 80 м преграждают путь наверх. От морены на правом борту ледника до левого моренного вала фронт ледника протягивается примерно на 0,5 км, при этом его левая сторона поднимается на 150 м выше правой.

В 2009 г. ледник ещё продвинулся влево, над ущельем ручья Колка нависли ледяные обрывы. В 2010–2011 гг. здесь продолжали нависать крутые откосы майлийского льда высотой около 20 м, покрытые сползающим мокрым моренным материалом, в ущелье Колки текли ручьи и падали камни (рис. 119). В то же время нижняя часть фронта ледника, на месте грота с выходом реки отступила на десяток метров по сравнению с 2003 г. На это указывал небольшой



Рис. 115. Ледопад Майли. Фото О.В. Рототаевой, 1970-е годы

каменный валик высотой не более двух метров, протянувшийся у подножия фронта. В центральной части на поверхности языка под действием талой воды формировался каньон, прорезывающий тело ледника до ложа.

В 2012 г. язык ледника снова показал признаки активизации. В предыдущие годы левый край фронта поднимался над ущельем Колки всего на 20 м, а в 2012 г. уже возвышался на 30–40 м (рис. 120). В 2014 г. фронт ледника выглядел ещё более неприступным — в его центральной части высота ледяных обрывов достигала 50–60 м и для прохождения здесь требовалось использование аль-



Рис. 116. Конец ледника Майли, вид от источников Верхнего Кармадона в 1901 г. Фото М.П. Преображенской



Рис. 117. Конец ледника Майли в 2014 г. Фото С.А. Никитина, с той же точки съёмки



Рис. 118. Левая часть фронта ледника Майли в 2003 г. Фото Р.А. Чернова



Рис. 119. В 2009–2011 гг. над ущельем ручья Колка нависали обрывы майлийского льда. Фото Р.А. Чернова, 2010 г.



Рис. 120. Высота левого края фронта ледника Майли над ущельем Колки в 2012 г. достигла 30–40 метров. Фото Р.А. Чернова

пинистской техники (рис. 121). На левом краю рельеф поверхности стал более расчленённым, здесь развиваются многочисленные трещины и провалы. В то же время небольшой каменный вал, сформированный ранее у подножия фронта, сохранился, что говорит об отсутствии продвижения ледника за последние 2–3 года.

Несмотря на видимые проявления активности, говорить о готовящемся наступлении ледника Майли пока нет оснований. Возможно, что повышение его поверхности и изменения конфигурации фронтальной части в последние годы связаны с периодически происходящим перераспределением массы внутри ледникового тела. На обширных фирновых полях Казбека, в диапазоне высот от 4000 до 5000 м концентрируются огромные массы снега. Язык отделён от фирновой области ледопадом, превышающим 1000 м. Массы фирна и льда постоянно продавливаются через ледопад к языку. Резкий поворот долины ледника ниже ледопада (практически на 90°) играет подпруживающую роль, что обеспечивает накопление массы льда до определённого предела и затем её перераспределение вниз по языку с более высокой скоростью. Как показывают наблюдения на других

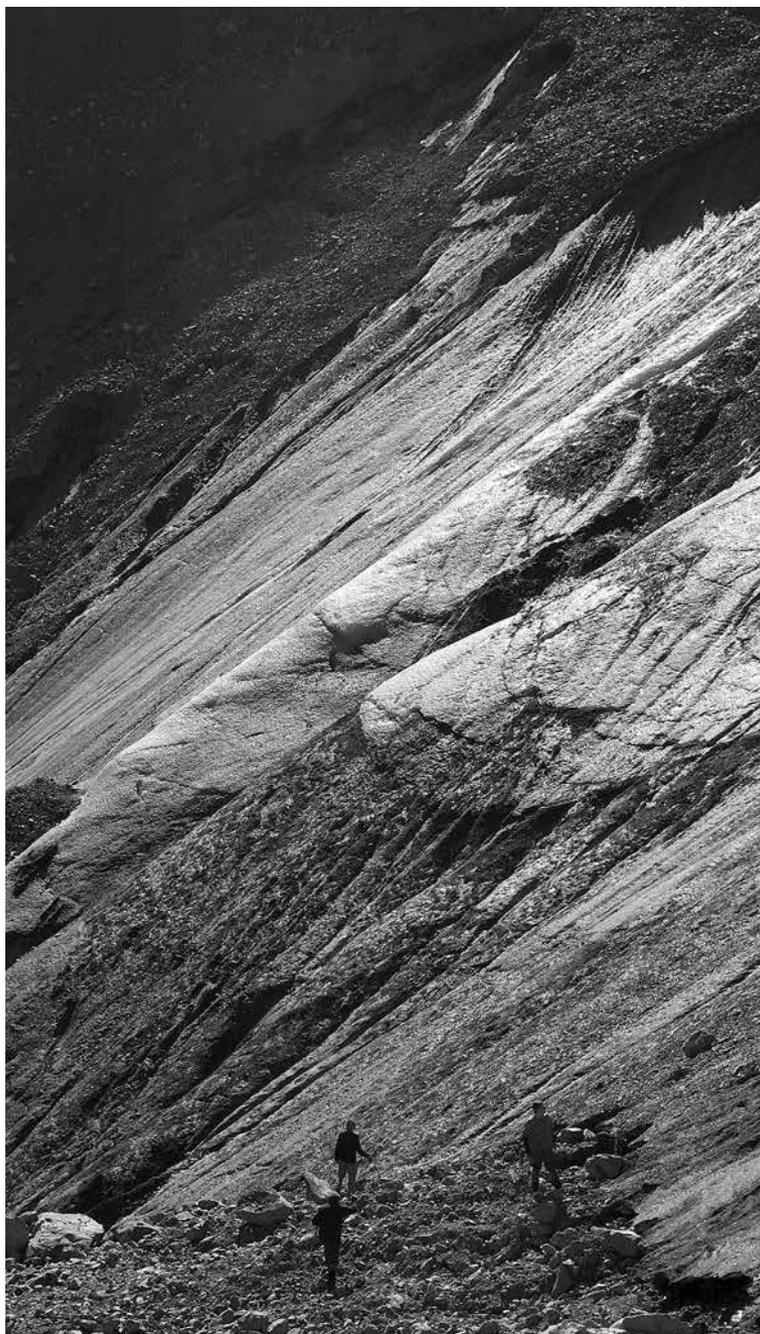


Рис. 121. Крутые ледяные откосы у подножия языка Майли, 2014 г. Фото Г.А. Носенко

ледниках, имеющих аналогичное строение (ледник Кюкюртлю на Эльбрусе), этот механизм работает и в условиях отрицательного баланса массы, но обычно не приводит к резким продвижениям концов. Возможно, интенсивность процесса в современных условиях невелика, и динамическая волна уже угасает, дойдя до линии фронта. Для ответа на все эти вопросы необходимо продолжение целенаправленных комплексных наблюдений за режимом и динамикой ледника Майли.

Изменения в районе Кармадонской котловины

Ледово-каменный завал в Кармадонской котловине уже осенью 2002 г. активно обтаивал сверху вследствие высоких дневных температур, поэтому уже через месяц произошло его бронирование вытравливающим мелкозёмом, что привело к некоторому уменьшению его таяния (рис. 122).

Таяние ледового тела завала происходит как за счёт таяния льда при положительных температурах воздуха (средняя летняя температура $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$), так и за счёт размыва водой р. Геналдон и других рек в каналах под завалом (в летние месяцы температура воды перед входом в ледовый завал достигает $10\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$). По оценкам, сделанным сразу после катастрофы, таяние ледового тела завала должно было продолжаться 10–12 лет. Летом 2003 г. повторные геодезические измерения, проведённые специалистами предприятия «Севосгеозэко», показали, что поверхность ледового тела понизилась в среднем на 20 м (от 6 до 40 м) по сравнению с измерениями, сделанными ими же в конце сентября 2002 г. Но надо учитывать, что поверхность понизилась не только за счёт таяния, но и вследствие уплотнения, так как во многих местах завал представлял собой нагромождение блоков льда и камней.

Наиболее активно таяние завала шло в первые годы, к середине 2006 г. на поверхности завала образовался моренный чехол средней толщиной немного менее 1 м. На основе этого можно сделать вывод, что завал состоял в значительной мере из льда, содержание моренного материала не превышало 1–5% (Мавлюдов, 2011). Несмотря на происходившее после 2002 г. таяние даже летом 2006 г. на поверхности завала сохранялись нерастаявшие монолиты льда (рис. 123).

Завальное озеро у селения Старая Саниба, затопившее ряд домов, максимального объёма в 5 млн м^3 достигло 20 октября 2002 г. — через месяц после катастрофы. Но с 22 октября вода на-



Рис. 122. Участок завала и озеро Саниба в середине октября 2002 г. Фото Н.И. Осокина

чала уходить через канал стока под завалом и уровень воды в озере плавно понижался до середины июня 2003 г. К июлю площадь озера уменьшилась уже вдвое, а объём воды в нём — вчетверо по сравнению с октябрём 2002 г. Затем процесс стабилизировался, но озеро продолжало затапливать часть домов ещё и в 2006 г. (рис. 124, *а*). В настоящее время озера уже фактически не стало (рис. 124, *б*).

К лету 2014 г. завал претерпел серьёзные изменения, это хорошо видно на рис. 125. На всей площади понизилась его поверхность: в северной части примерно на 100 м, а в южной — на 50 м. Такое развитие событий привело к накоплению толстого слоя моренных отложений на поверхности льда. Если на склонах толщина моренного чехла надо льдом составляет 2,5–3,5 м, то в средней части долины она, вероятно, достигает 8–10 м. Связано это с тем, что процессы оплывания и стока рыхлого материала по льду происходили со склонов к нижней части долины. Бронирование льда моренными отложениями замедляет его таяние, поэтому участки с большой



Рис. 123. Тающие глыбы льда на поверхности завала в июне 2006 г. Фото Б.Р. Мавлюдова

толщиной моренных отложений стали более стабильными и на их поверхности появилась древесная растительность (рис. 126).

Чаще всего на поверхности завала встречаются древесные породы: ольха и облепиха, иногда сосна. Отдельные стволы ольхи уже достигают диаметра около 10 см. Но нередко на поверхности завала появляются трещины, расширяются активные воронки, что приводит к массовой гибели молодого леса в таких местах. Вместе с тем на нестабильных участках завала растительность полностью отсутствует — и травянистая, и древесная. Подобные участки наиболее развиты в средней части завала между реками Геналдон и Кауридон, где его поверхность изобилует многочисленными холмами и западинами. Во многих трещинах виден лёд в основании моренных отложений (рис. 127).

Граница льда под поверхностью завала, начиная примерно с 2006 г., практически не изменилась. Это связано со стабилизацией поверхности и её залесением во многих местах. Однако стабилизация завала — это явление временное, что наглядно показала попытка проложить дорогу вдоль левого борта долины р. Геналдон, предпринятая зимой 2012/13 г. Планировалось обойти тоннель по насы-



Рис. 124. Изменения озера Саниба: *а* – в 2006 г. часть домов новой застройки была ещё под водой озера Саниба; *б* – в июне 2014 г. озеро уже практически исчезло. Фото Б.Р. Мавлюдова



Рис. 125. Изменения поверхности завала в районе Кармадонских ворот за 12 лет: *а* – после катастрофы, октябрь 2002 г. Фото Н.И. Осокина; *б* – июнь 2014 г. Фото Б.Р. Мавлюдова

пи вдоль левого борта ущелья. Воспользоваться прежним тоннелем оказалось невозможно, так как в нижней (северной) его части временная дорога проходит на уровне верхней его кромки, а у южной части тоннеля она расположена на 8 м выше верхней кромки тоннеля. С учётом высоты тоннеля, равной приблизительно 4 м, можно



Рис. 126. Поверхность растаявшего завала зарастает травами и кустарником. Июнь 2014 г. Фото Б.Р. Мавлюдова



Рис. 127. На нестабильных участках завала с остатками льда под толщей обломков растительность ещё не развивается. Фото Б.Р. Мавлюдова

сказать, что современное русло р. Геналдон расположено примерно на 12 м выше прошлого русла реки, до катастрофы. Какую часть из этих 12 м составляет лёд – доподлинно не известно. Присутствие льда видно по трещинам, ориентированным вдоль русла реки, и по огромной воронке, возникшей в русле между входами в тоннель.

Осенью 2013 г. путь в месте расположения воронки был не проезжим, но весной 2014 г. по верхней кромке бывшего завала была проложена дорога в селение Верхняя Саниба, которая перед входом в ущелье прошла по моренным отложениям, прикрывающим лёд. В июне 2014 г. появился мост через р. Геналдон, а дорогу через воронку отсыпали гравием. При прокладке дороги к селению Старая Саниба строители три раза вскрывали лёд. На участке серпантинна видна трещина поперёк дороги, которая показывает положение льда в основании дороги. При строительстве дороги вдоль левого берега р. Геналдон к селению Кармадон строители подрезали склон поверхностной морены. Это вызвало активизацию таяния льда под ставшими более тонкими перекрывающими моренными отложениями, что, в свою очередь, привело к возникновению продольных трещин и провалов, вдоль полотна дороги активизировался ледниковый карст. В результате строительства обнажилась часть ледяной поверхности и начал расти псевдоселевой очаг: таяние льда привело к обрушению перекрывающих моренных отложений на лёд, они пропитались талой водой и в виде микроселевых потоков начали стекать под уклон по поверхности льда (рис. 128).

Всё это говорит о том, что возникшее в настоящее время равновесное состояние завала — в действительности временное явление. Любые экстремальные условия, как-то жаркое или дождливое лето, хозяйственная деятельность и пр., могут привести к нарушению возникшего равновесия завала. В настоящее время дорога с севера подведена практически до входа в Кармадонские ворота и возможен вариант прокладки участка дороги по поверхности завала до соединения с ранее существовавшей дорогой. Но участок дороги, который будет проходить по завалу, ещё длительное время будет аварийным — вплоть до того времени, когда лёд в основании завала полностью растает.

Для поверхности завала в долинах Геналдон и Кауридон и для многочисленных протоков на обеих этих реках характерно обилие озёр, лежащих в воронках ледникового карста. Со временем воронки затягиваются рыхлыми отложениями, переносимыми рекой, но в рельефе поверхности сохраняются длительное время. Кроме того, здесь много непроточных озёр с прозрачной водой. При этом температура воды в таких озёрах ниже, чем в реках на завале. По-видимому, эти озёра связаны с внутри- и подлёдными водами, которые, как можно предположить, движутся внутри ледяной толщи по каналам, пронизывающим во многих местах ледяную толщу. Об



Рис. 128. Обнажение льда в результате строительства дороги на завале, июнь 2014 г. Фото Б.Р. Мавлюдова

этом свидетельствуют отдельные провальные воронки, время от времени возникающие на поверхности завала.

Каналы внутреннего дренажа — в настоящее время наиболее активные агенты разрушения льда завала. Вода внутренних каналов напрямую взаимодействует со льдом, тогда как поверхностные водотоки отделены ото льда значительной толщиной рыхлых отложений. Не исключено, что внутренние каналы существуют непродолжительное время, поскольку могут заноситься песком и мелкозёмом; во всяком случае, все провальные воронки, которые сообщаются с водными потоками, заносятся через несколько лет.

Объём льда в завале (первоначально он составлял 110–115 млн м³) быстро уменьшался в первые три года, а затем темп уменьшения объёма значительно снизился (рис. 129), — таяние льда в завале плавно понижалось. В первый год после катастрофы объём ледового тела сократился на 48 млн м³, или чуть менее половины от первоначального объёма. На поверхности отмечались обширные зоны просадок и трещин, и сама поверхность ледового тела оставалась трещиноватой и неровной. В 2003–2004 гг. темпы сокращения объёма снизились более чем втрое, и поверхность начала выравниваться. К августу

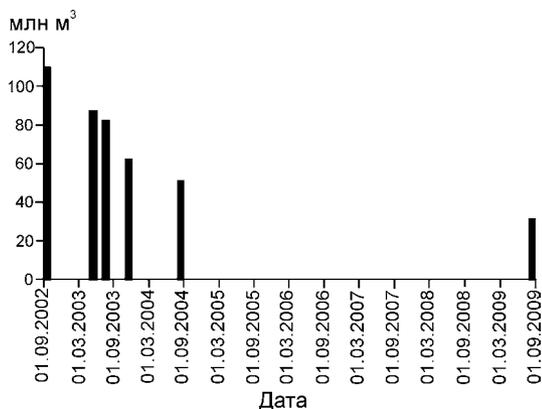


Рис. 129. Изменение объёма завала с 2002 по 2009 г. (Петраков и др., 2013)

2007 г. объём завала составлял всего 28,6 млн м³, а толщина ледово-каменной массы уменьшилась в среднем на 25–30 м, а на нижнем участке – на 50 м (Васьков и др., 2014). За 2004–2009 гг. ледовое тело потеряло всего 17 млн м³, т.е. примерно треть от объёма 2004 г. Максимальное понижение поверхности в 2002–2009 гг. достигало 90 м и отмечалось в средней части завала, минимальное было приурочено к верхней части завала и составляло 30 м (Петраков и др., 2013).

Площадь льда в пределах завала уменьшилась по сравнению с 2002 г., но ещё остаётся очень существенной. С 2006 г. по июнь 2014 г., по измерениям Б.Р. Мавлюдова, она осталась практически неизменной и уменьшилась по сравнению с 2002 г. примерно на 15–20%, теперь она составляет около 1,7 км². В действительности эта площадь может быть и большей, поскольку доподлинно неизвестно, сохранился ли лёд под мощным чехом русловых отложений в южной части завала. Наибольшая территория, полностью освободившаяся ото льда, расположена в юго-западной части завала на левом берегу р. Геналдон. Льда практически не осталось и в самой северной части завала в районе северного окончания первого туннеля. На остальных участках лёд от края завала отступил незначительно, хотя его поверхность сильно понизилась. Это обстоятельство надо учитывать при проведении любой хозяйственной или рекреационной деятельности на этой территории.

Сама долина р. Геналдон за прошедшее десятилетие сильно изменилась. Ландшафты в долине по пути прохождения ледово-водно-каменного селя вновь «зазеленели». На пойме и на повреждённых участках склонов быстро развивается растительный покров, особенно в нижней части долины. Но и в верховьях Геналдона облик склонов изменился неузнаваемо уже в 2009 г. (рис. 130, а, б).



Рис. 130. Верховья Геналдона: *а* – в 2002 г. (фото НИЛ Геологоразведчик); *б* – в 2009 г. (фото Р.А. Чернова)





Рис. 131. Участки склонов, подверженные эрозии. 2009 г. Фото Р.А. Чернова

Однако остались ещё большие участки склонов в верхней части долины, лишённые растительности, которые подвергаются интенсивной эрозии. В период дождей здесь сходят микросели, местами замечены следы оползней (рис. 131).

ПОДВИЖКИ ЛЕДНИКОВ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ

Неожиданная катастрофа, вызванная пульсирующим ледником Колка, показала в полной мере опасность ледников с неустойчивым динамическим режимом. Но систематическое исследование пульсирующих ледников на Кавказе никем не проводилось, хотя литературные данные содержат немало сведений о ледниковых подвижках. На основе анализа аэрофотоснимков 1946, 1957, 1981, 1987 гг., космических снимков 2000–2002 гг. (МКС и ASTER спутника Terra), литературных сообщений, а также перечня подвижек ледников Кавказа, разработанного в своё время К.П. Рототаевым, в этом разделе мы даём краткий обзор ледников с известными подвижками или явными проявлениями неустойчивого динамического режима на Северном Кавказе (Рототаева, 2006). Размещение ледников, описание которых будет дано ниже, показано на рис. 132.

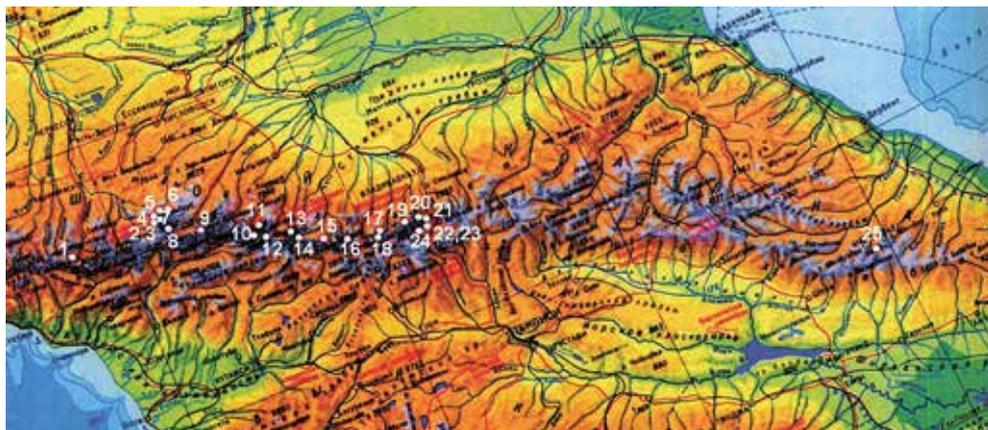


Рис. 132. Кавказские ледники с известными пульсациями или признаками подвижек: 1 – Аманауз, 2 – № 316, 3 – № 317, 4 – Кюкюртлю, 5 – Уллучиран, 6 – Улдумалиендерку, 7 – Терскол, 8 – Большой Азау, 9 – Чегет-Кара, 10 – Безенги, 11 – Мижиргичиран, 12 – Хрумкол, 13 – Штулу Восточный, 14 – Мосотацете, 15 – Бартуйцете, 16 – Уилпата, 17 – Суаргом, 18 – Тепли, 19 – Зейгалан, 20 – Колка, 21 – Чач, 22 – Девдорацкий, 23 – Абано, 24 – Мна, 25 – Муркар

Пульсирующие ледники

На Кавказе известны как пульсирующие ледники, быстрые наступания которых повторялись неоднократно, так и отдельные, вероятно, однократные подвижки ледников. К пульсирующим можно

определённо отнести ледники Девдоракский, Колка, Хрумкол, Муркар, Большой Азау.

Быстрые продвижения *Девдоракского ледника* на восточном склоне Казбека, о которых уже упоминалось, происходили не менее семи раз в период с 1776 по 1832 г. Лёд сбрасывался «обвалами» в узкое ущелье Терека, останавливая течение реки, которая затем прорывалась катастрофическими паводками, вызывая многочисленные разрушения в нижележащих селениях. В 1832 г. ледяная плотина высотой до 100 м и длиной более 2 км образовала в теснине Терека подпрудное озеро глубиной 90 м. Плотина была прорвана рекой, и разрушительный паводок уничтожил в ущелье дорогу, сооружения, посевы. Остатки льда в ущелье растаяли только через два года. Этим «обвалом» вынесен гигантский валун размерами 30×15×15 м, так называемый Ермоловский камень, который лежит в пойме Терека недалеко от села Верхний Ларс.

Военным инженерам в те годы приходилось находить путь в обход завалов, и сейчас в Дарьяльском ущелье сохранились остатки дороги, пробитой в скалах правого борта высоко над рекой. Более поздние наступания ледника в 1842, 1855 и 1875 гг. уже не достигали ущелья Терека.

В 1925 г. произошла подвижка долинного *ледника Хрумкол* в бассейне р. Черек Балкарский. Ледник площадью 7,2 км² начинается в верховьях с пятитысячных высот. К 20-м годам XX века его язык оканчивался в левой боковой долине ледника Дых-су в 600 м от его края. По словам местных жителей, ледник Хрумкол продвигался в апреле 1925 г. и за несколько дней достиг ледника Дых-су. Летом геолог И.Г. Кузнецов, посетивший этот район, увидел массу льда и камней, которая напоззла широким фронтом на поверхность ледника Дых-су и встала отвесной стеной высотой 30–40 м: «...торчащие массы льда, торчащие камни... шум, треск, гул и страшный грохот, временами напоминающий пушечные выстрелы; всё это свидетельствует, что... глыбы льда и камней обрушиваются и оседают или же проваливаются глубоко в ямы» (Кузнецов, 1925, с. 4).

По оценке В.Д. Панова, ледником было вынесено около 20 млн м³ льда. Этот лёд таял в течение 10 лет, и только с 1935 г. конец ледника начал активно отступать. К 1953 г. он отошёл от края ледника Дых-Су на 1 км, а к 1989 г. на 2,8 км (Панов, 1993). Очевидно, ледник испытывал подвижки и прежде: на леднике Дых-су находили вмёрзшие в лёд доски от штольни, вынесенные из долины Хрумкол.

Небольшой долинный *ледник Муркар* с лавинно-обвальным питанием находится в Дагестане, в бассейне р. Самур, на северном

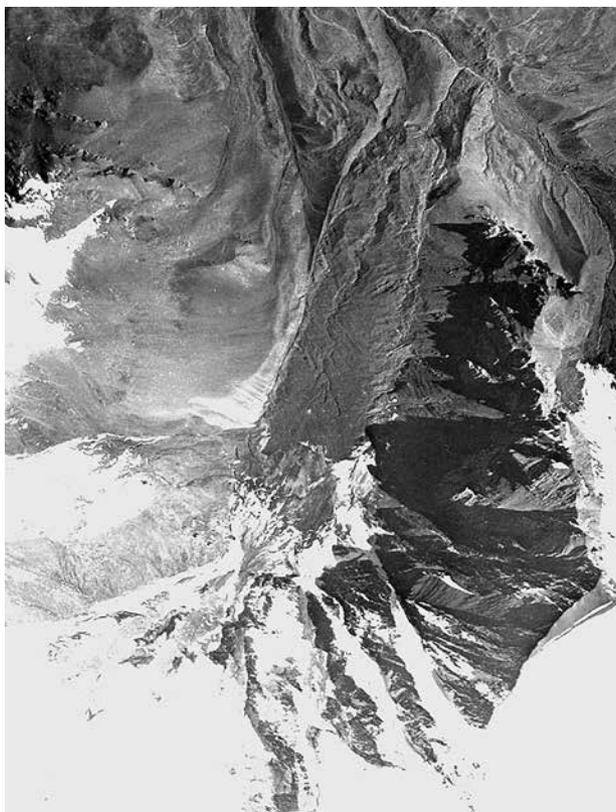


Рис. 133. Ледник Муркар до подвижки (аэрофотоснимок 1957 г.)

склоне горы Базардюзи (4466 м). С 1901 по 1938 г. ледник занимал не только свою долину, но конец его выходил в поперечную долину р. Сельды. Но затем он постепенно отступал и к моменту подвижки в 1960 г. его конец находился в 250 м от долины р. Сельды. Судя по аэрофотоснимку 1957 г. (рис. 133), тёмная заморененная поверхность его поднялась почти до гребней береговых морен и местами покрылась трещинами, особенно в краевых частях.

20 августа 1960 г. в селе Куруш за 15 км от ледника услышали грохот, подобный пушечным залпам, который продолжался более 30 минут. После этого небольшая горная речка Сельды превратилась в ревущий поток, несущий обломки льда, снег и камни. Водяной вал достигал высоты 4–5 м. Ледник продвинулся на 690 м и вновь завалил днище долины Сельды на протяжении 440 м, перегородив её ледяной стеной высотой 60 м; выше запруды образовалось временное озеро. Река в течение 20 лет находила себе путь в ледяном завале.

Причиной этой подвижки сначала считался обвал громадных масс льда с висячего края ледниковой шапки Базардюзи в тыловой части ледника, но позже В.Ш. Цомая и И.А. Алиевым было установлено, что граница висячих ледников не изменялась и причиной пульсации ледника стала перегрузка его тыловой части лавинами (Кисин, Тертеров, 1961; Цомая, Алиев, 1987). Очень высокая концентрация снега на небольшой части ледника (0,12 км²), ниже которой вся поверхность языка закрыта мощным чехлом морены толщиной до 1,5–2 м, препятствующей таянию и разгрузке льда – это те же причины, как увидим далее, что приводят к регулярным пульсациям и печально известного теперь ледника Колка. В.Ш. Цомая считал, что произошла очередная пульсация ледника Муркар, цикл которой, судя по прежним его изменениям, равен 59 годам (Опасные..., 1980).

На южном склоне Эльбруса, в бассейне р. Азау, притока Баксана находится один из крупнейших ледников Северного Кавказа – *Большой Азау*. Наблюдения за колебаниями ледника велись с середины XIX в., а в последние 50 лет его динамика изучается гляциологами Московского университета. Ледник несколько раз продвигался вперед с явными признаками подвижек пульсирующего ледника.

В 1849 г. Г. Абих обнаружил вторжение ледника в столетний сосновый лес; сломанные сосны были нагромождены вместе с обломками льда перед высоким крутым фронтом ледника. Ряд фактов подтверждает, что это была подвижка пульсирующего ледника. Об этом свидетельствует изменение продольного профиля ледника, типичное для выброса льда в результате пульсации: падение толщины льда в тыловой части языка до 150 м и «вздутие» ближе к концу до 250–300 м (Сейнова, 2001). Другой признак – особенно высокая скорость сокращения ледника в первые годы после подвижки, с образованием больших массивов мёртвых льдов. После 1887 г. она сильно замедлилась, а в 1910–20-х годах ледник снова наступал и продвинулся на 50 м, демонстрируя признаки новой подвижки: крутой лоб, сильная трещиноватость всего ледника ниже ледопада, волна повышения поверхности в нижней части. Более того, ледник начал наступать после отчленения в 1887 г. трёх его боковых притоков, что должно было, наоборот, вызвать последующее сокращение языка, лишённого части питания.

В 1970-х годах ледник Большой Азау несколько раз наступал со скоростью от 21 до 34 м/год, продвинувшись в целом на 120 м (Панов, 1993). Таким образом, интервалы между подвижками лед-

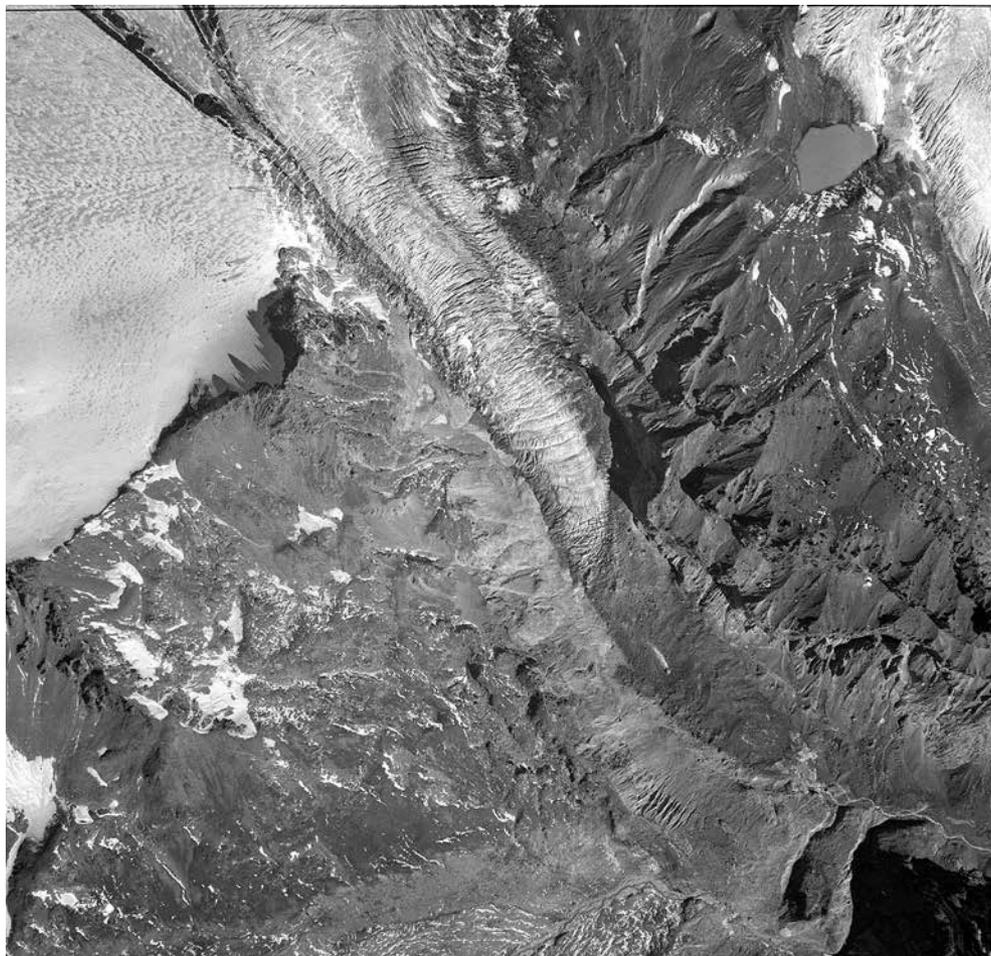


Рис. 134. Начало продвижения «нового» языка на выровненную поверхность ледника Большой Азау, закрытую мореной (аэрофотоснимок 1987 г.)

ника составляли порядка 60 лет. Позже ледник постоянно сокращался, хотя и были замечены продвижения льда, не достигавшие конца ледника. Так, на аэрофотоснимках 1987 г. мы отметили, что поверхность ледника в нижней части ледопада расширилась, вздулась и приобрела выпуклую форму (рис. 134). Серия широких огив показывала, что лёд проталкивается через горловину ущелья порциями. По леднику шла кинематическая волна, и на выровненную поверхность языка, покрытую толстым чехлом морены, начинал надвигаться «новый» язык, фронт которого был разбит густой сетью косых трещин, подчёркивающих сильный напор льда.

В следующие годы наступающий белый язык ещё более выделился, в 1991 г. его фронт продвинулся за год на 40 м, поверхность повысилась местами на 10–12 м, чистый лёд был отделён от старого напорным валом высотой до 5 м. На снимке, полученном в 2002 г. с Международной космической станции, белый язык ещё более вытянулся, но стал узким, и конец его распластался, подвижка закончилась.

Такой же вал нового льда на поверхности языка был зафиксирован съёмками и раньше — в 1973 г. Е.А. Золотарёвым, а ещё раньше, в 1956 г. А.В. Брюхановым — вероятно, во время подобных подвижек. Очевидно, такие выбросы льда происходят на леднике регулярно и вызваны тем, что огромная масса двух составляющих ледниковых потоков Большого Азау подпруживается на высоте 3200 м перед входом языка в теснину узкого ущелья, и затем разгружается в виде пульсаций (Рототаева, 2006).

На Эльбрусе, кроме ледника Большой Азау, пульсации характерны также для ледникового комплекса *Кюкюртлю* на западном склоне. В 1960-е годы испытал подвижку ледник Малый Кюкюртлю. В 1981 г. двинулся и нависал над левой мореной языка Кюкюртлю высокий фронт небольшого ледника № 317 на левом склоне, через год он достиг края основного ледника (рис. 135, *а*). Позже, на снимке 2004 г. ледник не имел никаких признаков активности и был совершенно завален мореной.

По данным измерений МГУ подтверждается подвижка основного ледника Кюкюртлю в интервале между съёмками 1959 и 1983 гг. Ледник отличается обширной областью питания на крутом западном склоне Эльбруса с большими запасами льда, широким ледопадом, разбитом трещинами в средней части и узким длинным языком. За указанный период ледник продвинулся на 60–100 м, поверхность повысилась на 30–40 м близ его конца и на протяжении 1,5 км, а выше, в 2 км от конца, опустилась на 5–10 м (Винников, Лабутина, 1987). Подвижка ледника была не первой. По описаниям Н.Я. Динника (1893), в 1879 г. лоб ледника был настолько крутым, что пришлось вырубать ступени, чтобы подняться на его поверхность. В 1929 г. Я.И. Фролов также видел крутой лоб, разбитый глубокими трещинами, с обрушениями льда. И в наши дни наблюдается волна повышения поверхности, подошедшая к концу ледника (рис. 135, *б*).

Следы отдельных ледниковых подвижек

Для некоторых ледников Кавказа есть сведения об отдельных подвижках, а это тревожный сигнал, который требует регулярных наблюдений за их динамикой.

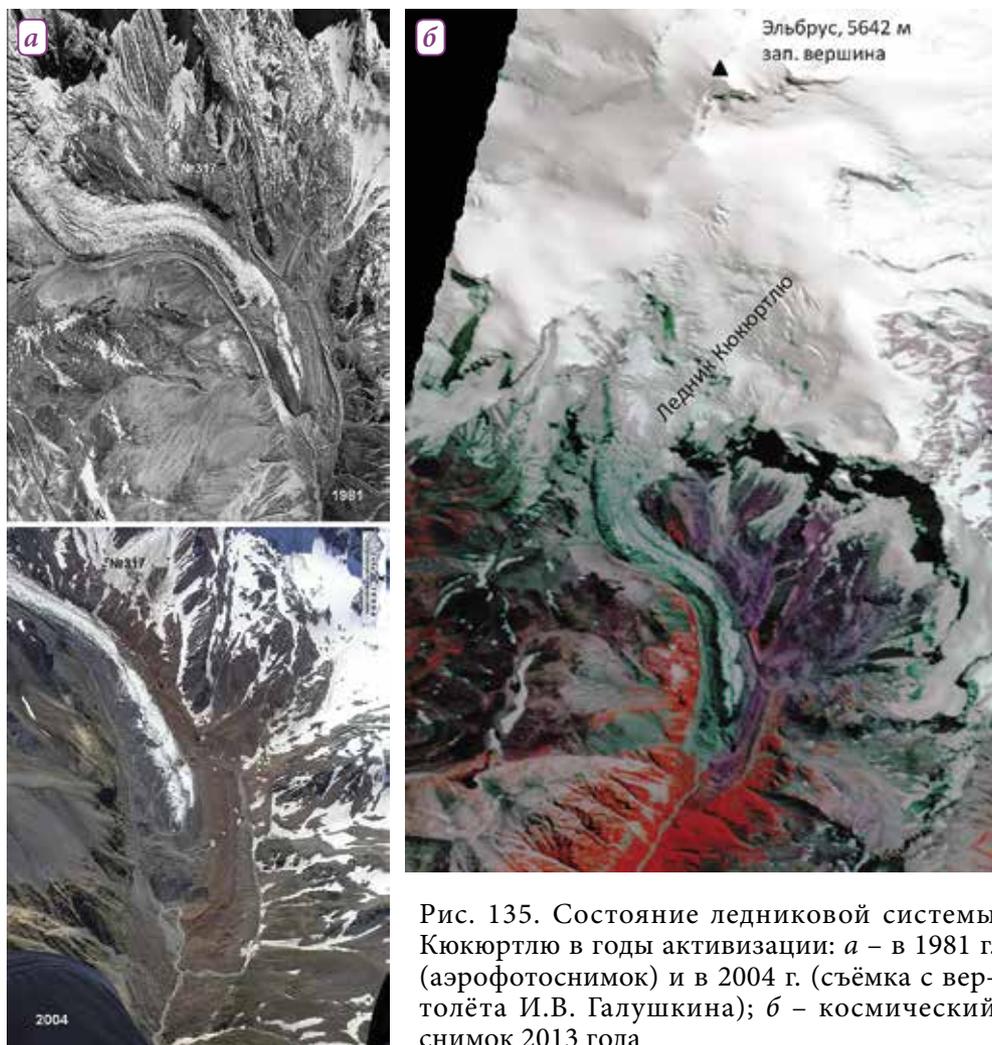


Рис. 135. Состояние ледниковой системы Кюкюртлю в годы активизации: *а* – в 1981 г. (аэрофотоснимок) и в 2004 г. (съёмка с вертолѐта И.В. Галушкина); *б* – космический снимок 2013 года

Иногда в описаниях исследователей зафиксированы не сами подвижки, но признаки их недавнего завершения – резкие изменения в морфологии ледников и необычно быстрая их деградация. Так, К.Н. Россиков (1896) свидетельствует о подвижках двух небольших леников Тепли и Суаргом (он же Хардотчин) в верховьях р. Фиагдон, – он наблюдал их последствия. Между двумя посещениями ледников – в 1884 и 1894 гг. – на этих ледниках произошли огромные изменения.

Ледник Тепли оказался неузнаваем: он укоротился на 284 м, поверхность его снизилась на 40–50 м, оказалась с провалами и боль-

шим озером посреди языка. В области питания на высоте 3650 м уровень фирна понизился на 6 м, обнажился новый скальный гребень. Фронт ледника вместо прежнего крутого ледяного обрыва оказался пологим, изборождённым ложбинами с текущими ручьями и покрытым мореной.

Тот же характер изменений оказался на соседнем леднике Суаргом. В 1884 г. язык ледника был «завален мощными толщами снега», высота которых у конца его превышала 8 м. Фронт ледника в виде ледяного уступа высотой 5–7 м нависал над краем скал, обрывающихся в долину. При втором посещении оказалось, что неровный край его отступил на 200–400 м, поверхность ледника осела и была очень сильно заморожена.

Среди ледников, где отмечены отдельные подвижки, характерны ледники, расположенные в высоких карах на склонах главных долин. Иногда концы их выходят на крутые скалы устьевой ступени, и при подвижках происходят обвалы льда. Таков, например, ледник Зейгалан в верховьях долины Мидаграбин в бассейне р. Гизельдон с обширной областью питания и коротким крутопадающим языком. П.В. Ковалев (1961) отмечал продвижение ледника Зейгалан в 1959 г., с обвалами льда в узкое ущелье. На аэроснимках 26 сентября 1981 г. чётко видна недавняя активизация правого притока ледника. Его чёрная от морены поверхность покрыта трещинами до самого конца, фронт выдвинут дальше конца основного ледника и снова повис над обрывом скал.

На устьевую ступень выходит и язык ледника Уилпата в цирке на левом склоне над ледником Цея (бассейн р. Ардон). Край его испытывает частые изменения, а иногда и быстрые подвижки. В.Д. Панов (1993) отмечает наступания ледника на 30–40 м в 1940–1946, 1952–1957 и 1968–1974 гг., тогда как соседние ледники в эти же годы отступали. Нам известны свидетельства альпинистов, участвовавших в спасательных работах в начале 1940-х годов, когда произошёл мощный обвал льда из цирка ледника, под которым погибла группа восходителей.

Немногочисленные данные наблюдений свидетельствуют о подвижках ледников других типов. В 2001–2003 гг. мы наблюдали неожиданное продвижение конца ледника Чегет-Кара в бассейне р. Баксан, который питается обвалами фирна и льда со стен массива Донгуз-орун. Край ледника, толкая перед собой морену, вторгся в берёзовый лес, повалив деревья, и продвинулся на 40 м за два года.

В.Д. Панов (1993) приводит сведения о подвижке долинного ледника Аманауз (бассейн р. Теберды) на 800 м в 1931–1932 гг. Этот

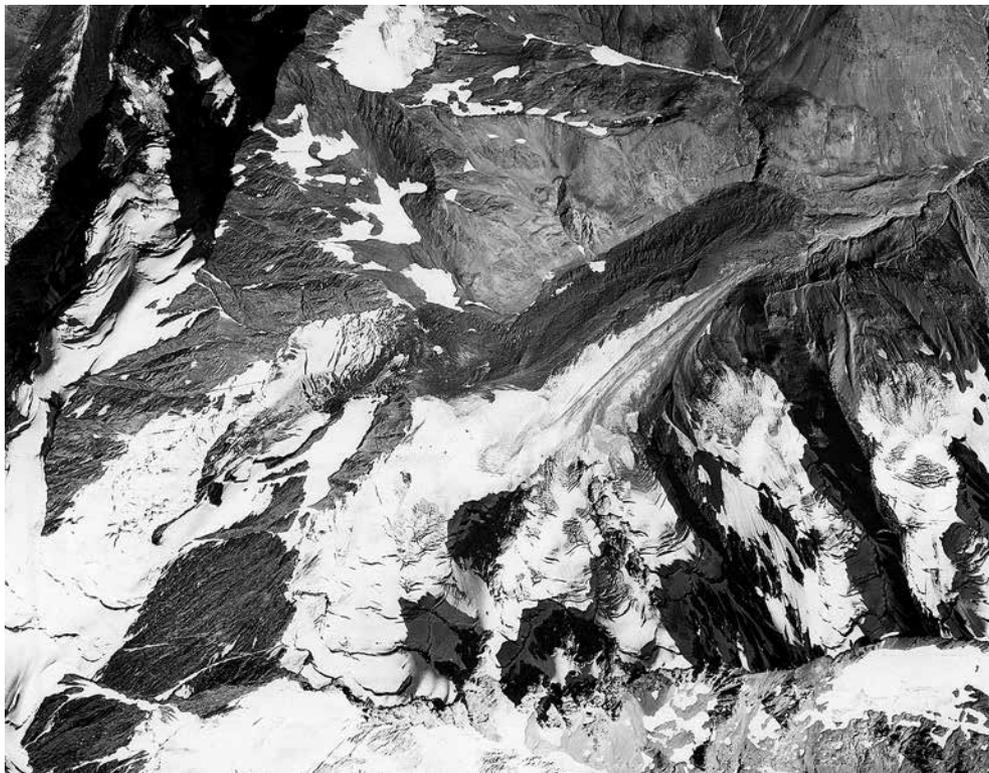


Рис. 136. Подвижка левого притока ледника Мосотацете (аэрофотоснимок 1987 г.)

же автор, вслед за В.Н. Олюниным (1953) считает, что подвижку на 200 м испытал в начале 1940-х годов ледник Восточный Штулу в бассейне р. Черек Балкарский, после чего он резко сокращался. К.П. Рототаев отмечает быстрое продвижение этого ледника и ранее – в начале XX века. А на аэроснимках 1957 г. видны последствия недавнего наступания правого притока ледника Восточный Штулу, перекрывшего концевую часть основного потока.

На тех же снимках чётко видна недавняя подвижка ледника в соседней долине, в системе сложного долинного ледника Мосотацете (бассейн р. Урух). Левый его поток, изрезанный трещинами и покрытый мореной, перекрыв язык основного потока, заполнив дно ледниковой долины на всю его ширину (рис. 136). На леднике Бартуйцете в том же бассейне активизация левого потока в 1957 г. сменилась затем резкой деградацией. На снимке 1987 г. поверхность его значительно ниже, и граница сплошного моренного чехла переместилась по леднику на 1,5 км выше прежней.



Рис. 137. Фронт наступающего ледника Мижиргичиран, август 2003 г. Фото Ю.Г. Ильичева

Вообще подвижки отдельных притоков в сложных ледниках Кавказа — явление не редкое. При этом не обязательно происходит продвижение фронта ледника. Перемещения массы, даже значительные и резкие, могут происходить в пределах общего контура ледника (как и на языке Большого Азау), видоизменяя лишь отдельные его части. Подвижки составляющих потоков на самых крупных ледниках могут поддерживать существование общего языка. Так, на аэро- и космических снимках 1957–2000 гг. хорошо прослеживается попеременная активизация потоков в двух крупнейших ледниковых системах — Безенги и Мижиргичиран (бассейн р. Черек Безенгийский).

Наземные наблюдения последних десяти лет показали, что конец ледника Мижиргичиран занимал стационарное положение и даже наступал на 20 м, перед ним образовался вал напорной морены, а поверхность языка в отдельные годы повышалась так, что лёд переваливал через гребни боковых морен (рис. 137).

Этот ледник продвигался и в прежние времена. Н.Я. Динник (1884), посетивший долину Безенги в 1881 г., писал, что за последние два года ледник Мижирги удлинился на 200 сажень (примерно 430 м), язык его находится на 600 футов выше края Безенги и кончается отвесной ледя-

ной стеной сажен 20–30 высотой, разбитой глубокими трещинами; с неё валит лёд с грохотом орудий. Ледник Безенги, по словам горцев, за последние 20 лет стал версты на две короче и гораздо уже.

Таким образом, подвижки присущи ледникам самых разных морфологических типов и встречаются в различных районах Северного Кавказа. Особое внимание следует уделить вулканическим массивам – районам двух высочайших вершин Центрального Кавказа – Эльбруса и Казбека. Здесь ледники расположены в активных тектонических зонах, с которыми связаны системы разломов, землетрясения, вулканические проявления. Эндогенные процессы могут влиять на проявление пульсаций ледников, менять их цикличность и даже, как видим, вызывать катастрофы.

Улучшение питания ледников в 1960–70-е годы привело к появлению волн активизации и продвижению фронта на нескольких ледниках Эльбруса – Уллучиран, Терскол и Уллумалиендерку.

Среди ледников Казбека мы уже отметили пульсации Девдоракского ледника. Катастрофические завалы происходили ещё на нескольких ледниках Казбека. Крупные выбросы и сели формировал в 1910–1913 гг. ледник Абано. В июле 1909 г. массы льда, камня и грязи достигли Терека и остановили его течение на два часа. В 1910 г. ледник Абано отличался уже четырьмя «обвалами». Резкую подвижку в 1909–1910 гг. испытал ледник Чач, который и позже периодически продвигался на десятки и сотни метров. В 1966–1968 гг. наступал ледник Мна. Все эти ледники находятся в верховьях Терека, на территории Грузии. Информация об этих подвижках содержится, например, в работе А.И. Духовского (1917) и современной обзорной статье о казбекских завалах (Запорожченко, Черноморец, 2004).

О катастрофических ледовых выбросах Девдоракского ледника писали многие исследователи – А.А. Висковатов, Г.С. Хатисян, Б.Н. Статковский, А.И. Духовской и др., высказывая самые разные предположения о причинах этого явления (Опасные..., 1980). Ещё в 1884 г. Б.Н. Статковский говорил о самоподпруживании льда в леднике и доказывал возможность формирования таких выбросов льда лишь при накоплении большого количества воды (Статковский, 1884). Многие исследователи Девдоракского ледника считали причиной его выбросов периодические наступания ледника, подпруживание его в резком сужении долины, насыщение раздробленного льда водой и прорыв в виде водно-ледового сея.

Но в последние годы районы Эльбруса и Казбека требуют особого наблюдения в связи с тем, что в их недрах обнаружены близ-

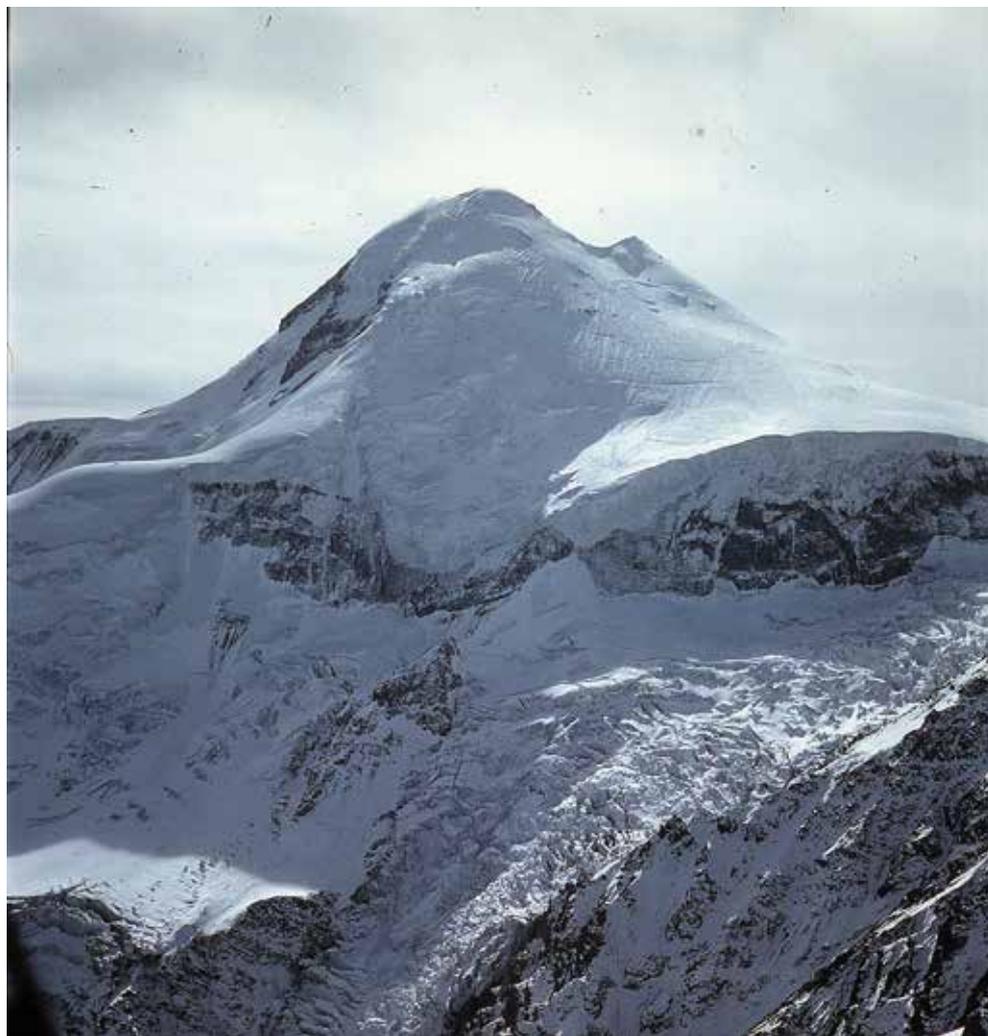


Рис. 138. Место отрыва обвала на Девдоракском леднике. Слева – вершина Казбека и верховья ледника до события (фото 1987 г. К.П. Рототаева). Справа – после обвала (фото 17 мая 2014 г.)

поверхностные магматические камеры, вызывающие приток тепла к земной поверхности. Активизация вулканогенных процессов неизбежно сказывается и на ледниковом покрытии массивов. Ярким подтверждением этого был выброс из своего вместилища ледника Колка, со времени которого прошло всего 12 лет. И вдруг – новое непредвиденное событие: обвал на Девдоракском леднике стал примером проявления именно вулканической активности Казбека.



Обвал на Девдоракском леднике

17 мая 2014 г. в 9 час. 30 мин. утра на восточном склоне горы Казбек на высоте около 4200–4500 м, в области питания правой ветви Девдоракского ледника, из-под ледового гребня, разделяющего бассейны ледников Девдоракского и Абано произошёл обвал участка ледово-фирнового склона с подстилающим его скальным грунтом. Первую научную информацию об этом событии опубликовали сотрудники Главного управления МЧС по РСО-А и НПП «ИнфоТЕРРА» Р.А. Тавасиев и И.В. Галушкин (2014) на основе данных обследования с вертолёта и специалист по горным селям из Московского университета С.С. Черноморец (2014), который использовал материалы интернета (Спасательные работы..., 2014 и др.), а также собственные наблюдения в первые дни на месте события.

Сравнение снимка К.П. Рототаева 1987 года и фотографии, сделанной 17 мая 2014 г., показывает зону отрыва обвала (рис. 138). Длина

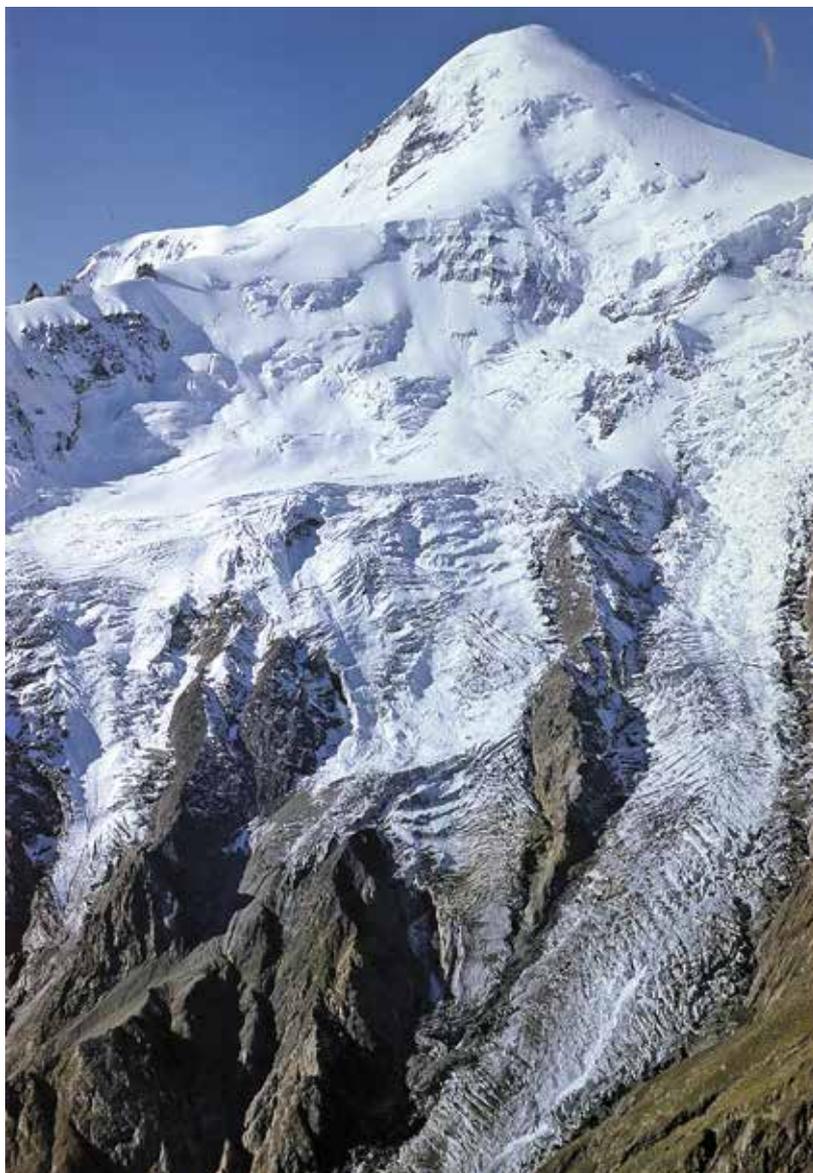
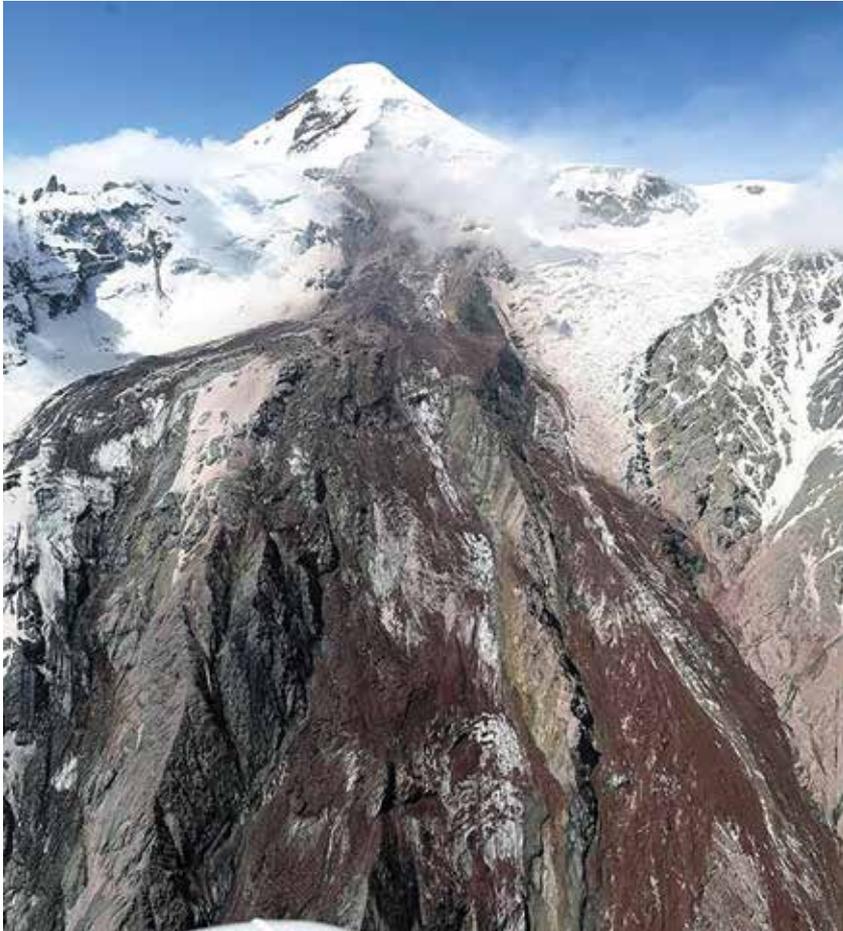


Рис. 139. Обвал 17 мая 2014 г. накрыл ледниковый склон горы Казбек. Слева – склон до обвала (фото 1987 г. К.П. Рототаева). Справа – после обвала (фото Г. Гоциридзе)

обвалившегося участка на склоне около 370 м, максимальная ширина в нижней части 350 м. Площадь обвала около 50 тыс. м², объём более 1 млн м³ (по оценкам различных исследователей – до 6 млн м³). Как и при сходе ледника Колка, в районе отрыва вниз по склону спускалось



облако пара и газа, наблюдался запах серы, т.е. вскрылись фумаролы. Вероятно, из-за разогрева повысилась температура горных пород на склоне, что привело к потере их устойчивости и обрушению.

Обвал прошёл правее основного Девдоракского ледопада, и упал на язык ледника, а также частично на соседние ледники на склоне. Значительная площадь склона оказалась покрыта чехлом упавших обломков (рис. 139). Затем произошла трансформация в «каменно-ледовую лавину» (rock-ice avalanche) в ущелье Девдоракского ледника. Лавина пронеслась вниз по крутопадающему леднику до днища Дарьяльского ущелья. По оценке В.Н. Дробышева, скорость лавины достигала 280 км/ч. Протяжённость зоны транзита каменно-ледовой лавины от верхней точки очага формирования до русла р. Терек — 10,4 км при перепаде высот 3150 м.



Рис. 140. Повреждённые автомобили на Военно-Грузинской дороге. Фото Г. Гоциридзе, 17 мая 2014 г.

Ниже языка Девдоракского ледника поток двигался (видимо, с меньшей скоростью) по дну долины р. Амилишки. Часть материала (сотни тысяч кубометров) осталась на днище долины. Долина р. Амилишки в нижней части имеет трапециевидный поперечный профиль. Ширина полосы отложений 2014 г. по днищу — 20–30 м, отложения вытянуты в виде продольных субпараллельных полос. У слияния рек Амилишки и Чач высота уровня зоны поражения составляла 15–20 м над руслом, крутизна бортов долины 30–35 градусов. Слияние этих двух рек даёт реку Кабахи. В 1 км выше устья Кабахи площадь сечения потока можно оценить в 900–1000 м² (ширина полосы свежих отложений по бровкам 70–80 м, средняя глубина 15 м).

Выйдя в долину Терека, поток достиг противоположного правого борта, а затем часть его повернула влево вниз по долине. По материалам геодезической съёмки, сделанной дорожной службой 18 мая, объём отложений завала в долине Терека составил 760 тыс. м³ (Э. Хокришвили, устное сообщение). На момент съёмки завал немного просел, и Терек промыл в нём углубление для русла. Поэтому начальный объём завала в долине Терека составил, по-видимому, около 0,9 млн м³ (напомним, что завал ледника Колка — около 115 млн м³). По предварительной оценке, в этой массе может быть до четверти льда.

На правом борту Терека обвал разрушил и завалил около 0,5 км Военно-Грузинской дороги, уничтожив несколько большегрузных автомашин (рис. 140), и остановился в нескольких десятках метров от стро-



Рис. 141. Зона остановки обвала в Дарьяльском ущелье. Фото Г. Гоциридзе, 17 мая 2014 г.

ящихся сооружений Дарьял ГЭС (рис. 141). После образования завала началось формирование подпрудного озера. Но уже в первые часы вода пошла через гидротехнический тоннель строящейся ГЭС, прорезав завал на глубину 10–15 м. Это позволило избежать образования мощного селевого потока. Уже 18 мая подпрудное озеро было всего около 300 м длиной и около 85 м шириной, объём его составлял 200 тыс.м³.

В результате этой каменно-ледовой лавины несколько человек погибли (водители фур, стоящих в этот момент на Военно-Грузинской дороге). Порваны газопроводы, по которым шёл транзит российского газа в Армению, опрокинута опора ЛЭП. С первых часов на завале начались поисково-спасательные работы по возвращению Терека в старое русло (рис. 142).

Каковы же причины этого необычного явления? Во-первых, геологи отмечают появление тепловых аномалий на территории вулканических центров, вероятно, обусловленные повышением вулканической активности. При этом тепловой поток снизу ведёт к повышению температуры горных пород. Во-вторых, повышение температуры воздуха в этих районах в последние годы привело к некоторому росту температуры грунта на высотах более 4000 м, ухудшились условия промерзания грунта. В результате одновременного



Рис. 142. Работы по возвращению Терека в старое русло. Фото С.С. Черноморца, 19 мая 2014 г.

влияния этих двух факторов происходит прогревание всей толщи горных пород как сверху, так и снизу, снижается устойчивость многолетнемёрзлых пород. Всё это, безусловно, способствовало образованию обвала, который ниже после прохождения Девдоракского ледника стал каменно-ледовой лавиной.

Если повышение температуры воздуха и повышение вулканической активности будет продолжаться, то вероятность образования подобных опасных природных явлений будет расти. Это касается и района Девдоракского ледника и в целом вулканов в пределах Эльбрусского, Казбекского и Кельского вулканических центров, а также и всех динамически неустойчивых ледников.

Поскольку риски подвижек ледников и образования каменно-ледовых лавин возрастают, то крайне важно развернуть систему комплексного мониторинга динамически неустойчивых ледников Кавказа, температуры многолетнемёрзлых пород в высокогорье и температурных аномалий в горных породах, связанных с вулканической активностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кармадонская катастрофа — уникальное событие, не сравнимое с известными ранее подвижками и обвалами ледников. Выброс ледника целиком из своего ложа с образованием гигантского ледово-водно-каменного селя не имел до сих пор аналогов в мире. Прогноз таких явлений в настоящее время практически отсутствует, можно только констатировать их наличие и картографировать зоны опасности. К такому выводу пришли многие специалисты и, в частности, тогдашний директор Всемирной службы мониторинга ледников Вильфред Хеберли, который после катастрофы приезжал во Владикавказ и был свидетелем последствий только что случившейся катастрофы.

Целая «армия» учёных и специалистов нашей страны, Швейцарии и некоторых других стран анализировала случившиеся события и рассматривала всю сложную цепочку природных явлений, последовавших за молниеносным сходом ледника Колка из своего вместилища. Было высказано множество гипотез, в которых «действовали» метеорологические, гляциологические, вулканические, сейсмические и некоторые другие природные факторы. Эти гипотезы отражали разные подходы к этому уникальному явлению и пока не привели к единому взгляду на происшедшее.

Специалисты Института географии изучают ледник Колка и анализируют его режим в течение 45 лет, за это время собраны многочисленные и разносторонние факты, построены и проверены некоторые гипотезы, позволяющие нарисовать стройную и непротиворечивую картину случившихся грандиозных событий. Анализ имеющихся материалов позволяет сделать несколько основных выводов о причинах Кармадонской катастрофы.

1. Катастрофа не была очередной «закономерной» подвижкой пульсирующего ледника Колка. Преждевременный срыв ледника и колоссальный масштаб катастрофы были определены целым рядом экстремальных факторов, и в этом её отличие от прежних известных гляциальных подвижек ледника. Подготовка катастрофы длилась, вероятно, годы, ускорила в последние два месяца и произошла в считанные минуты.
2. Основная предпосылка катастрофы, доказанная геологами — активизация эндогенных процессов в районе Казбек-Джидарайского массива в последние годы, связанная с вулканическим аппаратом Казбека. Омоложение тектонических разломов

проявилось в накоплении напряжений, локальных землетрясениях, разрушении стены правого борта ледника Колка, длительных обвалах льда и горной породы. Активизация глубинных процессов в недрах «спящего» вулкана привела к образованию близповерхностной магматической камеры, повышению температур и давления газов в недрах под ледником.

3. Непосредственной причиной стремительного выброса ледника, вероятнее всего, был взрыв газов под ледником, достигших критического давления. Источником их накопления могла быть либо перестройка сложной гидротермальной системы под ледником, либо миграция вверх к земной поверхности глубинных поствулканических газов.
4. Под ледником скопилось много воды, часть которой при срыве ледника выплеснулась из цирка Колки на правый борт Майли. Большие объёмы воды сыграли решающую роль в отрыве всей массы ледника целиком от ложа и дальности её выброса вниз по долине на 16 км.
5. Обилие воды в леднике и под ним было обусловлено не только климатическими причинами, но, как оказалось, в большей степени вулканогенными процессами, вызвавшими приток глубинного тепла от близко расположенной магматической камеры и усиление донного таяния льда, а также, вероятно, дополнительным извержением глубинных вод во время катастрофы.
6. Обвалы льда и горной породы в цирке начались с конца июля 2002 г. и к 20 сентября практически завершились, но сыграли значительную роль в подготовке подвижки. Перегрузка тыловой части ледника материалом длительных обвалов привела и нарастанию давления в подлёдных горизонтах и напряжений во всём его теле.
7. Ледниковая катастрофа 2002 г., вызванная в основном эндогенными причинами — не единственная в истории долины Геналдона. Подобные события прошлых веков оставили здесь свои грандиозные следы. Но и теперь, по прошествии 12 лет, вулканогенные процессы снова проявляют активность не только в районе ледника Колка, но и на других ледниках Казбек-Джимарайского массива. Пример тому — обвал на Девдоракском леднике в мае 2014 г.
8. В опустевшем цирке ледника Колка за 12 лет после катастрофы сформировался новый массив льда, к 2014 г. его площадь составила 1,07 км². В настоящее время продолжается накопление льда в тыловой и средней частях нового ледника, но фронтальная его часть пока относительно стабильна.



На гребне Джимарай-Маили

9. Прогнозировать возрождение ледника Колка в его прежних размерах ещё рано. Здесь много вопросов, ответы на которые даст только время. Прежний ледник питался за счёт снега метелевого переноса, лавин и обвалов фирна и льда с правого склона. Но именно эти процессы будут идти и в дальнейшем. Постоянный юго-западный поток метелевого снега с высокого Майлийского плато через гребень с карнизами и уступами прежних фирново-ледовых полей продолжается, висячие ледники будут восстанавливаться, что приведёт к возрождению ледника в цирке. Это тем более вероятно в связи с тенденцией увеличения зимних осадков в высокогорье Центрального Кавказа в последнее десятилетие.

Вместе с тем в настоящее время новый массив льда питается почти исключительно лавинами, и трудно оценить объём будущей аккумуляции снега за счёт всех прежних источников питания ледника. Будет меняться величина таяния новых ледниковых языков, покрывающихся моренным чехлом. Пространственное распределение температур в цирке, очевидно, тоже изменится. В целом процессы восстановления ледникового бассейна Колка вместе с висячими ледниками могут продолжаться десятки лет. При этом очевидна необходимость как наземного, так и регулярного дистанционного мониторинга этого слишком нестабильного и, как выяснилось, непредсказуемого и опасного природного объекта.

Необходимость мониторинга природных процессов. Совершенно очевидно, что для контроля за развитием всех процессов необходимы периодические наблюдения — как наземные, так и аэровизуальные с помощью вертолѐта. Перспективно также использование космических съѐмок высокого разрешения. Для расчѐтов накопления, таяния и баланса вещества, вновь образующегося в цирке ледника, как и висячих ледников, нужны метеорологические наблюдения в ледниковой зоне Колка—Майли, что требует установки здесь (параллельно с посѐлком Кармадон) автоматической метеостанции. Метеорологический контроль должен сопровождаться высокоточными геодезическими измерениями.

Начало такой системы было положено в 2004 г., когда в Кармадонском ущелье была установлена система автоматизированного мониторинга гидрометеорологических процессов. Она включает в себя две метеостанции в районе села Верхний Кани и в районе ледника Колка на высоте 3000 м, оборудованные автономными источниками питания и системой передачи информации в центр мониторинга во Владикавказ, а также два автоматизированных гидропоста для наблюдения за уровнем подпрудного озера в районе села Горная Саниба и за расходом воды в р. Геналдон ниже ледового завала.

Дальнейший мониторинг, отвечающий современным требованиям, может не только дать новый научный материал для разгадки причин совершившейся катастрофы, но и помочь избежать подобных трагедий не только в этой уникальной точке, но и в других горных районах мира.

Хорошие результаты получены сочетанием дистанционных и наземных методов работ в районе Кармадонской катастрофы. Космический снимок с борта МКС за месяц до события показал, что ледник ещё не готов к очередной подвижке по «классической» схеме. Съѐмки с вертолѐта в первые дни после схода ледника показали облако пара и газа, постоянно висящее в пустом цирке, и обвальный участок в его тыловой части. На снимках ASTER до и после катастрофы хорошо виден масштаб события и его детали на всѐм протяжении долины Геналдона. Наземные наблюдения в цирке показали отсутствие угрозы новых выбросов льда и прорыва озера, а также выплеск огромного потока воды на ледник Майли. Химический анализ проб воды, взятых на обнажившемся после выброса ледника днище цирка, впервые продемонстрировал участие глубинных процессов в усилении донного таяния ледника.

В условиях глобального потепления климата и развития опасных стихийных процессов в горно-ледниковых районах проблема мони-



Вершина горы Казбек

торинга ледников приобретает особую остроту. Её решение прежними контактными методами осложнено труднодоступностью объектов, особенно после природных катастроф. Наш опыт сочетания наземных и аэрокосмических методов исследования проанализированного в этой книге грандиозного природного явления может быть использован при слежении за динамически нестабильными ледниками и в международных проектах мониторинга ледников.

ЛИТЕРАТУРА

- Агбалова В.В., Виленкин В.Л.* Среди вечных снегов и ледников. Орджоникидзе: Изд-во ИР, 1973. 140 с.
- Бергер М.Г.* Ледник Колка. Катастрофа 20 сентября 2002 года – внезапный газодинамический выброс ледника. М.: Изд-во ЛКИ, 2007а. 246 с.
- Бергер М.Г.* О событии на леднике Колка в 2 часа 21 минуту 20 сентября 2002 г. // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Владикавказ, 2014. С. 239–240.
- Бергер М.Г.* Три гляциодинамические подвижки и четыре газодинамических выброса ледника Колка: Малоизвестные страницы и дискуссионные вопросы истории развития пульсирующего ледника. М.: КомКнига, 2007б. 120 с.
- Божинский А.Н.* Математическое моделирование крупномасштабных селевых и ледниковых катастроф //МГИ*. 2005. Вып. 99. С. 13–17.
- Варданянц Л.А.* Геотектоника и геосейсмика Дарьяла как основная причина катастрофических обвалов Девдоракского и Геналдонского ледников Казбекского массива //Изв. ГГО. 1932. Т. 64. Вып. 1. С. 51–59.
- Васьков И.М.* Возможный механизм обвала и динамика ледово-каменных масс в верховьях р. Геналдон //Вестн. Владикавказского науч. центра. 2004. Т. 4. Вып. 2. С. 34–45.
- Васьков И.М., Турлов С.А., Валиев А.Л.* Последствия Геналдонской катастрофы 20 сентября 2002 г.: вчера, сегодня, завтра //Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Владикавказ, 2014. С. 116–131.
- Винников Л.П., Лабутина И.А.* Изменения ледника Кюкюртлю на Эльбрусе за четверть века //МГИ. 1987. Вып. 60. С.147–152.
- Гляциологический словарь / Ред. В.М. Котляков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
- Гурбанов А.Г., Богатинов О.А.* Вулканоопасность Эльбрусского и Казбекского вулканических центров //Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. IV науч.-практич. конф. М., 2004. С. 47–49.
- Гурбанов А.Г., Кусраев А.Г., Чельдиев А.Х.* Первые результаты исследования эндогенных процессов в Геналдонском и прилегающих ущельях //Вестн. Владикавказского науч. центра. 2004. Т. 4. Вып. 3. С. 2–8.
- Десинов Л.В.* Пульсация ледника Колка в 2002 году //Вестн. Владикавказского науч. центра. 2004. Т. 4. № 3. С. 72–87.
- Динник Н.Я.* Горы и ущелья Терской области //Зап. Кавказского отдела РГО. 1884. Кн. 13. Вып. 1. С. 1–48.
- Динник Н.Я.* Путешествие по Западной Осетии //Зап. Кавказского отдела РГО. 1893. Кн. 15. С. 51–90.
- Долгушин Л.Д., Евтеев С.А., Кренке А.Н., Рототаев К.П., Сватков Н.М.* О периодических и быстрых подвижках ледников и недавнем продвижении ледника Медвежьего на Памире //Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1964. № 5. С. 30–39.

*МГИ – Материалы гляциологических исследований.

- Духовской А.И.* Исследования Казбекских ледников: Суатиси, Мна, Орцвери, Абано, Чачского и ледника Кибиша Кистинского ущелья в 1909–1013 гг. // Изв. Кавказского отдела РГО. Тифлис, 1917. Т. XXVI. Вып. 1. С. 1–48.
- Ефремов Ю.В., Панов В.Д., Лурье П.М., Ильичев Ю.Г., Панова С.В., Лутков Д.А.* Орография, оледенение, климат Большого Кавказа: опыт комплексной характеристики и взаимосвязей. Краснодар: Изд-во Кубанского гос. ун-та. 2007. 338 с.
- Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Макиев В.Д., Мельков Д.А.* Интерпретация инструментальных данных процесса схода ледника Колка 20 сентября 2002 г. // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Владикавказ, 2014. С. 150–158
- Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Харебов А.К.* Анализ инструментальных записей схода ледника Колка по данным локальной сети сейсмических наблюдений // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2004. Т. 4. Вып. 3. С. 58–64.
- Запорожченко Э.В.* Ледник Колка и долина р. Геналдон: вчера, сегодня, завтра // Сборник науч. трудов ин-та «Севкавгипроводхоз». Пятигорск, 2003. С. 15–35.
- Запорожченко Э.В., Черноморец С.С.* История и изученность Казбекских завалов // Вестн. Кавказского горного общества. № 5. Пятигорск, 2004. С. 33–54, 159.
- Кисин И.М., Тертеров А.А.* Обвал ледника Муркар // Природа. 1961. № 2. С. 66–67.
- Ковалев П.В.* Современное оледенение Казбекско-Джигмарайского массива // Материалы Кавказской экспедиции (по программе МГГ). Харьков, 1961. Т. 3. С. 3–44.
- Кононова Н.К.* Исследования многолетних колебаний циркуляции атмосферы Северного полушария и их применение в гляциологии // МГИ. 2003. Вып. 95. С. 45–65.
- Корниенко С.Г., Ляшенко О.В., Гурбанов А.Г.* Выявление признаков очагового магматизма в пределах Казбекского вулканического центра по данным тепловой космической съемки // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2004. Т. 4. Вып. 3. С. 25–32.
- Котляков В.М., Асоян Д.С., Кононова Н.К., Осокин Н.И., Рототаева О.В.* Особенности катастрофических природных процессов на северном Кавказе на рубеже XX–XXI вв. // Изменение окружающей среды и климата. Т. 3. Опасные природные явления на поверхности суши: механизм и катастрофические следствия. М.: ИГ РАН, 2008. С. 190–209.
- Котляков В.М., Керимов А.М., Носенко Г.А., Носенко О.А., Рототаева О.В., Хмелевской И.Ф.* Оценка состояния ледников Колка и Майли по результатам наземного обследования в июне–сентябре 2003 г. // Сб. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». III науч.-практич. конф., октябрь 2003 г. // М.: УРСС, 2004. С. 136–143.
- Котляков В.М., Рототаева О.В.* Ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Природа. 2003. № 8. С. 15–23.
- Котляков В.М., Рототаева О.В., Десинов Л.В., Зотиков И.А., Осокин Н.И.* Катастрофические последствия грандиозной подвижки ледника Колка на Северном Кавказе // Изв. АН. Сер. геогр. 2003. №1. С. 45–54.
- Кузнецов И.Г.* Случай внезапного наступания одного ледника на Северном Кавказе весной 1925 г. // Вестн. Геологического Комитета. 1925. № 2. С. 3–5.
- Лебедева И.М., Рототаева О.В.* Климатический фактор подвижки ледника Колка на Кавказе в 2002 г. // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 155–161.

- Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Владикавказ, 2014. 429 с.
- Ледник Колка: снова катастрофа //МГИ. 2002. Вып. 93. С. 221–228.
- Мавлюдов Б.Р. Разрушение Геналдонского ледяного завала (Северная Осетия) в 2002–2006 гг. //Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 1. С. 68–79.
- Манукянц Э. Геналдонская катастрофа 2002 года. <http://pilgrim-andy.narod.ru/text/obval.html>. 2003.
- Муравьев Я.Д. Газовое извержение в цирке – возможная причина развития подвижек ледника Колка по катастрофическому сценарию //МГИ. 2005. Вып. 98. С. 44–55.
- Никитин М.Ю., Кристиан Хуггел, Мелисса Шварц, Гончаренко О.А., Галушкин И.В. Дешифрирование дистанционных материалов для реконструкции процесса обрушения ледника Колка. 1995 //http://www.info-terra.ru/kolka_ru.php
- Никитин С.А., Веснин А.В., Осипов А.В. Результаты радиолокационного зондирования пульсирующих ледников Кавказа и Памира. //МГИ. 2005. Вып. 99. С. 151–153.
- Обвал Геналдонского ледника //Ежегодник Кавказского горного общества за 1902, 1903 гг. Пятигорск. 1904. № 1. С. 61–66.
- Олюнин В.Н. К истории оледенения юго-востока горной части Кабардинской АССР. //Тр. Ин-та географии АН СССР. 1953. Т. 58. Вып. 10. С. 90–178.
- Опасные гидрометеорологические явления на Кавказе. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 288 с.
- Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 431 с.
- Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Лурье П.М. Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 г. //Метеорология и гидрология. 2002. № 12. С. 94–98.
- Пастухов А.В. Сообщение А.В. Пастухова об его восшествии на Казбек 29-го июля 1889 года //Изв. Кавказского отдела РГО. 1889–1891. Т. 10. Вып. 1. С. 134–145.
- Петраков Д.А., Дробышев В.Н., Алейников А.А., Аристов К.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Изменения в зоне Геналдонской гляциальной катастрофы в период 2002–2010 гг. //Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 1. С. 35–46.
- Поггенполь Н.В. По северным долинам Казбекского массива и первое восхождение на Майли-хох //Ежегодник Русского горного общества за 1903 г. 1905. Т. 3. С. 1–37.
- Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии //Криосфера Земли. 2003. Т. 7. № 1. С. 3–17.
- Преображенская М.П. Вокруг Казбека //Ежегодник Русского горного общества. 1904. Т. 2 за 1902 год. С. 56–77.
- Пхалагова Д. М. Химическая география вод и гидрогеохимия Центрального Кавказа. Орджоникидзе: ИР, 1976. 359 с.
- Рогожин Е.А., Гурбанов А.Г., Мараханов А.В., Овсяченко А.Н., Спиридонов А.В., Бурканов Е.Е. О соотношении проявлений землетрясений, вулканизма и катастрофических пульсаций ледников Северной Осетии в голоцене //Вестн. Владикавказского науч. центра. 2004. Т. 4. Вып. 3. С. 41–50.
- Россигов К.Н. Состояние ледников северного склона Центрального Кавказа. Отчет за 1893–94 г. //Зап. Кавказского отдела РГО. 1896. Кн. 18. С. 279–322.
- Роттаев К.П. Ледник Колка – факты и выводы //МГИ. 1974. Вып. 24. С. 109–116.

- Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н.* Исследование пульсирующего ледника Колка. М.: Наука, 1983. 169 с.
- Рототаева О.В.* Сведения о подвижках ледников на Северном Кавказе //Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. С. 215–223.
- Сейнова И.Б., Золотарев Е.А.* Ледники и сели Приэльбрусья: Эволюция оледенения и селевой активности. М.: Научный мир, 2001. 204 с.
- Спасательные работы в Дарьяльском ущелье //сайт 2014: <http://сухуму.livejournal.com/1546134.html#cutid1>
- Статковский Б.Н.* Исследования причин происхождения периодического Казбекского завала //Зап. Кавказского отдела РГО. 1879. Т. 9 (1876–1877). С. 24–31.
- Тавасиев Р.А.* О некоторых дискуссионных вопросах, связанных с катастрофическим сходом ледника Колка //Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Владикавказ, 2014. С. 272–283.
- Тавасиев Р.А., Галушкин И.В.* Каменно-ледовый обвал с горы Казбек 17 мая 2014 года //Вестн. Владикавказского науч. центра. 2014. Т. 14. Вып. 2. С. 43–45.
- Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А.* Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные //Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 4. С. 62–71.
- Хатисян Г.С.* Казбекские ледники в период с 1862 по 1887 г. //Изв. ИРГО. 1888. Т. 24. Вып. 5. С. 326–347.
- Цомаев В.Ш., Алиев И.А.* Современное состояние ледника Муркар //МГИ. 1987. Вып. 60. С. 152–155.
- 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.
- Черноморец С.С.* Новый «Казбекский завал» 17 мая 2014 года //Природа. 2014. № 7. С. 67–72.
- Черноморец С.С., Адцеев В.Г.* Ледниковая катастрофа – взгляд в прошлое //Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Владикавказ, 2014. С. 329–426.
- Штебер Э.А.* Ледниковые обвалы в истоках р. Геналдон на Кавказе //Терский сборник: Литературно-научное приложение к «Терскому календарю» 1903 г. 1904. Вып. 6. С. 233–248.
- Drobyshev V.N.* Glacial catastrophe of 20 September 2002 in North Ossetia //Russ. J. Earth. Sciences. 2006. V. 8. ES4004. doi:10.2205/2006ES000207.
- Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haeblerli 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.
- Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Desinov L.V., Zotikov I.A., Osokin N.I.*: Causes and effects of a catastrophic surge of Kolka Glacier in the Central Caucasus //Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie. 2004a. Bd. 38. Ht. 2. P. 117–128.
- 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. 2004b. V. 24. P. 78–83.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Взгляд в прошлое ледника Колка	11
Строение ледника	11
Подвижка ледника Колка в 1902 г. и сведения о более ранних событиях	15
Подвижка 1969 года	28
Кармадонская катастрофа 2002 года.	42
Об участии воды в сходе ледника	60
Новые вулканогенные проявления.	81
Активизация тектонических процессов	87
Отсутствие признаков пульсации ледника.	97
Причины катастрофы	103
Изменения в районе катастрофы в 2003–2014 гг.	111
Процессы восстановления ледника Колка	111
Вулканические проявления после катастрофы.	131
Состояние фронта ледника Майли.	137
Изменения в районе Кармадонской котловины	146
Подвижки ледников на Северном Кавказе	157
Пульсирующие ледники	157
Следы отдельных ледниковых подвижек.	162
Обвал на Девдоракском леднике.	169
Заключение.	175
Литература	180

Русское географическое общество
Штаб-квартира Русского географического общества в Москве
109012, Москва, Новая пл., 10, стр. 2
e-mail: rgo@rgo.ru
www.rgo.ru

ООО «Издательский дом «Кодекс»
г. Москва, Графский переулок, д. 9, стр. 2.

Отпечатано в ООО «М-КЕМ»
г. Москва, Графский переулок, д. 9, стр. 2.
Тел.: (495) 933-59-00