

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.324.65 (551.343)

РАЗРУШЕНИЕ ГЕНАЛДОНСКОГО ЛЕДЯНОГО ЗАВАЛА (СЕВЕРНАЯ ОСЕТИЯ)
В 2002–2006 ГОДАХ

Б.Р. Мавлюдов

Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия, bulatrm@bk.ru

Проведен анализ изменений Геналдонского ледяного завала, возникшего после гляциальной катастрофы, произошедшей 20 сентября 2002 г. в долине р. Геналдон в Северной Осетии, в 2002–2006 гг. По результатам полевых наблюдений 2003 и 2006 гг., анализа данных предыдущих исследований и аэроснимков установлено, что движение ледяного селя происходило в два этапа: после начала движения ледника произошел выброс дальней его части, которая через ледник Майли устремилась в долину Геналдона, увлекая за собой язык ледника Колка. Основная масса ледяного селя заполнила долину перед Кармадонскими воротами, а вторая порция льда отклонилась в сторону долины Кауридона. В течение первых четырех лет происходило интенсивное таяние ледяного завала, которое, несмотря на чехол моренных отложений толщиной около 0,6 м, имело скорости, сравнимые с таянием чистого льда. Причиной быстрого таяния ледяного завала стало интенсивное развитие ледникового карста под действием довольно теплых вод Геналдона. После 2006 г. началось замедление разрушения завала из-за выработки временного профиля равновесия реки. За разрушением льда в северной части завала и понижением базиса эрозии реки в будущем произойдет закономерное ускорение таяния ледяного завала.

Ледниковая катастрофа, ледник Колка, ледяной завал, ледниковый карст

GENALDON ICE BLOCKAGE DESTRUCTION (NORTHERN OSSETIA) IN 2002–2006

B.R. Mavlyudov

Institute of Geography, RAS, 119017, Moscow, Staromonetny per., 29, Russia, bulatrm@bk.ru

The analysis of changes in 2002–2006 of Genaldon ice blockage, which occurred after glacial accident in Northern Ossetia in 2002 September 20th, has been presented. From the results of field investigations of 2003 and 2006 and from the analysis of previous researches and aerial photographs it has been established that the movement of ice sell occurred in two stages: after the beginning of glacier movement there was an emission of a distant glacier part which moved through Glacier Majli tongue into Genaldon Valley and stimulated the movement of Kolka Glacier tongue. The main part of ice sell filled completely the Genaldon Valley before the Karmadon Gate and the second portion of ice deviated aside the Kauridon Valleys. During the first 4 years there was intensive melting of ice blockage. Despite of moraine debris cover with average thickness about 0.6 m the melting occurred with the intensity compared to one of the clean ice melting. The reason of fast melting of ice blockage was the intensive development of glacial karst due to the action of rather warm water of the Genaldon River. Since 2006 the retardation of the ice blockage destruction began due to the development of the temporary equilibrium river profile. In future after the destruction of ice in the northern part of blockage and the lowering of the river erosion basis natural acceleration of ice blockage melting will take place.

Glacial accident, Kolka Glacier, ice blockage, glacial karst

ВВЕДЕНИЕ

Осенью 2002 г. произошло трагическое событие – основная масса ледника Колка пришла в движение и, увлекая с собой воду и каменный материал, ринулась вниз по долине Геналдона. Ледяная масса сокрушала все на своем пути, прыгая с одного борта долины на другой. И только у Кармадонских ворот этот поток остановился. Водная со-

ставляющая потока была частично отжата в стороны, а другая часть продолжила движение в виде селевого потока, принесшего многочисленные разрушения и человеческие жертвы.

Геналдонской катастрофе посвящена обширная литература [Котляков, Рототаева, 2003; Поповнин и др., 2003; Васьков, 2004], в которой

детально анализируются хронология и версии случившегося: 1) инициация движения ледника обрушением на него огромной по объему каменно-ледяной массы со стены горы Джемарай в результате землетрясения [Полквой, 2002; Поповнин и др., 2003; Васьков, 2004; Заалишвили, Невская, 2004; Рогожин и др., 2004; Тутубалина и др., 2005; Черноморец, 2005; Петраков, 2008; Drobyshev, 2006]; 2) подвижка ледника Колка [Котляков, Ротомалева, 2003; Десинов, 2004; Котляков и др., 2004; Десинов, Котляков, 2005]; 3) метеорологические условия [Котляков, Ротомалева, 2003]; 4) вулканический (газовый) удар в верховьях ледника [Десинов, 2004; Муравьев, 2005; Бергер, 2007]; 5) подледниковый оползень [Поповнин и др., 2003]; 6) импактная подготовка ледника [Познанин, Геворкян, 2007]; 7) гидравлический удар [Познанин, 2008].

Со времени катастрофы прошло более семи лет. В настоящей статье рассмотрены некоторые аспекты формирования и разрушения ледяного завала в долине Геналдона.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В сентябре–октябре 2003 г. и в июле, сентябре 2006 г. были проведены маршрутные обследования ледяного завала, которые сопровождались описанием морфологии его поверхности: водотоков, промоин, котловин, ледяных обрывов, мест поглощения воды, озер и ледниковых пещер, а также собственно ледника Колка. Координаты и высотное положение отдельных точек на завале фиксировались при помощи GPS. При этом удалось зафиксировать большую часть периметра завала и сделать четыре поперечных сечения завала. Нанесение этих данных на карту, которая была составлена через месяц после катастрофы [Дробышев, Маклик, 2002], позволило установить величину понижения поверхности завала за период с 2002 по 2006 г. В некоторых случаях эту величину удавалось измерить непосредственно в поле, когда с помощью GPS фиксировались прежние и современные положения границы завала. Однако использование GPS в пределах завала, как и в других горных районах, часто было сопряжено с некоторыми трудностями: из-за высоких и скалистых бортов долины р. Геналдон границы видимости неба существенно сузились, в таких случаях прибор терял спутники из поля обзора. Это приводило к потере одной (высоты местности) или всех трех координат. По этой причине не удалось воспользоваться прибором для оконтуривания всей площади завала и произвести фиксацию многих запланированных точек в его северной части. В этой части завала на большем участке поперечного профиля пришлось пользоваться только плановыми координатами, а высота точек фиксировалась приблизительно по перепаду высот относительно уровня реки.

В июле 2006 г. мы применяли инфракрасный термометр Termpoint с оптическим разрешением 1:60 для бесконтактного измерения температуры воды в реках и водоемах в пределах завала, а также температуры поверхности льда. Погрешность измерений температуры составляла $\pm 0,5$ °C в диапазоне от -10 до $+50$ °C.

Для изучения изменения строения ледникового завала также использовались цифровые снимки, выполненные с вертолета в разные годы, которые были любезно предоставлены И.В. Галушкиным и С.А. Турловым.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Строение ледяного завала

В конце сентября 2003 г. завал представлял собой скопление разнородного материала, прибывшего из верховий долины и остановившегося перед ее сужением при прохождении Скалистого хребта (Кармадонские ворота). Завал занимал всю ширину долины реки от Геналдонских ворот в пределах высот 1200–1300 м. В 2003 г. водоток из верховьев долины существенно размыл верхнюю часть завала и уходил в завал примерно в 200–300 м от его верхнего края. Здесь образовалась котловина на месте первичного озера, возникшего сразу после формирования завала. Котловина была окружена с трех сторон (кроме западной) ледяными обрывами высотой 15 м и более. Вдоль края обрыва шли параллельные ледяной кромке трещины бокового отпора, по которым в котловину обрушивался лед, подмытый снизу водой реки [Мавлюдов, 2006]. Вниз по долине озерная котловина простиралась до селения Нижние Кони. В ней вдоль ледяного обрыва протекала река, которая в конце котловины уходила под ледяную стену.

Ледниково-подпрудное озеро, затопившее часть селения Горная Саниба, дренировалось сквозь завал на север. Пройдя некоторое расстояние вдоль борта долины, поток поворачивал на запад и попадал в озерную котловину, расположенную на месте прежней реки Геналдон. По широтному участку русла вода текла, пропилив лед на глубину около 10 м.

Сначала завал был довольно рыхлым, но через месяц после катастрофы лед уплотнился и поверхность завала понизилась на 10–30 м [Осокин, 2002]. Анализ состояния поверхности завала в 2003 г. показал, что в процессе таяния льда рельеф поверхности завала сильно выровнялся, поскольку вытаивающий изо льда моренный материал и валуны горных пород сползали по ледяным склонам в понижения рельефа, стремясь сгладить все неровности его поверхности.

В июле 2006 г. по сравнению с октябрём 2003 г. ледяной завал сильно изменился. Во-пер-

вых, произошло существенное понижение поверхности завала, особенно вдоль русла р. Геналдон. В северной части завала его поверхность понизилась более чем на 100 м, что соответствовало скорости понижения поверхности более 20 м/год.

Примерно половина площади завала в это время была занята руслами рек Геналдон и Кауридон, которые на всем своем протяжении прерывались небольшими по площади озерами (до 20–50 м²), часто оконтуренными грядами из крупных валунов. Возможно, эти гряды являлись следами заполненных валунами трещин во льду, которые в дальнейшем были спроектированы в русло после таяния льда до уровня реки. Остальная часть завала, расположенная вдоль правого борта долины, возвышалась над руслами рек примерно на 10–15 м. Обрывистый ледяной край завала летом 2006 г. был интенсивно изрезан трещинами, открытыми и замкнутыми котловинами от 20 до 200 м в поперечнике и с обрывистыми ледяными стенами высотой до 10–15 м (рис. 1). Полоса с котловинами протянулась от места впадения в

Геналдон реки Кауридон до места сужения долины там, где она прорывается через Скалистый хребет.

В сужении долины лед сохранился лишь в виде нашлапок на ее обоих бортах и, возможно, под руслом реки. Поскольку р. Геналдон тяготеет к орографически левому (западному) борту долины, именно здесь отмечалась наибольшая деградация льда. Самый распространенный процесс на обнажающихся ледяных склонах ледяного завала – псевдосолифлюкция, или оползание и стекание по крутым ледяным склонам насыщенного талой водой рыхлообломочного материала и камней, вытаивающих из льда и покрывающих ледяную поверхность. Этот процесс аналогичен криогенному оползанию на мертвых льдах Ямала [Лейбман, Кизяков, 2007]. При этом формировались небольшие по величине селевые потоки с объемом переносимой массы от долей до первых кубометров. Именно благодаря этому процессу крутые ледяные поверхности в течение длительного времени оставались обнаженными, несмотря на первоначально довольно большую мощность моренных отложений, перекрывающих лед. Длительная экспозиция льда при высокой температуре воздуха и солнечной инсоляции способствовали быстрой абляции, а наличие во льду песчано-глинистого материала существенно уменьшало альбедо ледяных поверхностей, усиливая их таяние. Ускоряли таяние льда на склонах также вертикальные трещины, расположенные параллельно руслу реки. Происходило это за счет увеличения поверхности соприкосновения чистого льда с теплым воздухом. Вероятно, это один из видов трещин отседания на крутых ледяных склонах.

Южная часть завала имела сравнительно плоскую поверхность и подпирала русловые отложения р. Геналдон, из-за чего выше завала русло реки имело плоскую форму, изобилующую речными протоками. Видимо, река сгружала здесь большую часть взвешенных и влекомых отложений. О том, что в южной части завала еще сохранился лед, свидетельствовали провальные воронки, которые формировались вдоль правого борта речного русла и поглощали воду реки. Диаметр воронок достигал 15–20 м.

О наличии льда в южной части завала говорят и быстрое разрушение временного моста через р. Геналдон, и многочисленные трещины в моренных отложениях в восточной части завала. Судя по расчистке дороги и глубине трещин, толщина слоя моренных отложений в южной части завала превышала 1,5–2,0 м.

Река из оз. Горная Саниба летом 2006 г. текла в довольно узкой долине шириной не более 50 м (высота бортов около 10–15 м). Левый ледяной борт долины был обрывистым, поскольку его подмывала река с довольно теплой водой, формируя

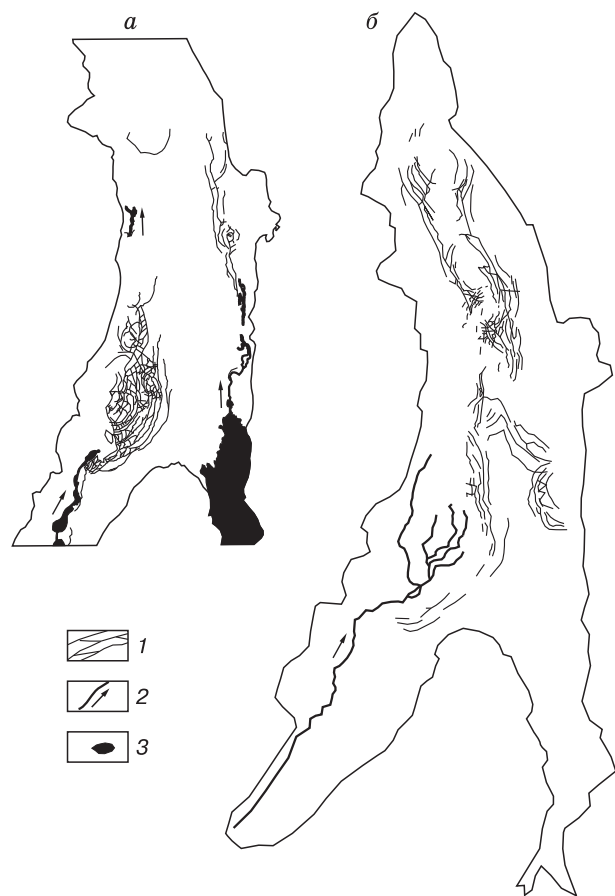


Рис. 1. Трещины просадок на ледниковом завале 26.06.2003 г. (а) и 7.07.2004 г. (б).

1 – трещины; 2 – водотоки и направление течения воды в них; 3 – озера.

ниши в основании обрыва. Оседание и обрушение льда над этими нишами приводило к формированию трещин отседания в ледяной толще и трещин бортового отпора, расположенных вдоль ледяного обрыва. При этом толщина моренного покрова на льду, как правило, не превышала 0,5 м. С обрывов обломки морены соскальзывали вниз, накапливаясь в основании обрывов или заполняя раскрывшиеся трещины отседания.

Обследование завала в конце сентября 2006 г. показало, что даже за достаточно короткий (около 80 дней) летний период (с 10 июля по 1 октября 2006 г.) произошли значительные изменения в его строении. Изменения касались как отдельных форм рельефа (воронки, котловины, оплывины), так и положения и строения ледяных обрывов, основных речных долин и мест поглощения воды в пределах завала. Некоторые воронки вдоль русла р. Геналдон в южной части завала расширились, и озера в них стали более мелкими, другие заилились и перестали поглощать воду. Одни котловины сгладились и стали менее резко выраженными, а другие, наоборот, углубились и расширились. Уменьшилось количество ледниковых пещер и мест поглощения воды под лед, но возросло количество зияющих трещин, особенно в северной части завала. Криогенное оползание на склонах завала продолжало так же интенсивно перемещать моренный материал в русло р. Геналдон, обнажая ледяные поверхности завала, что способствовало их более интенсивному таянию.

Многие ледяные обрывы, протянувшиеся вдоль всего завала, за это время отступили к востоку, в результате чего речные долины в пределах завала расширились, что, в частности, относится к реке, текущей из оз. Горная Саниба. Если в июле 2006 г. эта река представляла собой в основном русло с текущей на северо-запад водой с немногочисленными озерными бассейнами, то в конце сентября 2006 г. текущей воды почти не стало видно, зато все дно долины было занято полосой примыкающих друг к другу озер, вытянутых вдоль линии течения воды. Размеры озер колебались от 2–5 до 100 м, но преобладали озера 50 × 50 м. Озера были связаны небольшими протоками, но большая часть воды фильтровалась между валунами и глыбами горных пород. Формирование озер, по-видимому, было связано с протаиванием льда завала в дне долин. За последующие три года ситуация принципиально не изменилась.

В результате таяния льда край активного завала (т. е. завала, содержащего лед) снизился по сравнению с 2002 г. на 10–20 м по всему его периметру (рис. 2). Причиной такого быстрого разрушения льда явилось интенсивное развитие ледникового карста, формированию которого способствовали как высокие температуры воздуха (среднелетняя температура здесь около 16 °С

[Роттаев и др., 1983]), так и высокие температуры воды в реках Саниба и Геналдон (около 10–12 °С по измерениям в июле 2006 г.).

По сравнению с июлем 2006 г. произошло изменение руслового стока р. Геналдон в северной

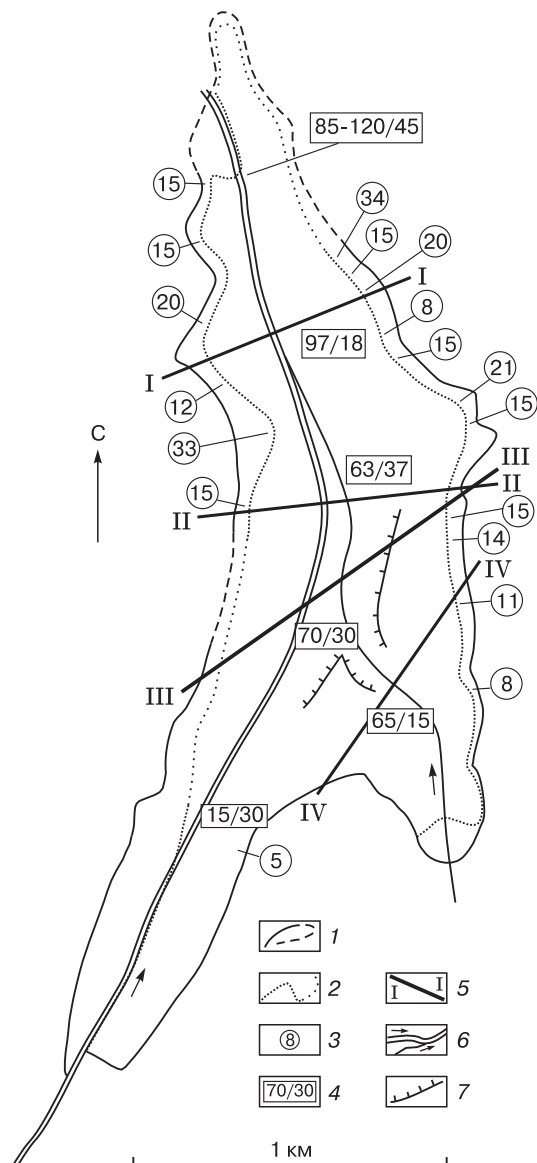


Рис. 2. Изменение Геналдонского ледникового завала с 2002 по 2006 г.

1 – внешний контур завала (сплошная линия – по результатам измерений, штриховая – по аэроснимкам); 2 – контур ледяного завала в октябре 2006 г. (густые точки – по результатам измерений, разреженные точки – по аэроснимкам); 3 – разница высот (м) контуров 2002 и 2006 гг. (для края ледяного завала); 4 – числитель – разница высот (м) поверхности 2002 и 2006 гг. (в средней части ледяного завала), знаменатель – толщина (м) слоя оставшегося льда; 5 – положение поперечных профилей через ледяной завал и их номера; 6 – водотоки и направление течения воды в них; 7 – ледяные обрывы в 2006 г.

части завала. Если в июле р. Геналдон уходила под лед еще на расстоянии нескольких сотен метров до входа в транспортный туннель, то осенью 2006 г. река текла прямо в туннель, причем все ее течение происходило по поверхности завала. Это означает, что в северной части завала уровень русла р. Геналдон был всего на несколько метров выше прежнего (на величину превышения между прежним руслом и верхней частью транспортного туннеля). В то же время сквозное течение реки по ущелью р. Геналдон, минуя туннель, отсутствовало. Поскольку туннель перехватил сток всей реки Геналдон, это не способствовало развитию ледникового карста в самой северной части ледяного завала на узком участке ущелья (между двумя входами в транспортный туннель). Именно поэтому в данной части русла сохранился массив льда с видимой толщиной до 30 м, который стеной перегородивал самую узкую часть долины, как бы направляя воды реки в туннель. Поскольку эта ледяная плотина просуществовала по крайней мере до 2009 г., сечение туннеля оказалось достаточным для того, чтобы пропускать паводковые волны р. Геналдон.

Средняя толщина моренного чехла в пределах ледяного завала оказалась незначительной – около 0,6 м. Это позволило оценить содержание моренного материала во льду в северной части завала примерно в 1 % или менее. Таким образом, более правильно называть Геналдонский завал ледяным завалом с вкраплениями каменного материала, а не каменно-ледяным или ледово-каменным. Ранее предполагалось, что содержание каменного материала в завале достигает 30 % [Машуков и др., 2008] или 20–30 % [Никитин и др., 2007]. По данным прямых измерений на ледяном завале [Буньков и др., 2007] выяснено, что местами при стаивании 100 м ледяного завала толщина моренного

чехла доходила до 5 м, т. е. максимальное (локальное) содержание обломочного материала в ледяном завале не превышало 5 %. По оценкам из работы [Evans et al., 2009], плотность материала завала составляла 1000 кг/м^3 , что близко к плотности чистого льда.

В целом говорить о количестве моренного материала на поверхности завала достаточно трудно. Дело в том, что разрушение завала сопровождалось активным перемещением, перераспределением и перемывом больших масс первично моренного материала.

Измерения температуры

Для выяснения условий и особенностей таяния ледяного завала была выполнена серия замеров температуры воды и других сред при помощи дистанционного инфракрасного термометра (табл. 1).

Важным результатом измерений оказалось то, что летом в дневное время вода р. Геналдон приходит в ледяной завал нагретой до довольно высокой температуры (10–13 °С). Это, по-видимому, связано с нагреванием воды солнечными лучами во время ее движения по долине. Этому способствует также высокая мутность воды. Несмотря на высокую температуру воды в некоторых верхних горячих источниках (до 54 °С), их вклад в нагревание воды в р. Геналдон практически незаметен. Во всяком случае, измерение температуры воды в р. Геналдон до впадения воды из горячих источников и после их впадения в октябре 2003 г. не показало никакой разницы.

Поскольку вода в средней части завала в период исследований не контактировала со льдом, так как текла по толстому слою русловых и озерных отложений, то ее температура слабо менялась по длине завала. К тому же вода нагревалась на

Таблица 1. Значения температуры, измеренные инфракрасным термометром

№ п/п	Дата	Время	Местоположение	Температура, °С	Примечания	
1	29.06.2006	17.45	Выход воды из завала через туннель	8,5–9,0	Расход потока около $10 \text{ м}^3/\text{с}$	
2	30.06.2006	12.45	Вода в р. Геналдон у моста в верховьях завала	13,2		
3	30.06.2006	20.45	Вода в р. Геналдон у моста в верховьях завала	10,5	Расход потока 30 л/с	
4	01.07.2006	16.00	Вода в р. Геналдон, не доходя 2 км до верхних горячих источников	6,0–6,3		
5	06.07.2006	13.30	Вода в р. Геналдон у моста в верховьях завала	12,2		
6	06.07.2006	14.00	Река из оз. Горная Саниба в пределах завала	9,3–9,4		
7	06.07.2006	14.20	Река Геналдон в середине завала	10,3		
8	06.07.2006	14.30	Небольшой отток р. Геналдон в завал	11,0		
9	06.07.2006	15.00	Поверхность льда черного цвета с мелкими обломками камней*	1,0–1,4		
10	06.07.2006	15.10	Внутри ледникового грота	1,0		В 10 м от входа
11	06.07.2006	15.20	Поверхность крупных камней на завале*	20,0		
12	06.07.2006	18.50	Вода в р. Геналдон у моста в верховьях завала	6,7		

* В пасмурную погоду.

солнце в озерных котловинах, что способствовало большой интенсивности внутренней абляции в завале. Высокая температура воды на выходе из туннеля свидетельствовала о том, что вода основного потока р. Геналдон, проходя через завал в июле 2006 г., уже мало контактировала со льдом. Это означало, что она выработала во льду завала вполне устойчивый канал. С октября 2006 г. контакт воды основного русла реки со льдом вообще исключался, поскольку она текла по поверхности завала прямо в транспортный туннель.

Можно приблизительно оценить вклад воды в таяние льда завала. Предположим, что все тепло, теряемое водным потоком в пределах завала, шло на таяние льда. Примем следующие значения для водного потока: средний расход около $15 \text{ м}^3/\text{с}$, начальная температура воды перед завалом $12 \text{ }^\circ\text{C}$, ее температура на выходе из завала $9 \text{ }^\circ\text{C}$. В этом случае поток реализует в завале тепла около $3919 \cdot 10^6 \text{ ккал/сут}$. Это соответствует таянию $49,18 \cdot 10^6 \text{ кг}$, или $49,18 \cdot 10^3 \text{ т}$ льда в сутки, что приблизительно равно убыли $53,6 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ льда в сутки, или $10,7 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ льда за лето, или $43 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ льда за 4 года. Это примерно 39 % от полного объема завала.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование ледяного завала

Как сказано выше, еще нет единого мнения о причинах произошедшей катастрофы. После посещения ледника в 2003 и 2006 гг. у автора сложилось следующее представление о хронологии событий. Вероятность прямой инициации движения ледника при обвале каменного уступа не очень велика. Сами авторы этой версии [Полквой, 2002; Поповнин и др., 2003] говорят, что со времени обвала до начала подвижки прошло около 8 ч, поэтому обвал не может считаться непосредственной причиной события. Какова истинная причина катастрофы, мы до сих пор не знаем.

Версия такой инициации плохо согласуется с последующими событиями. Дело в том, что выброс вещества из котловины происходил не одновременно, а в течение нескольких этапов. Мы можем выделить два этапа события, но некоторые исследователи выделяют три [Никитин и др., 2007]. По нашему мнению, в течение первого этапа произошло движение языка ледника Колка, который существенно выдвинулся вперед. Поскольку долина Колки перед поворотом на север сильно сужается, переходя в ущелье, это замедлило движение льда, таким образом несколько подпрудив дальнейшее движение ледника. Вероятно поэтому, вторая волна, причина возникновения которой пока точно не известна, несколько изменила направление движения и прошла через язык ледника Майли. При этом поток через Майли дал выброс ледяного материала через гребень правой морены

этого ледника, а также оставил нашлапку льда на склоне правой морены ниже ее гребня (она еще была видна в 2003 г.). Движение второго потока, видимо, активизировало и прохождение первого потока льда через ущелье Колки. Таким образом, движущийся материал центральной части ледника Колка обогнал материал языка ледника, который прибыл к завалу через некоторое время уже второй волной. Подтверждением такого порядка событий является строение пути движения потока. При этом понятно, что прохождение второй волны ледяного селя было бы невозможно, если бы долина перед языком ледника Колка не была заполнена льдом. К аналогичным выводам можно прийти, анализируя схему дешифрирования долины р. Колка, приведенную в работе [Никитин и др., 2007].

Картина, которую можно было увидеть на первых фотографиях, сделанных после выброса ледника Колка, подтверждает сказанное. Например, “ригель Десинова” (поперечная ледяная гряда, прикрытая моренным материалом, которая сначала считалась ригелем [Десинов, 2004; Дробышев, 2006]) представляет собой бровку отрыва льда языка ледника Колка, движение которого было стимулировано прохождением второй волны – ледниковым селем. Ошибочным является мнение о том, что ледник Колка после выброса оставил за собой ложе, свободное ото льда. Интенсивное развитие ледникового карста на бывшем ложе ледника Колка, отмеченное в 2006 г., свидетельствовало о присутствии здесь слоя льда толщиной в несколько метров.

Подтверждение наличия двух волн ледяного селя можно найти и на правом борту долины Геналдона в районе курорта Кармадон. На фотоснимках отмечаются, как минимум, два потока: один более интенсивный, другой – менее.

Судя по аэрофотоснимку завала, сделанному 21.09.2002 г. сразу после подвижки (рис. 3), волн



Рис. 3. Перспективный аэроснимок ледникового завала от 21.09.2002 г. (И.А. Галушкин).

поступления материала в завал также было две. По-видимому, первая волна ледяного селя шла практически непрерывно. Это привело к тому, что после удара и торможения у Кармадонских ворот селевая масса по мере поступления стала изгибаться в виде синусоиды (как зубная паста, выдавливаемая из тюбика), заполняя расширение долины Геналдона. В результате прибывшая масса ледяного селя практически полностью заполнила всю котловину. Последняя волна ледяного селя запечатлелась в завале потому, что она, дойдя до уже остановившейся основной массы, не смогла продвинуть ее вперед и в результате была отжата к востоку в сторону селения Горная Саниба (рис. 4). Именно эта последняя волна дополнительно под-

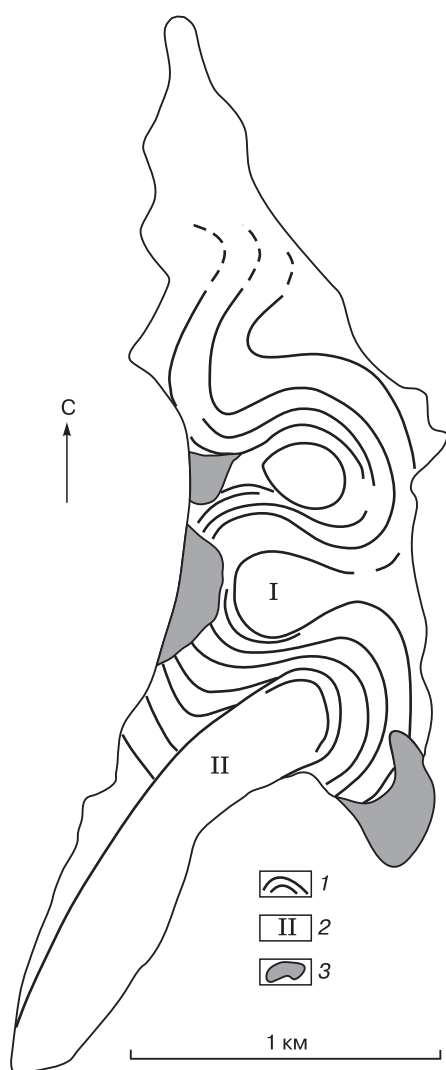


Рис. 4. Контуры потока ледяного селя, выявленные в пределах ледяного тела Геналдонского завала по снимку от 21.09.2002 г.

1 – структурные элементы селевого потока, 2 – фазы селевого потока, 3 – озера.

прудила долину Кауридона, создав предпосылки для формирования оз. Горная Саниба. Синусообразное изгибание тела селевого потока вызвало неравномерное распределение заплесков илистого материала по бортам котловины перед Кармадонскими воротами. А внедрение второй волны вызвало формирование внутренних напряжений в толще ледяного завала, а также появление надвигов, трещин и сбросов. К похожему заключению пришли и другие исследователи [Никитин и др., 2007], но они в пределах завала выделили три этапа: генальский (начальный, фронтальный), канинский (основной, центральный) и санибанский (финальный, тыловой).

Первичное строение селевого потока по структуре завала восстановить трудно. Есть довольно много свидетельств того, что в потоке было достаточное количество воды. Это видно по механике движения потока (в том числе его перемещение через ледник Майли), по заплескам моренного материала и жидкой грязи за боковые морены в верховьях р. Геналдон, по выплескам жидкой грязи на дорогу, которые были еще хорошо видны осенью 2003 г., по илисто-глинистым отложениям в северо-восточной части завала вдоль крутого склона, содержащим в большом количестве плавучие материалы (доски, бревна, деревянные рамы, щепки), а также по насыщенной водой селевой массе, отжатой из завала в момент его остановки.

По имеющимся данным, в теле ледника Колка перед катастрофой должно было накопиться не менее $11 \cdot 10^6$ м³ воды [Божинский, 2006], т. е. около 10 %. Как была распределена вода в потоке, с определенностью сказать трудно [Познанин, Геворкян, 2009]. При прохождении потоком участка от языка Колки до языка Майли и в районе языка ледника Майли в его основании был лед. На это указывает: наличие штрихованных и полированных камней в долине р. Колка и ниже языка ледника Майли (это не мог сделать водный поток); наличие полосы скопления льда ледника Колка в тени левой морены ледника Майли (ширина до 50 м, длина более 150 м, толщина у края ледника Майли до 20 м, по оценке в сентябре 2006 г.).

Возможное разделение потока на рукава, когда он пересекал левую морену ледника Майли, свидетельствует о небольшой толщине потока. Чтобы произошел выплеск материала селевого потока за правую боковую морену ледника Майли, нужны были очень веские побудительные причины, которые до сих пор неизвестны.

Таким образом, основа селевого потока была ледяной, о чем говорит малое содержание обломков горных пород во льду завала (местами они полностью отсутствуют). Лед в потоке был представлен: 1) массивами чистого льда с закругленными углами до нескольких десятков метров в

поперечнике (возможно, это первичный ледниковый лед); 2) льдом черного цвета с довольно большим количеством обломков, до 5–10 % (вторичный лед, возникший из песчано-обломочно-ледяной смеси), часто такой лед заполнял пространство между глыбами чистого льда; 3) таким же льдом, но с окатанными обломками чистого льда диаметром до 10 см (пятнистый лед). Обломки горных пород переносились, видимо, не только внутри массы завала, но и на его поверхности. Об этом свидетельствуют следы захлестов материала через гребни морен (левую ледника Колка, правую ледника Майли), захлесты на дорогу вдоль левого борта по трассе прохождения потока.

Первоначальный объем завала оценивался в 110 млн м³, площадь – в 2,2 км², максимальная мощность достигала 160 м [Буньков и др., 2007]. По другим данным, объем завала составлял (115 ± 10) млн м³, площадь – 2,1 км², средняя мощность – 60 м [Поповнин и др., 2003] или 110–120 млн м³ [Котляков и др., 2003].

Разрушение завала

Предполагалось, что тело завала в Кармадонской котловине будет таять длительное время [Поповнин и др., 2003]. По мнению авторов этой работы, дольше всего мертвые льды должны были сохраниться в осевой части долины, между селением Нижние Кани и Кармадонскими воротами, где толщина льда в завале наибольшая. Расчеты показали, что если бы тело завала состояло из чистого льда, то оно могло бы растаять за 7–8 лет. В реальности этот процесс должен был идти гораздо медленнее из-за бронирующего эффекта обломочного материала на поверхности льда. Толщина этого материала при постоянном вытаивании изо льда и просадках должна была увеличиваться, со временем усиливая эффект экранирования и тем самым сводя все к нестационарной задаче. Согласно опыту решения подобных задач [Bozhinskiy et al., 1986], процесс полного стаивания льда в Кармадонской котловине должен был растянуться на несколько десятков лет. Предполагалось, что этот срок может быть сокращен деятельностью водотоков и уже к лету 2003 г. оформятся пути стока рек Геналдон и Кауридон через тело завала. Южная часть завала, как предполагали, будет разрушаться быстрее из-за термоэрозии водами р. Геналдон [Поповнин и др., 2003]. Участок открытого русла р. Геналдон должен был удлиняться от пос. Кармадон вниз по долине. В районе Кармадонских ворот сток еще какое-то время должен был проходить по подледным каналам.

Известно, что под действием ледникового карста пассивные языки ледников могут быстро разрушаться [Мавлюдов, 2005]. Интенсивное развитие ледникового карста привело к тому, что Ге-

налдонский завал разрушался гораздо быстрее, чем предполагали, так как таяние льда завала происходило и с поверхности, и изнутри.

При этом произошло сильное понижение поверхности завала и некоторое сокращение его площади. Проявилась также отчетливая асимметрия завала в поперечном разрезе: восточный борт в средней части завала примерно на 30–35 м выше левого. Это связано не столько с кинематикой формирования завала, сколько с развитием ледникового карста, воздействие которого началось от левого борта долины и постепенно переместилось к правому борту. Здесь сохранилась слабо разрушенная часть ледяного завала.

Уплотнение льда завала привело к тому, что подледный сток стал меньше поверхностного. Основной сток р. Геналдон шел по поверхностному руслу и по границе льда и левого склона долины. При этом сток проходил не по поверхности льда, а по мощному слою русловых отложений, лежащих на льду.

Таяние льда

Завал с поверхности был прикрыт моренным чехлом, который существенно тормозил таяние льда. Интенсивность абляции уменьшалась по экспоненциальному закону во времени по мере роста толщины моренного чехла [Ходаков, 1978; Коновалов, 1979]. При средней летней температуре воздуха на вершине завала около 16 °С суточная величина таяния чистого льда составляла около 11,2 см/сут. Считая температуру равномерной в течение всего периода абляции (около 7 месяцев), получим скорость понижения поверхности завала из чистого льда – около 23,5 м/год, или 94 м за 4 года. В 2003 г. средняя толщина моренного чехла на завале не превышала 0,2–0,3 м, а в 2006 г. – 0,6 м. Под слоем морены толщиной 0,6 м скорость таяния льда составляет 1,1 м в год, или 4,4 м за 4 года, а под слоем морены толщиной 0,3 м – 2,2 и 8,8 м соответственно [Потомтаев и др., 1983]. Поскольку в действительности за 4 года в северной части завала стаяло от 80 до 100 м льда (т. е. в 10–20 раз больше), это означает, что основное разрушение льда завала приходилось на долю ледникового карста, который многократно усиливал таяние заморенного льда.

Ледниковый карст

В южной части завала, где толщина моренного чехла поверх льда более 2 м, скорость таяния льда не должна была превышать 0,7 м/год или же таяние не происходило совсем [Ходаков, 1978; Коновалов, 1979]. Однако поверхность завала даже при такой толщине морены постоянно изменялась. В разных местах в теле завала возникали провалы диаметром до 10–20 м, заполненные или не запол-

ненные водой, рытвины, котловины, просадки и трещины. Все это говорит об активных процессах, происходивших под толщей моренных отложений. Мы связываем это с развитием ледникового карста [Мавлюдов, 2005, 2006; Mavlyudov, 2006].

Развитие ледникового карста на Геналдонском завале было обусловлено: 1) ослаблением поверхностной абляции за счет роста толщины моренного чехла; 2) наличием неоднородностей и трещин во льду завала; 3) протеканием достаточно крупного транзитного водного потока (река Геналдон с притоками со средним летним расходом около $15 \text{ м}^3/\text{с}$ [Рототаев и др., 1983]); 4) особенностью строения ложа завала, представляющего собой выровненную поверхность, что позволило водному потоку блуждать внутри ледяной толщи из стороны в сторону, разрушая ее сплошность.

Обнаженные ледяные склоны и стенки ледяных обрывов, на которых отмечалась поверхност-

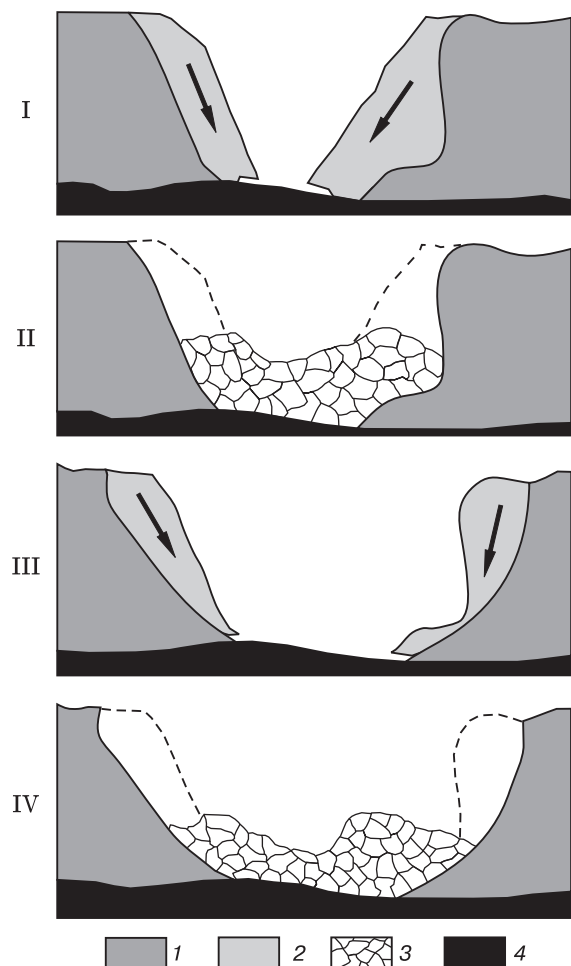


Рис. 5. Стадии формирования котловин ледникового карста [Мавлюдов, 2006].

1 – устойчивый лед; 2 – неустойчивый лед; 3 – обрушения льда; 4 – подстилающие породы, моренные отложения или лед.

ная абляция и псевдосолифлюкция, занимали лишь ничтожную часть поверхности завала (не более 10–15 %). Остальная часть завала была покрыта достаточно толстым слоем моренных отложений, препятствующих свободному таянию льда. Поэтому основным агентом разрушения завала была внутренняя абляция или, другими словами, ледниковый карст.

Интенсивность развития ледникового карста в пределах завала определялась в первую очередь высокой температурой воды, контактировавшей со льдом. Достаточно теплая вода подплавляла основание ледяных обрывов, что вызывало обрушение льда и способствовало разделению ледяного массива на фрагменты. Это приводило к увеличению площади поверхности обнаженного льда и усилению поверхностной абляции, а также к появлению замкнутых и разомкнутых котловин, в которые происходило обрушение льда по кольцевым трещинам (рис. 5). Обрушившийся лед быстро таял в воде потоков и озер, которые вдобавок хорошо прогревались на солнце.

Проявлениями ледникового карста являются также каналы ледниковых пещер, которые иногда прорезали тело завала и служили путями перетока воды между котловинами или являлись участками расширенных абляцией трещин. К формам ледникового карста относятся также воронки, упомянутые выше, и озера на поверхности ледяного завала.

По приблизительным оценкам, развитие ледникового карста в теле завала ускоряло его таяние от нескольких до десятков раз по сравнению со льдом, покрытым моренным чехлом, и делало скорость его разрушения сравнимой со скоростью разрушения завала, сложенного чистым льдом.

Усиление процессов разрушения льда ледниковым карстом происходило и в прошлом. Об этом свидетельствует история разрушения завала в 1902 г. и языка ледника Колка после подвижки 1969–1970 гг. Если в первом случае завал разрушился за 12 лет, то и во втором случае потребовалось бы около 12 лет для разрушения основной массы льда выдвинувшегося ледника (по расчетам В.Г. Ходакова, на это было необходимо более 30 лет [Рототаев и др., 1983]). Однако, по утверждению очевидцев, часть ледникового льда после подвижки 1969–1970 гг. сохранялась до конца 1980-х гг. (в течение примерно 20 лет после подвижки). А именно, сохранялись вертикальные стены льда вдоль правого борта долины р. Геналдон вблизи языка ледника Майли, которые не были вовлечены в процессы развития ледникового карста.

Интенсивность разрушения завала

Первоначальная площадь завала в долине р. Геналдон составляла $2,1 \text{ км}^2$, а его объем оцени-

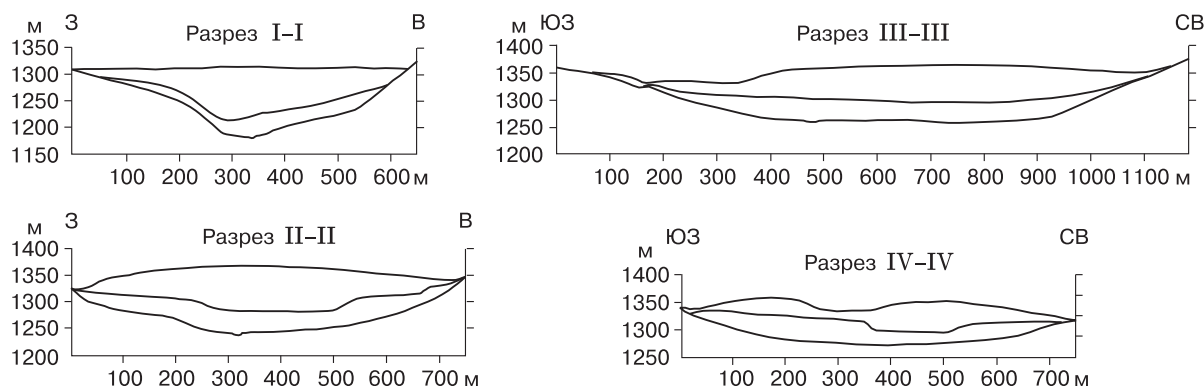


Рис. 6. Поперечные профили через Геналдонский ледяной завал (расположение см. на рис. 2).

Верхняя граница – поверхность завала в 2002 г., нижняя – основание завала (границы взяты с карты [Дробышев, Макликов, 2002]), средняя граница – поверхность ледникового завала в октябре 2006 г.

вался в 110 млн м³ [Гляциальные процессы..., 2006]. По тем же данным, к концу сентября 2005 г. площадь завала сократилась до 1,2 км² (уменьшилась на 45 %), а объем – до 29 млн м³ (на 74 %). С 2006 г. и позднее сокращение размеров завала продолжилось. По другим данным, к 2006 г. завал потерял 72 % объема, а к 2007 г. завал сократился до 1,4 км², потеряв около 40 % площади и 74 % объема [Буньков и др., 2007].

По нашим данным, изменения площади завала с 2002 по 2006 г. оказались не столь большими, как об этом сообщается в работах [Гляциальные процессы..., 2006; Буньков и др., 2007]. Мы можем оценить сокращение площади завала за этот период на 15–20 %.

Величина понижения поверхности завала различается в разных его частях. Обход завала почти по всему периметру показал, что снижение его поверхности вдоль края менялось от 5–8 м в северной части до 12–20 м в средней и южной частях завала. На участках заплесков моренного материала на склоны точно установить реальный край завала было невозможно, и потому полученные значения (до 35 м) были отбракованы. Средняя максимальная величина понижения поверхности завала на его краях не превышала 20 м, увеличиваясь с севера на юг.

Остаточная мощность льда в завале на конец 2005 г. была еще существенной [Гляциальные процессы..., 2006]: в южной части завала она составляла около 50 м, в средней части завала (на широте селения Нижние Кани) – 25–30 м, на севере – 10–15 м.

Оценивая перепады между верхней и видимой нижней частью завала по четырем профилям, выполненным при помощи GPS на завале в 2006 г. (рис. 6), мы можем утверждать, что на конец 2006 г. в южной части завала сохранилось около 50 м льда, в средней – от 35 до 40 м, а в северной

части – от 15 до 40 м льда. Эти расчеты базируются на наших данных и рельефе поверхности ледяного завала, приведенной на плане масштаба 1:10 000, выполненном инструментальными методами сразу после катастрофы [Дробышев, Макликов, 2002].

Прогноз на будущее

За время существования ледяного завала его объем сильно уменьшился. Динамика уменьшения объема завала приведена в табл. 2 [Гляциальные процессы..., 2006; Буньков и др., 2007]. Как видим, в начале 2006 г. объем завала составил менее четверти первоначального значения. Экстраполяция данных табл. 2 свидетельствовала, что полное таяние льда завала должно завершиться к 2010 г. [Гляциальные процессы..., 2006]. Наши наблюдения показали, что за 4 года после катастрофы было разрушено примерно две трети объема завала. Однако в последующие годы интенсивность таяния льда в пределах завала стала замедляться, что привело к удалению из отчетов оценок времени полного завершения таяния завала [Буньков и др., 2007]. По-видимому, в дальнейшем интенсивность таяния льда в завале будет продолжать падать, тем более что поверхность завала уже стала местами

Таблица 2. Изменение объема каменно-ледяного завала [Гляциальные процессы..., 2006]

№ п/п	Дата измерений	Объем завала, млн м ³
1	20.09.2002	110
2	01.01.2003	100
3	01.01.2004	60
4	01.01.2005	42
5	01.01.2006	27(35)
6	01.01.2007	(30)

Примечание. В скобках приведены данные из работы [Буньков и др., 2007].

покрываться кустарниковой и травянистой растительностью (Е.А. Белановская, устное сообщение, 2009). По нашему мнению, если не вмешаются какие-либо дополнительные факторы, основное тело завала будет разрушено через несколько лет, но еще на протяжении 10–15 лет будет происходить таяние отдельных обособленных массивов мертвого льда на бортах долины, как это наблюдалось при таянии ледника Колка после подвижки 1969 г. Это будет период длительный, поскольку в таянии льда не будут участвовать водные потоки. Сказанное выше согласуется с другими оценками [Петраков и др., 2004]. В то же время некоторое ускорение процесса разрушения ледяного завала может произойти после ликвидации ледяного барьера, расположенного между входами в транспортный туннель. В этом случае базис эрозии р. Геналдон несколько понизится, и лед, захороненный под русловыми отложениями в пределах завала, вновь начнет активно разрушаться водными потоками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования 2003–2006 гг. показали, что ледяной завал в окрестностях пос. Кармадон быстро таял под действием интенсивно развивающегося ледникового карста, который ускорял разрушение мертвого льда в несколько раз по сравнению со льдом под чехлом морены. Можно предположить, что через несколько лет завал в основном растает, хотя отдельные массивы льда на бортах завала, которые находятся вне зоны действия водных потоков, могут сохраняться еще в течение 10–15 лет. Выяснено, что формирование завала происходило в течение двух этапов. Несмотря на многочисленные версии [Поповнин и др., 2003; и др.], до сих пор нет полной ясности о причинах Кармадонской катастрофы.

Автор выражает благодарность И.В. Галушкину (НПП “ИнфоТЕРРА”) и С.А. Турлову (ГУП РЦ “Севосетингеоэкомониторинг”) за предоставленные фотоматериалы по ледяному завалу в долине Геналдон.

Литература

- Бергер М.Г.** Ледник Колка: катастрофа 20 сентября 2002 года – внезапный газодинамический выброс ледника. М., Изд-во ЛКИ, 2007, 248 с.
- Божинский Н.И.** Статистическое моделирование гравитационных лавинных потоков // Материалы гляциол. исслед., 2006, вып. 100, с. 87–94.
- Буньков Ю.Д., Грунина Т.В., Турлов С.А.** Ведение государственного мониторинга состояния недр территории Республики Северная Осетия–Алания за 2005–2007 гг.: Отчет. Владикавказ, ГУП “Севосетингеоэкомониторинг”, 2007, 199 с.
- Васьков И.М.** Возможный механизм обвала и динамика движения ледово-каменных масс в верховьях р. Геналдон (на Центральном Кавказе в сентябре 2002 г.) // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 2, с. 34–45.
- Гляциальные процессы** // Информационный бюллетень о состоянии геологической среды на территории РСО–Алания за 2005 г. Владикавказ, 2006, с. 80–84.
- Десинов Л.В.** Пульсация ледника Колка в 2002 г. // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 72–87.
- Десинов Л.В., Котляков В.М.** Ледник Колка в 2002 году: от активизации до катастрофы // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 98, с. 146–154.
- Дробышев В.Н., Макликов В.В.** Топографический план поверхности ледникового тела в Кармадонском ущелье. М-б 1:10 000. Владикавказ, СЕВОСГЕОЭКО, 2002.
- Заалишвили В.Б., Невская Н.И.** Взаимосвязь различных факторов, в том числе сейсмических событий, со сходом ледника Колка 20 сентября 2002 года // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 51–57.
- Коновалов В.Г.** Расчет и прогноз таяния ледников Средней Азии. Л., Гидрометеиздат, 1979, 232 с.
- Котляков В.М., Рототаева О.В.** Ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Природа, 2003, № 3, с. 15–23.
- Котляков В.М., Рототаева О.В., Десинов Л.В. и др.** Катастрофические последствия грандиозной подвижки ледника Колка на Северном Кавказе // Изв. РАН. Сер. геогр., 2003, № 1, с. 45–54.
- Котляков В.М., Рототаева О.В., Осокин Н.И.** Пульсирующие ледники и ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 65–71.
- Лейбман М.О., Кизяков А.И.** Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М., ИКЗ СО РАН, 2007, 206 с.
- Мавлюдов Б.Р.** Ледниковые дренажные системы // Изв. РАН. Сер. геогр., 2005, № 3, с. 38–47.
- Мавлюдов Б.Р.** Внутренние дренажные системы ледников. М., Ин-т географии РАН, 2006, 396 с.
- Машуков Х.М., Вороков В.Х., Банников А.А. и др.** Результаты ежегодного обследования наиболее опасных участков вдоль пути следования ледово-каменной массы после обвала ледника Колка в 2002 году // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Тр. Междунар. конф. Пятигорск, Ин-т “Севкавгипроводхоз”, 2008, с. 323–326.
- Муравьев Я.Д.** Газовое извержение в цирке – возможная причина развития подвижки ледника Колка по катастрофическому сценарию // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 98, с. 44–55.
- Никитин М.Ю., Гончаренко О.А., Галушкин И.В.** Динамика и стадийность развития Геналдонского ледово-каменного потока на основе дистанционного анализа // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2007, т. 7, № 3, с. 2–15.
- Осокин Н.И.** Ледниковая катастрофа в Осетии. 2002. (<http://geo.1september.ru/2002/43/03.htm>).
- Петраков Д.А.** Многостадийные ледниковые катастрофы как особый тип стихийно-разрушительных процессов гляциального генезиса // Материалы гляциол. исслед., 2008, вып. 105, с. 87–96.
- Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** По следам Геналдонской катастрофы: год спустя // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 1, с. 29–39.

- Познанин В.Л.** Срыв ледника Колка и глиссирующий механизм формирования ледово-водокаменного селя 2002 года // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Тр. Междунар. конф. Пятигорск, Ин-т “Севкавгипроводхоз”, 2008, с. 327–329.
- Познанин В.Л., Геворкян С.Г.** Импактный механизм подготовки ледника Колка к селевой катастрофе: физические процессы при крупных обвалах // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 2, с. 84–91.
- Познанин В.Л., Геворкян С.Г.** Функциональная структура Геналдонского селя и кумулятивный механизм его самовоспроизведения // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 1, с. 73–79.
- Полквой А.П.** Каковы же причины схода ледяной лавины? // Северная Осетия, 2002, 24 сент. (№ 178 (23735)).
- Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 3–17.
- Рогожин Е.А., Гурбанов А.Г., Мараханов А.В. и др.** О соотношении проявлений землетрясений, вулканизма и катастрофических пульсаций ледников Северной Осетии в голоцене // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 41–50.
- Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н.** Исследование пульсирующего ледника Колка. М., Наука, 1983, 169 с.
- 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.
- Ходаков В.Г.** Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР. М., Наука, 1978, 194 с.
- Черноморец С.С.** Селевые очаги до и после катастроф. М., Науч. мир, 2005, 184 с.
- Bozhinskiy A.N., Krass M.S., Popovnin V.V.** Role of debris cover in the thermal physics of glaciers // J. Glaciol., 1986, vol. 32, No. 111, p. 255–266.
- Drobyshev V.N.** Glacial catastrophe of 20 September 2002 in North Osetia // Rus. J. Earth Sci., 2006, No. 8. ES4004, doi: 10.2205/2006ES000207. (<http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/v08/2006ES000207/>).
- Evans S.G., Tutubalina O.V., Drobyshev V.N. et al.** Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002 // Geomorphology, 2009, vol. 105, No. 3–4, p. 314–321. doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.10.008.
- Mavlyudov B.R.** Glacial karst, why it is important to research // Acta Carstologica, 2006, vol. 35, No. 1, p. 55–67.

*Поступила в редакцию
16 октября 2009 г.*