

ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 511.311.21.(234. 9)

ГЛЯЦИАЛЬНАЯ КАТАСТРОФА 2002 ГОДА В СЕВЕРНОЙ ОСЕТИИ

В. В. Поповнин¹, Д. А. Петраков^{1,2}, О. В. Тутубалина^{1,2}, С. С. Черноморец²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геогр. ф-т,
119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, Россия

² Университетский центр инженерной геодинамики и мониторинга, 125252, Москва, ул. Куусинена, 25, Россия

Проведен анализ причин и последствий гляциальной катастрофы, происшедшей 20 сентября 2002 г. в долине р. Геналдон в Северной Осетии, повлекшей жертвы и разрушения. По результатам полевых исследований 2001 и 2002 г. с применением аэро- и космических снимков выделены 4 основные этапа катастрофы: ледовый обвал со склонов г. Джимарай-хох и удар в тыловую часть ледника Колка, начальное движение части ледника вниз по долине, ледово-водно-каменный поток и грязекаменный сель. Составлена карта зоны Геналдонской катастрофы. Выявлены морфометрические характеристики изменений ледников и рельефа на пути движения. Рассчитан объем аккумуляции льда, составивший около 115 млн м³. Измерены площади и оценена динамика 13 временных озер, образовавшихся после катастрофы. Составлена карта изменений наиболее крупного подпрудного озера, затопившего с. Горная Саниба, в течение первого месяца после его образования. Рассмотрены сейсмическая, вулканическая и метеорологическая гипотезы причин катастрофы. Предложена интерпретация данных о механизмах и скоростях движения. Приведены аргументы, доказывающие, что события 2002 г. не следует считать пульсацией ледника. Дан прогноз возможных темпов деградации ледового тела и динамики озер в ближайшем будущем.

Ледник, катастрофа, сель, гляциальные озера, обвал

THE 2002 GLACIAL CATASTROPHE IN NORTH OSSETIA

V. V. Popovnin¹, D. A. Petrakov^{1,2}, O. V. Tutubalina^{1,2}, S. S. Chernomorets²

¹ Moscow State University, Department of Geography, 119992, Moscow, GSP-2, Leninskiye Gory, Russia

² University Centre for Engineering Geodynamics and Monitoring, 125252, Moscow, Kuusinen str., 25, Russia

This study analyses the 20 September 2002 glacial catastrophe in the Genaldon River Valley, North Ossetia, which led to human casualties and destruction of settlements. Four main stages of the catastrophe have been identified on the basis of field observations in 2001 and 2002, aerial and satellite imagery: collapse of glaciers from the slope of the Dzhimarai-Khokh Mt. onto the rear part of Kolka Glacier; initial movement of Kolka Glacier parts down the valley; ice-water-rock flow; mud and debris flow. A map of the Genaldon catastrophe has been compiled. We have characterised the morphology of the changed glaciers and terrain on the way of the catastrophic movement and calculated the volume of ice, accumulated down the valley, which amounts to ca. 115 000 000 m³. We have also measured areas and characterised the dynamics of 13 temporary lakes, formed after the catastrophe, and compiled a map of changes for the largest dammed lake, which flooded the Gornaya Saniba settlement. The map covers a period of one month after the catastrophe. We then consider the three main hypotheses of what caused the event, namely the seismic, volcanic and meteorological factors, interpret the data about mechanisms and velocities of the catastrophic movement, and argue that the 2002 events should not be classified as a glacier surge. In conclusion, we estimate the likely speeds of the ice melt for the accumulated ice body in the Genaldon River valley and possible trends for the development of temporary lakes.

Glacier, catastrophe, debris flow, glacial lakes, collapse

Вечером 20 сентября 2002 г. около 20 ч в долине р. Геналдон в Северной Осетии произошла крупнейшая в истории России гляциальная катастрофа. Гигантский вал воды, льда и камней пронесся вниз по долине, сметая все на своем пути. Грандиозная по объему ледовая масса была остановлена тесниной Скалистого хребта, а селевые потоки, порожденные ею, не дошли до селения Гизель всего 2 км. В результате стихийно-

го бедствия были уничтожены нежилой корпус санатория „Кармадон“, база отдыха Северо-Осетинского государственного университета (СОГУ), база отдыха республиканского Министерства юстиции; разрушены линия электропередач протяженностью 1,5 км, строящаяся ветка газопровода, очистные сооружения санатория „Кармадон“, скважины водозабора минеральных источников с накопительными емкостями, подтоплена база

отдыха СПТУ-7. По официальным данным на 10 ноября 2002 г., обнаружены останки 18 погибших, пропавшими без вести считаются 108 человек.

Зона катастрофы 2002 г. вытянута вдоль всего русла р. Геналдон до ее впадения в р. Гизельдон и, кроме этого, захватывает участок долины Гизельдона ниже точки слияния (рис. 1). Долина р. Геналдон направлена субмеридионально и представляет собой прямолинейный трог. Сюга она ограничена Казбекско-Джимарайским горным массивом (горы Джимарай-хох — 4780 м, Майли-хох — 4598 м). Рядом с водоразделом бассейна находится гора Казбек (5033 м). В верховьях долины расположен мощный узел оледенения площадью около 13 км². Крупнейший в нем ледник Майли, площадью около 7 км², дренирует северо-западные склоны Казбека и спускается до высоты 2300 м [Каталог..., 1977]. Чуть ниже его языка на орографически левом борту долины расположены горячие Верхне-Кармадонские источники. Тыловая часть долины к западу от Майли занята ледником Колка. Этот карово-долинный ледник площадью 2,5 км² и длиной 3,1 км относится к категории пульсирующих.

В основе механизма прихода вещества на Колку — не выпадение твердых осадков, а сход снежных лавин и ледовых обвалов со стены Джимарай-хоха [Ротомеев и др., 1983]. По состоянию на осень 2001 г., над Колкой находилось 13 висячих ледников. Язык Колки оканчивался на высоте 2950 м, но линза мертвых льдов, забронированная мощным моренным чехлом, спускалась по меньшей мере до высоты 2300 м. Конец языка считается истоком р. Геналдон. До 2002 г. на начальном трехкилометровом участке русла до слияния с водотоком от ледника Майли его уклон составлял 0,25, а ниже, до Скалистого хребта уменьшался до 0,08. Характерной особенностью долины является отсутствие конечно-моренных гряд на ее днище. Через 12 км от истока река входит в обширную Кармадонскую котловину, где расположены пос. Кармадон, селения Тменикау, Верхнее и Нижнее Кани, Горная Саниба. Затем она прорезает Скалистый хребет по теснине, называемой Кармадонскими воротами. До катастрофы по ней проходила автодорога с тремя тоннелями. Ниже теснины при впадении Геналдона в Гизельдон располагалась база отдыха СОГУ. Далее долина расширяется, на берегах р. Гизельдон находятся селения Саниба и Гизель (см. рис. 1).

Гляциальная катастрофа 2002 г. стала неожиданностью для федеральных и региональных органов власти. Между тем подобные события происходили здесь и ранее. Имеются сведения о катастрофе, происшедшей около 1835 г. [Рото-

маев и др., 1983]. Тогда было уничтожено с. Генал, расположенное у подножия Скалистого хребта [Штебер, 1903]. Через 67 лет, в 1902 г. другая ледниковая катастрофа унесла жизни более чем 30 человек, ледовая масса остановилась у с. Тменикау [Поггенполь, 1905; Штебер, 1903; Обвал..., 1904]. Наконец, еще через 67 лет произошла подвижка ледника Колка, начавшаяся осенью 1969 г. Он продвинулся вниз по долине более чем на 4,5 км, возникла угроза катастрофических селей. Подвижка 1969—1970 гг., ее причины и последствия были детально изучены специалистами ИГ АН СССР [Ротомеев, 1974; Ходаков, 1974; Ротомеев и др., 1983].

В настоящий момент по телевидению и в прессе было высказано множество мнений, с большей или меньшей степенью достоверности раскрывающих причины катастрофы 2002 г., механизм ее развития и возможности прогнозирования ситуации. Однако детальный анализ ситуации, с привлечением имеющихся материалов, в научной печати пока не проводился. Представляется важным изучить имеющиеся данные, а также высказывавшиеся версии причин происшедшего. Поскольку в скором будущем многие следы катастрофы могут исчезнуть или измениться, необходимо по горячим следам выявить морфометрические характеристики вызванных катастрофой изменений ледников и рельефа Геналдонского ущелья, оценить ход динамики новых озер, образовавшихся в результате катастрофических событий.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для работы использовались описания и фотографии, сделанные авторами в ходе полевых работ 22 сентября 2001 г. и 3—7 октября 2002 г., материалы перспективных вертолетных цифровых съемок 22 сентября 2002 г. (А. П. Полквой), 24, 25 сентября и 6 октября (И. В. Галушкин), плановых и перспективных вертолетных съемок 7 октября (М. Ю. Никитин), наземных цифровых съемок 22 сентября и 7 октября (И. В. Галушкин), 20 октября (О. Н. Рыжанов). Анализировались также снимки, сделанные в начале мая 2002 г. московскими туристами Б. В. Малаховым и Н. В. Обуховой и в конце августа—начале сентября 2002 г. краснодарской туристской командой „Форпост“. Измерения длин, площадей и объемов проводились в основном по плановым космическим снимкам до и после катастрофы: Landsat ETM+ 16 октября 2000 г. и 2 июля 2002 г. (панхроматическая зона с разрешением 15 м, видимые и ближняя инфракрасная зоны с разрешением 30 м, приведенные к 15 м), Terra ASTER 22 июля 2001 г., 3 октября 2001 г., 27 и 29 сентября 2002 г., 6, 13 и 22 октября 2002 г.

ГЛЯЦИАЛЬНАЯ КАТАСТРОФА 2002 ГОДА В СЕВЕРНОЙ ОСЕТИИ

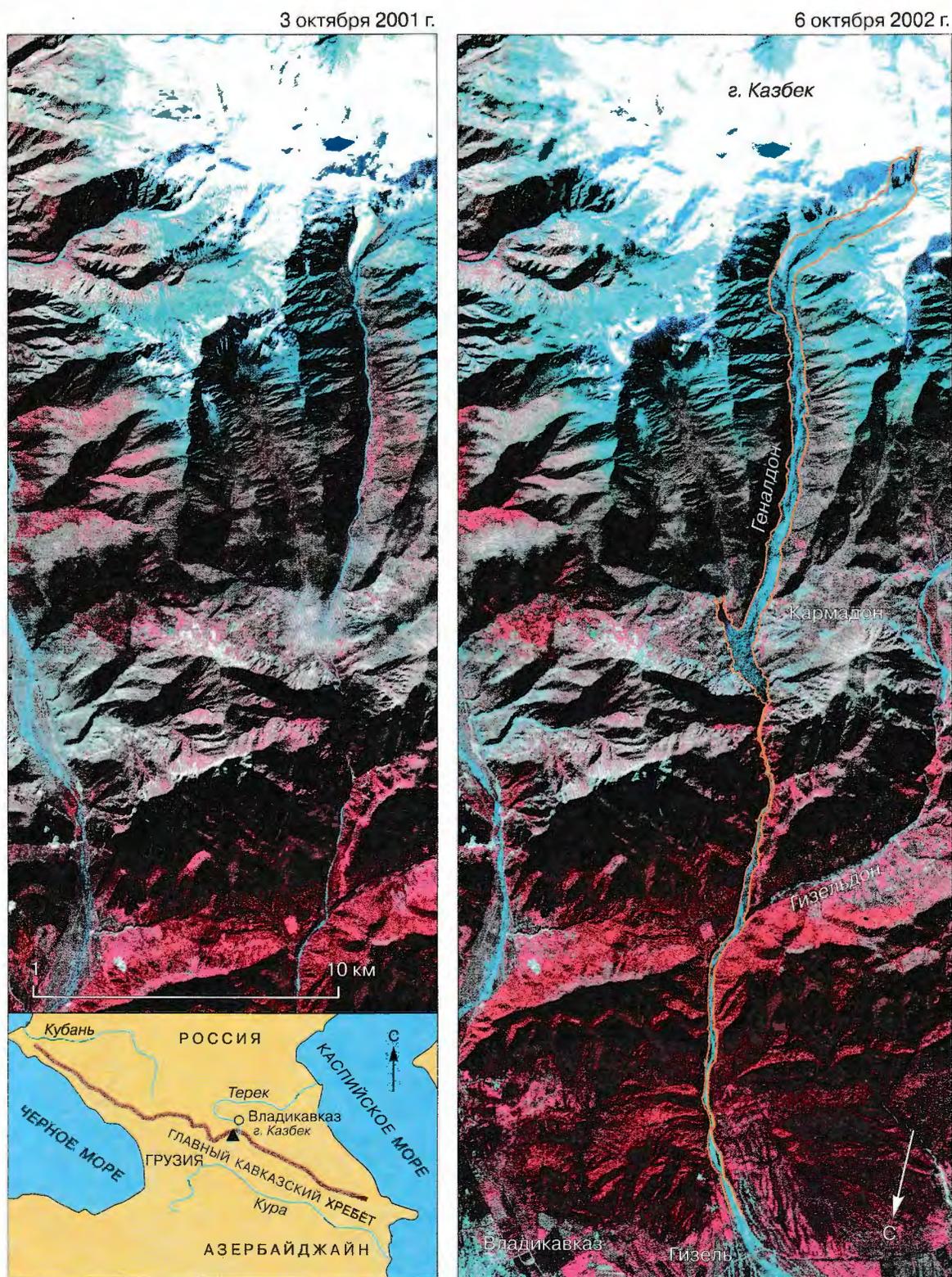


Рис. 1. Долины рек Геналдон и Гизельдон за год до и через 15 дней после катастрофы 2002 г. на синтезированных космических снимках ASTER.

Красные тона соответствуют растительности, белые — снегу, светло-голубые — льду, темно-голубые — скалам, селевым и склоновым отложениям, населенным пунктам. Оранжевой линией показаны контуры зоны катастрофы.

(видимые и ближняя инфракрасная зоны с разрешением 15 м), IRS LISS/Pan 19 октября 2002 г. (панхроматическая зона с разрешением около 5 м, красная и зеленая зоны с разрешением 23 м, приведенные к 5 м). Снимки Landsat ETM+ и IRS LISS/Pan были предоставлены Инженерно-технологическим центром (ИТЦ) СканЭкс, а снимки Terra ASTER получены из системы EOS Data Gateway и из NASA Johnson Space Center. Использовались также снимки с борта Международной космической станции (МКС), сделанные длиннофокусной цифровой камерой Kodak 13 августа и 19 сентября 2002 г. (разрешение 5–6 м) в рамках программы „Ураган“ (Л. В. Десинов) и предоставленные NASA Johnson Space Center. Снимки с МКС и ряд полевых фотографий, сделанных авторами, опубликованы на сайте NASA [Kolka..., 2002]. Для привязки и измерений привлекались топографические карты масштаба 1:50 000, где рельеф и положение ледников отражены по состоянию на конец 1950-х годов, а для расчета объема ледового тела в Кармадонской котловине — топографическая карта масштаба 1:10 000 и результаты тахеометрической съемки 28 сентября 2002 г., выполненной с применением безотражательного лазерного дальномера специалистами предприятия „Севосгеоэко“ В. Н. Дробышевым и В. В. Маклюковым в масштабе 1:10 000.

Оценка объема ледовых масс, обвалившихся со склонов горы Джимарай-хох и предположительно приведших к катастрофе, представляет большой интерес. Нами предпринята попытка приблизительной оценки с использованием схемы ледников верховьев р. Геналдон [Роттаев и др., 1983], а также перечисленных выше наземных фотографий, аэро- и космических снимков 2001 и 2002 г. Сравнение этой схемы, отражающей состояние висячих ледников в середине 1970-х годов, с нынешним состоянием позволило оценить суммарный объем материала, исчезнувшего с северо-восточного склона горы Джимарай-хох примерно за четверть века, включая катастрофу 20 сентября 2002 г. Для анализа толщины ледников, обвалившихся 20 сентября, проведено измерение высоты ледникового карниза, хорошо прослеживаемого на перспективных аэроснимках от 22 сентября 2002 г.

Измерения длин, площадей, объемов в зоне поражения проводились с помощью программы ERDAS Imagine по снимкам, предварительно приведенным в проекцию Гаусса—Крюгера на эллипсоиде Красовского (с использованием опорных точек). Во всех случаях измерялись горизонтальные проложения, а не физические длины участков. При этом не учитывались искажения, вызванные рельефом, однако они достигали значимых величин только в высокогорье, где по

мере необходимости осуществлялась локальная географическая привязка.

Расчет объема ледового тела в Кармадонской котловине выполнялся путем сравнения топографической карты 1:10 000 с результатами тахеометрической съемки от 28 сентября 2002 г. Для этого в программах ArcView и ERDAS Imagine были созданы цифровые модели рельефа Кармадонской котловины до катастрофы и поверхности ледового тела. Путем их наложения была получена модель толщины ледового тела с размером пиксела 4 × 4 м, а в итоге суммирования толщин для всех пикселов вычислен итоговый объем.

Составление карты зоны Геналдонской катастрофы 2002 г. проведено для отображения основных изменений в зоне катастрофы путем дешифрирования космических снимков, на которых четко видны контуры зоны поражения и образовавшиеся озера. По изменению цвета и текстуры изображения достаточно хорошо выделяются заплески на склонах в зоне прохождения ледово-каменного селя, а также контуры ледового тела. Трудности в дешифрировании в основном были связаны с недостаточным пространственным разрешением снимков (5–30 м), а также с глубокими тенями на северных склонах гор из-за утреннего времени съемки. Поэтому дополнительно для дешифрирования привлекались вертолетные и наземные снимки с разрешением от долей метра до первых метров.

Рисовка контуров осуществлялась в программе ArcView путем ручного цифрования по экрану с использованием ряда геоинформационных слоев, приведенных в единую проекцию (космических снимков Landsat ETM+ от 16 октября 2000 г., Terra ASTER от 22 июля 2001 г., 27 сентября и 6 октября 2002 г., IRS LISS/Pan 19 октября 2002 г., листов топографической карты 1:50 000), и с визуальной коррекцией по аэро- и наземным снимкам. Подобным же образом составлена карта динамики Санибанского озера. В ходе работы создана геоинформационная система зоны Геналдонской катастрофы, которая может в дальнейшем использоваться для мониторинга территории.

РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ 20 СЕНТЯБРЯ 2002 ГОДА

Последовательность событий в долине р. Геналдон вечером 20 сентября восстановлена нами на основе всех имеющихся в нашем распоряжении материалов.

В 2000 г. верховья Геналдона обследовались специалистами Росгидромета, при этом не было обнаружено ничего угрожающего. 22 сентября 2001 г. нами были обследованы ледники Майли и Колка, и последний имел типично отступаю-

ший вид без признаков активизации. Перед Колкой отчетливо просматривались большие массивы мертвых льдов. Язык ледника был покрыт моренным чехлом (рис. 2). На снимках Б. В. Малахова и Н. В. Обуховой (май 2002 г.) также не видно ничего необычного. Последнее описание верховий Геналдона до катастрофы приводится со слов туриста А. В. Фалина: в начале сентября отмечена высокая активность обвальных процессов на склонах горы Джимарай-хох; грохот обвалов слышался практически непрерывно, в верхней части ледника Колка наблюдался крупный конус выноса, сложенный обломочным материалом; у края ледника Колка образовались три небольших озера; по каньону, в котором идет сток с ледника Колка, сходили сели.

Информация о событиях, происходивших в верховьях Геналдона непосредственно перед катастрофой, отсутствует. В 20 ч 08 мин 20 сентября 2002 г. включились датчики на четырех сейсмостанциях Северной Осетии. Они зафиксировали сигналы, говорящие, видимо, о сотрясениях вблизи земной поверхности. Через пять с половиной минут отключилось электричество в поселках вследствие обрыва ЛЭП, расположенной в 16,5 км ниже верхней части Колки. Участок долины от пос. Кармадон до Кармадонских ворот оказался заполнен гигантским ледовым телом. Теснина Скалистого хребта остановила продвижение ледовой части массы, но не смогла предотвратить выброс вниз по долине значительного объема освободившейся при остановке льда воды, грязи и камней.

Облет зоны бедствия, предпринятый специалистами МЧС и Управления природными ре-

сурсами по Республике Северная Осетия—Алания (РСО-А) 22 сентября, показал наличие крупных отколов льда на всяких ледниках северной стены горы Джимарай-хох. Появилась версия, что первопричиной катастрофы стал гигантский ледовый обвал со склонов горы Джимарай-хох [Полковой, 2002]. Зародившись на высоте около 4200—4300 м (рис. 3), он преодолел более 1000 м по вертикали и обрушился на расположенный ниже ледник Колка.

Значительная часть ледника Колка была, по-видимому, „выбита“ обвалом и сброшена вниз по долине. Затем гигантская масса устремилась вниз, вовлекая в движение рыхлые отложения, воду, мертвые льды. Часть материала двинулась по врезу, через который осуществлялся сток с Колки. Другая часть перепрыгнула через морену, разделявшую ледники Колка и Майли, прошла по языку Майли и соединилась с остальной массой.

После удара о Скалистый хребет основная часть льда остановилась и отложилась в Кармадонской котловине. Часть его попала в приустьевую зону долины р. Кауридон, в которой впоследствии образовалось крупное подпрудное озеро.

На заключительном этапе катастрофы произошло формирование грязекаменных селевых потоков ниже ледового тела, остановленного тесниной Скалистого хребта. Волна селя высотой до 30 м прошла вниз по долине. При выходе из теснины ее высота уменьшилась, в районе впадения Геналдона в Гизельдон она не превышала 3—4 м. В пойме Гизельдона произошла аккумуляция селевых отложений, и выше с. Гизель сель трансформировался в наносоводный паводок.



Рис. 2. Вид ледника Колка за год до катастрофы.

1 — всяичие и присклоновые ледники на склонах горы Джимарай-хох; 2 — массивы мертвых льдов, покрытые мореной. Фото С. С. Черноморца, 22 сентября 2001 г.



Рис. 3. Область зарождения фирново-каменно-ледовых обвалов на склоне горы Джимарай-хох над ледником Колка.

1 — линии отрыва всяичих ледников, 2 — следы свежих обвалов на стене Джимарай-хоха. Фото Д. А. Петракова, 5 октября 2002 г.

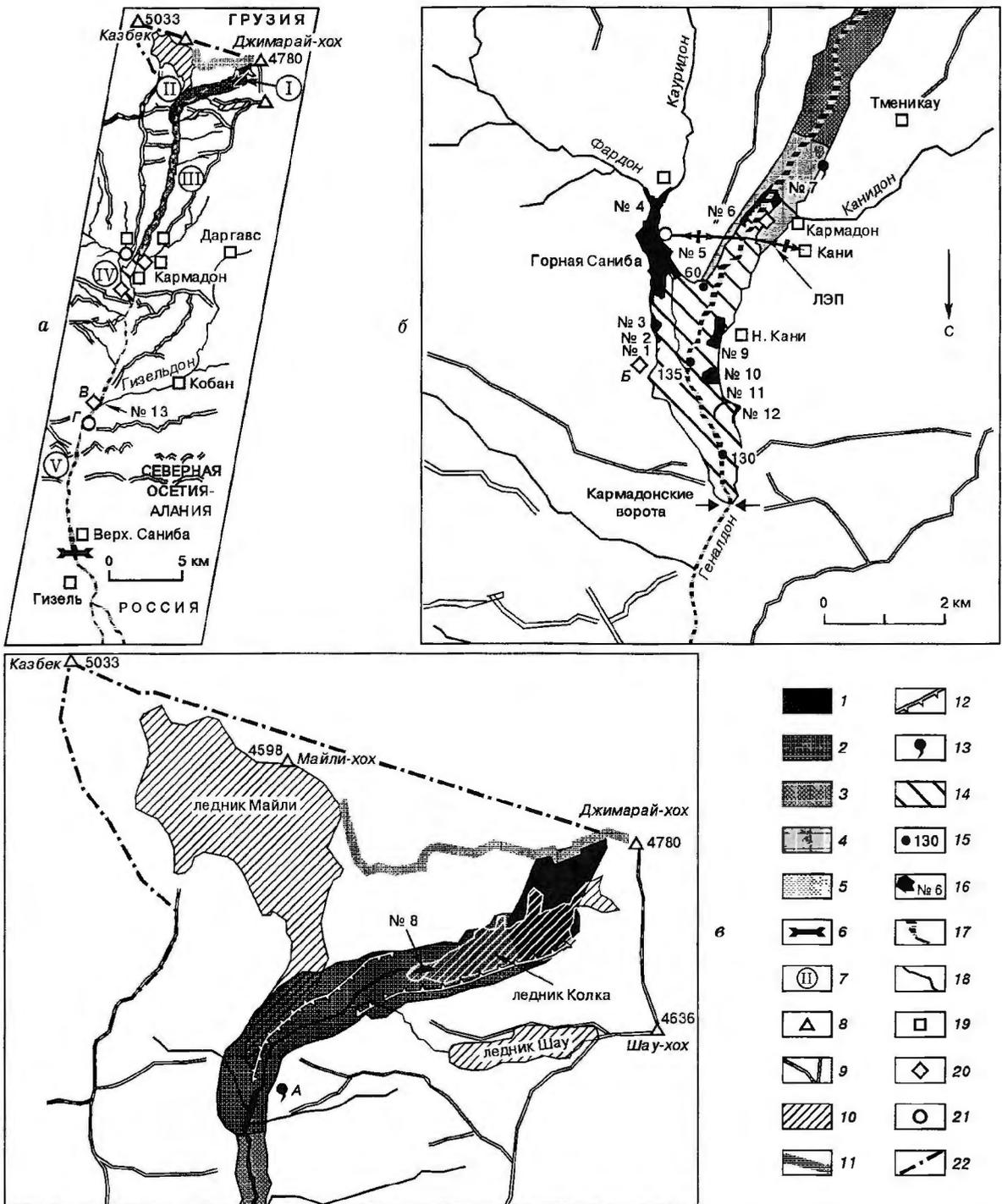


Рис. 4. Карта зоны Геналдонской катастрофы 2002 г. от горы Джимарай-хох до места окончания селевого потока (а), участков ледового тела в Кармадонской котловине (б) и начала катастрофы (в).

1 — зона фирново-каменно-ледовых обвалов (I); 2 — зона начального движения (II); зона ледово-водно-каменного селя: 3 — участок транзита (III), 4 — участок аккумуляции льда (IV); 5 — зона грязекаменного селя (V); 6 — место перехода селя в наносоводный паводок; 7 — номера зон и участков; 8 — горные вершины; 9 — горные хребты; 10 — ледники (в границах 2001 г.); 11 — участок висячих ледников; 12 — береговые морены ледников Колка и Майли; 13 — минеральные источники; 14 — ледовое тело в Кармадонской котловине (на 6 октября 2002 г.); 15 — толщина ледового тела, м; 16 — временные озера (на 6 октября 2002 г.) и их номера; 17 — пойма рек Геналдон и Гизельдон до катастрофы; 18 — реки; населенные пункты: 19 — сохранившиеся, 20 — разрушенные, 21 — подтопленные; 22 — государственные границы. А—Г: А — Верхне-Кармадонские источники, Б — развалины с. Генал, В — база СОГУ, Г — база СИТУ-7.

Таким образом, можно выделить 4 основные этапа катастрофы.

1. Ледовый обвал или серия обвалов со склонов горы Джимарай-хох и удар в тыловую часть ледника Колка.

2. Начальное движение выбитой части ледника Колка вниз по долине. Условной нижней границей зоны начального движения можно считать поворот долины у языка ледника Майли.

3. Ледово-каменный поток по долине Геналдона от языка Майли до Кармадонских ворот.

4. Грязекаменный сель от Кармадонских ворот до участка, расположенного на 2 км выше с. Гизель.

На карте (рис. 4,а) показаны участки, соответствующие этим этапам. Зона ледово-каменного потока разделена на участки транзита и аккумуляции.

Характеристика зоны поражения. Если придерживаться нумерации ледников на схеме К. П. Рототаева и соавторов [Рототаев и др., 1983, с. 12], то анализ показывает, что на момент окончания катастрофы полностью обрушились все ледники под условными номерами 8, 9 и частично — 7 и 10. Ортогональная проекция площади зоны обрушения составляет около 0,35 км², физическая — на одну треть больше. Максимальная видимая толщина ледника в зоне отрыва составляет около 80 м по нормали к поверхности, нигде не наблюдается толщины менее 40—50 м. Даже если принять среднюю толщину обвалившихся ледников равной 40 м, объем выноса льда с северного склона горы Джимарай-хох за четверть века составит около 18 млн м³. В то же время наши наблюдения на Кавказе свидетельствуют о незначительных изменениях в пространственном положении всеяких ледников за последнюю четверть века. Какая часть этой массы растаяла, какая обвалилась в предкатастрофический период, а какая — в день катастрофы, возможно, удастся оценить впоследствии. Кроме того, требуется оценить объем скальных масс, участвовавших в обвальных процессах.

В леднике Колка образовалась западина корытообразной формы, протянувшаяся вдоль всего ледника. Лед оттуда был выброшен вниз по долине, и отдельные ледовые валы и блоки покрыли поверхность между ледниками Колка и Майли. Значительная часть поверхностной морены была сброшена вниз вместе со льдом, обнажился лед в орографически левой береговой морене. Заплеск льда за эту морену, видимо, свидетельствует о больших скоростях движения обвала по поверхности Колки. В понижении ледового рельефа образовалось озеро (рис. 5).

Ширина фронта движения в районе ледника Майли достигает 1 км, там же находится круп-

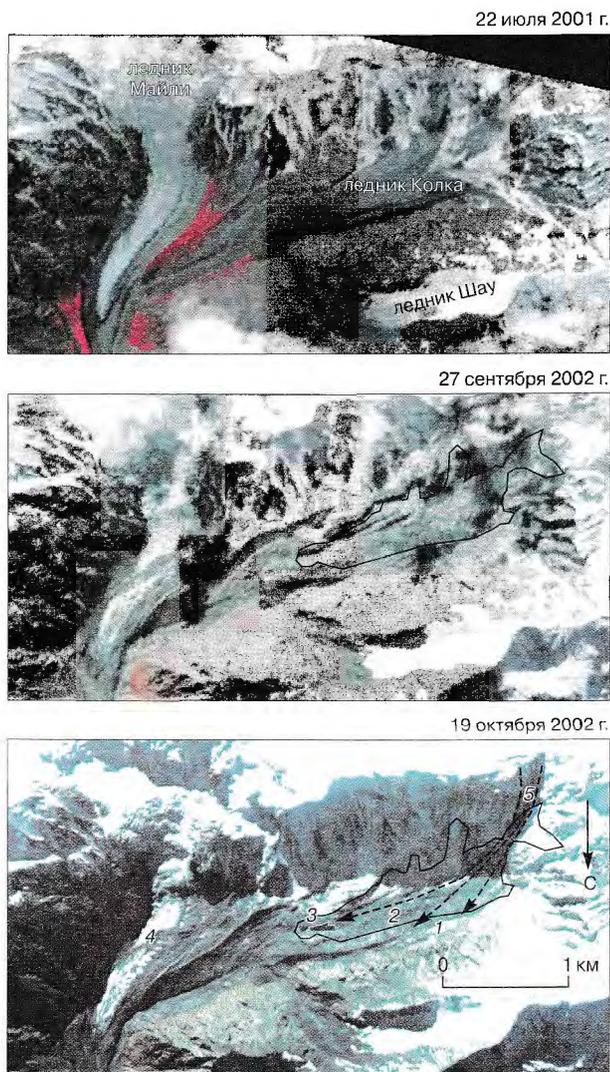


Рис. 5. Ледник Колка до и после катастрофы: 22 июля 2001 г. (Terra ASTER), 27 сентября 2002 г. (Terra ASTER), 19 октября 2002 г. (IRS LISS/Pan).

1 — ледовый заплеск за мореной ледника Колка; 2 — западина на месте основной части ледника Колка; 3 — Колкинское озеро, образовавшееся между 27 сентября и 5 октября 2002 г.; 4 — след движения ледово-каменной массы по языку ледника Майли; 5 — фумаролы на склоне горы Джимарай-хох. Черной линией показана граница ледника Колка в 2001 г., стрелками — пути обвалов.

Снимок IRS LISS/Pan предоставлен ИТЦ СканЭкс (<http://www.scanex.ru>).

нейший заплеск, расположенный на высоте более 150 м над дном долины.

Ледово-каменная масса двигалась, переходя с одного борта долины на другой, вследствие этого заплески на бортах расположены несимметрично. Долина от языка Майли до пос. Кармадон представляет собой область преимущест-

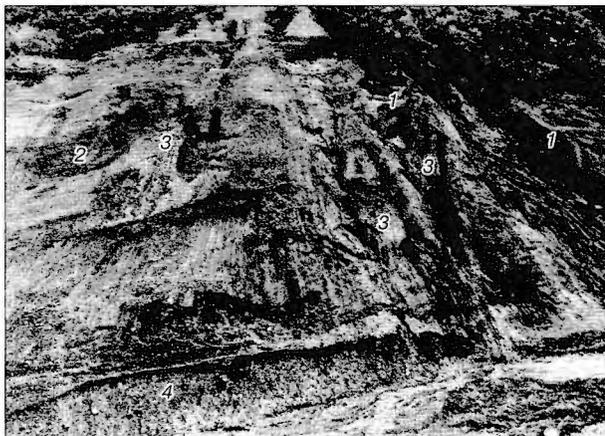


Рис. 6. Правый борт долины р. Геналдон в зоне транзита ледово-каменного потока.

1 — заплески льда и глыбы, впрессованные в боковые кулуары; 2 — продольные полосы, маркирующие движение потока; 3 — осыпи и оплывины на склоне; 4 — селевая терраса над руслом.

Фото С. С. Черноморца, 5 октября 2002 г.

венного транзита длиной 8,5 км. Характерный склон в зоне транзита показан на рис. 6. В ходе движения ледово-каменно-водной массы, происходившего в полосе шириной 400—500 м, высота волн достигала 100—150 м. По данным маршрутного обследования 5 октября, лед сохранился в ней в виде ограниченного числа небольших деградирующих массивов на дне долины. На склонах висячем положении остались крупные (размером в десятки метров) останцы льда, „вмазанные“ в эрозионные ложбины и тальвеги, с включениями грубообломочного материала. Выше заплесков проходила полоса травянистого склона, присыпанная слоем эоловых отложений шириной 10—20 м, толщиной 3—10 см. Преобладали обломки фракции песка, дресвы и щебня, отдельные обломки достигали размера 30—40 см. На правом борту долины деревья были повалены ударной воздушной волной и присыпаны эоловыми отложениями. Подрезка склонов привела к активизации оползневых процессов: по левому борту долины обнаружены оползни со свежими рвами отседания шириной до 2 м.

Каменно-водно-ледовая масса, основную часть которой составлял лед Колки, прошла 19 км от места падения на Колку до удара о Скалистый хребет. Площадь зоны поражения непосредственным воздействием обвального и селевого процессов при этом составила 12,7 км², включая зону обвала, начального движения, прямолинейный участок транзита примерно до створа пос. Кармадон и участок аккумуляции, где сейчас находится ледовое тело. „Ледовым телом“ мы

именуем массив, состоящий преимущественно из льда с небольшим содержанием водной и каменной составляющих, заполнивший долину в Кармадонской котловине. Его площадь, определенная по космическому снимку от 6 октября 2002 г., составила 2,1 км², длина — 3,6 км, а толщина достигала в отдельных местах 135—140 м при средних значениях около 60 м. Полученное нами значение объема ледового тела составляет около 115 млн м³. С учетом точности исходных материалов и методики подсчета мы оцениваем погрешность определения объема в ±10 млн м³.

После Кармадонских ворот грязекаменный сель прошел 17 км при площади зоны поражения — 3,0 км². Объем селевых отложений оценивается нами в 3—5 млн м³. Средняя толщина селевых отложений от ворот до слияния Геналдона и Гизельдона может быть оценена лишь приблизительно, но ниже бывшей базы СОГУ она составляет 1—2 м.

ДИНАМИКА НОВЫХ ОЗЕР ПОСЛЕ КАТАСТРОФЫ

Одним из основных последствий катастрофы является появление динамичных временных озер выше ледового тела и на его поверхности (рис. 7). В ходе катастрофы и после нее образовалось большое количество свободной воды, часть которой оказалась заблокированной непрочными ледовыми массами, что привело к активному развитию термокарста и термоэрозии. Поиск новых каналов стока в теле ледового массива сопровождался как быстрыми, так и постепенными прорывами, при этом озера возникали, исчезали и

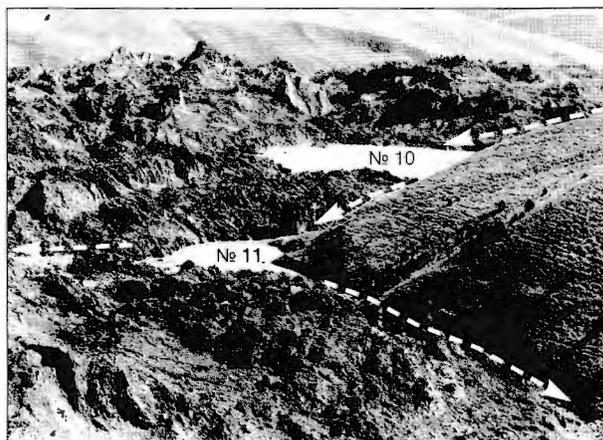


Рис. 7. Поверхность ледового тела и новые озера около с. Кани у левого борта долины р. Геналдон.

Номера озер даны согласно таблице. Стрелками показаны направления стока при спуске озерных вод. Фото С. С. Черноморца, 6 октября 2002 г.

менялись в размере. Для удобства описания будем называть временные озера в соответствии с ближайшими населенными пунктами (в том числе разрушенными) или ледниками, к которым они приурочены: Колкинское, Санибанское, Генальская группа из 3 озер, Кармадонская группа из 3 озер, Канидонская группа из 4 озер и Нижне-Кобанское. Озерам присвоены порядковые номера в направлении обхода долины по часовой стрелке. Площади озер, измеренные по космическим снимкам на две даты, приведены в таблице, а их географическое положение показано на рис. 4. Прочерк в таблице означает, что озера в данный момент не было.

27 сентября существовали 9 четко различимых озер, к 6 октября озер было 13, площадь их составляла 437 тыс. м².

История возникновения и динамики Санибанского озера (№ 4) представляет наибольший интерес, поскольку оно является самым крупным из новых озер. Площадь и объем озера росли с 20 сентября по 18 октября 2002 г. Формирование его началось сразу после катастрофы, но накопление основной массы воды произошло после прорывного селя 22 сентября. На снимках, сделанных 22 сентября утром, видны следы оползня в ледово-каменных отложениях по левому борту долины р. Геналдон у пос. Кармадон. Оползень перекрыл одну из протоков р. Геналдон перед впадением в озеро № 7. Видимо, выше оползневого тела произошло накопление водной массы с последующей разгрузкой в озеро. В северной части озера сформировался вытянутый залив. Затем по подледным каналам вначале из озера 7, а затем из 6 начала наполняться западина на поверхности льда, и образовалось новое временное озеро. Во второй половине дня 22 сентября произошел прорыв из него в Санибанское озеро, которое в тот момент имело площадь около 20 тыс. м². Грязекаменный поток прорвал ледовую перемычку. Произошел быстрый подъем уровня воды в Санибанском озере, и две улицы с. Горная Саниба ушли под воду. К 24 сентября, судя по аэроснимкам, площадь озера возросла примерно в 6 раз, а уровень поднялся более чем на 20 м.

Санибанское озеро в начальный период не имело поверхностного стока. Приток воды из рек Кауридон и Фардон 4 октября составлял около 1 м³/с. К северу от озера, под правым бортом долины образовалась Генальская группа из трех озер, довольно быстро разраставшихся и постепенно слившихся друг с другом. Изменения Санибанского озера и озер Генальской группы до 19 октября 2002 г. показаны на рис. 8.

Анализ цифровой модели рельефа с учетом оценки подводного склона ледового тела показывает, что за месяц в Санибанском озере на-

Площади временных озер, сформировавшихся после катастрофы 20 сентября 2002 г.

Номер озера	Местонахождение	Площадь, тыс. м ²	
		27 сентября 2002 г.	6 октября 2002 г.
1	Генальская группа, правобережное	—	4
2	Генальская группа, правобережное	—	3
3	Генальская группа, правобережное	—	12
4	Санибанское, правобережное в устье р. Кауридон	218	262
5	Кармадонская группа, правобережное	10	7
6	Кармадонская группа, правобережное	5	5
7	Кармадонская группа, над ледовым телом под пос. Кармадон	50	36
8	Колкинское, на леднике Колка	—	24
9	Канидонская группа, левобережное	57	36
10	Канидонская группа, левобережное	50	32
11	Канидонская группа, левобережное	9	5
12	Канидонская группа, левобережное	9	5
13	Нижне-Кобанское, левобережное у впадения р. Геналдон в р. Гизельдон	13	6
<i>Всего</i>		421	437

копилось не менее 3 млн м³ воды при максимальной глубине до 30 м. По сведениям, полученным от Э. В. Запороженко, в начале октября уровень воды в озере поднимался примерно на 30—40, а затем на 20—25 см в сутки. К 18 октября из Санибанского озера наметился сток под правым бортом долины в озера Генальской группы. В ночь с 22 на 23 октября оформилось русло, состоящее из цепочки озер и протоков между ними, длиной до 1,2 км. К 24 октября уровень Санибанского озера понизился на 1,7 м, по сравнению с максимальными значениями, а еще через несколько дней — на 6 м. Воды Санибанского озера через слившиеся Генальские озера и далее по вновь образовавшемуся тракту стали уходить во внутренние полости ледового тела. Процесс перелива в конце октября 2002 г. не носил катастрофического характера. Однако не исключены быстрые прорывы после наступления теплого сезона, когда произойдет ускорение таяния.

Изменения других временных озер. Появление Колкинского озера зафиксировано нами при маршрутном обследовании 5 октября 2002 г. Длина озера, определенная по космическому снимку ASTER от 6 октября, составила 300 м, ширина — 80 м. На снимках 22—27 сентября

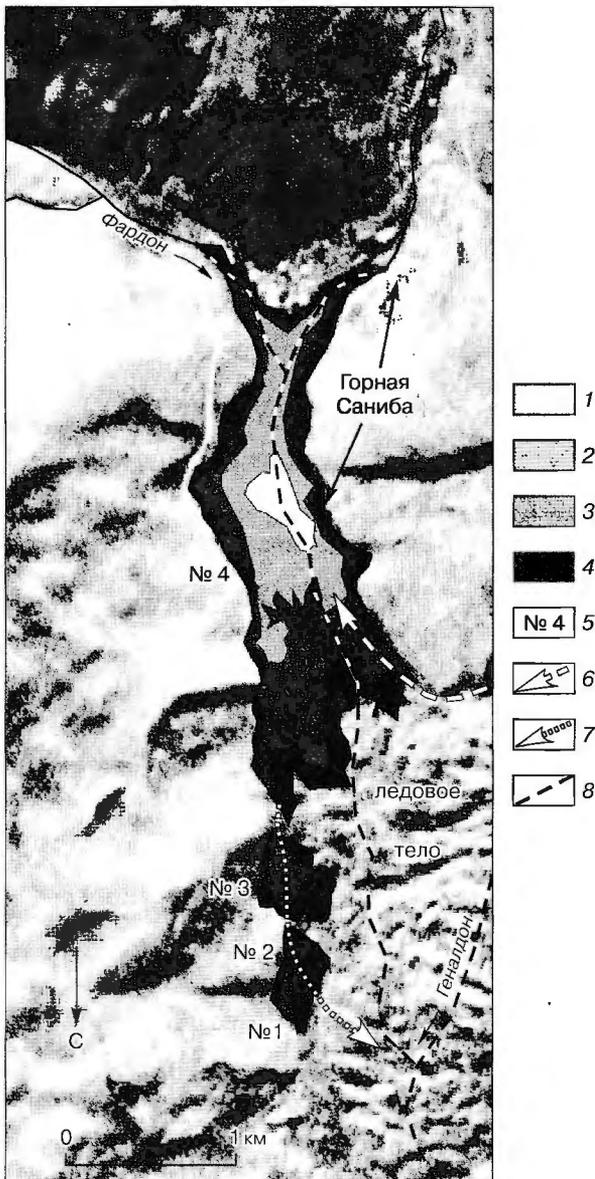


Рис. 8. Динамика размеров озер в районе с. Горная Саниба.

1 — 22 сентября (до прорывного селя), 2 — 24 сентября, 3 — 6 октября (вид озер на 6 октября показан на обложке журнала), 4 — 19 октября, 5 — номера озер, 6 — направление прорывного селя 22 сентября, 7 — направление стока из Санибанского озера, 8 — положение русел рек до катастрофы.

Колкинское озеро отсутствует. В 1 км к западу от него, в месте падения обвалов на аэроснимке 25 сентября видно еще одно мелководное озеровидное образование. Обнаружить его на более поздних космических снимках не удалось, возможно, из-за его малых размеров.

В начальный период после катастрофы происходил масштабный процесс перемещения вод-

ных масс в озерах ледового тела в Кармадонской котловине. Так, 22—24 сентября часть вод озера № 7, образовавшегося над ледовым телом, через подледные каналы переместилась к северу, при этом сформировалось озеро № 9 с селевым конусом выноса на поверхности льда. В последующие несколько дней под левым бортом долины образовалась цепочка из четырех озер (Канидонская группа), соединенных протоками. Ледяные перемычки были неустойчивыми, и происходили прорывы из вышележащих озер в нижележащие. Термокарстовые и термоэрозионные процессы приводили к понижению отметок дна озерных котловин, а за ними и уровня озер. Так, следы более высоких уровней Канидонских озер находились 6 октября на высоте 10—12 м выше урезов воды. Поиск каналов стока в ледовом теле привел к образованию на озере № 11 водоворотов и интенсивного течения. После 7 октября это озеро прекратило существование, сток же р. Геналдон осуществлялся через озеро № 10 по подледным каналам.

Подпрудное Нижне-Кобанское озеро (№ 13) возникло при впадении р. Геналдон в р. Гизельдон, где селевые отложения Геналдона образовали плотину высотой около 3 м. Первоначальные предположения специалистов о вероятном прорыве озера не подтвердились, перелив через плотину был достаточно спокойным. В течение последующих двух недель верхняя часть озера была заиlena наносами р. Гизельдон, нижняя же начала заполняться размывшими собственную плотину отложениями р. Геналдон.

ВЕРСИИ ПРИЧИН КАТАСТРОФЫ

К настоящему времени высказаны три основные гипотезы о возможных причинах Геналдонской катастрофы: 1) сейсмическая, 2) вулканическая и 3) метеорологическая.

1. Подземные толчки могли способствовать уменьшению трения на ложе висячих ледников и активизации обвальной деятельности. В районе Верхне-Кармадонских горячих источников перпендикулярно долине проходит тектонический разлом. В 1902 г. за несколько часов до катастрофы резко изменился режим источника: вода помутнела, дебит увеличился, источник стал пульсировать [Варданянц, 1932]. Усиление камнепадной деятельности за две недели до катастрофы 1902 г., по мнению Л. А. Варданянца, было связано с активизацией другого разлома, проходящего по северной стене горы Джимарай-хох и перекрытого льдом. Учащение обвалов наблюдалось и в июле—сентябре 2002 г. Можно предположить, что разрядка напряжений по разломам выразилась в большом количестве сейсмических толчков малой магнитуды и подготовила сход гигантского обвала 20 сентября, чему также спо-

существовало землетрясение, происшедшее 8 сентября 2002 г. в районе Черноморского побережья. В. Д. Панов [2002] высказал точку зрения, что именно оно могло быть решающей причиной заключительного обвала.

2. Вулканическая версия возникла после высадки группы специалистов под руководством В. Р. Болова на поверхность ледника Колка 25 сентября 2002 г. В точке посадки ощущалось сильное парение газа с сероводородным запахом, поэтому исследователям пришлось немедленно подняться в вертолет и улететь. На аэроснимках А. П. Полквого и И. В. Галушкина от 22 и 25 сентября прослеживаются две fumarолаы на скальном уступе горы Джимарай-хох; в это время наблюдался сток газа вниз и образование облака на поверхности ледника Колка. Не исключено, что активизация fumarоольных эманаций в основании висячих ледников в период, предшествовавший катастрофе, произошла вследствие сейсмогенных дислокаций внутри горных пород согласно версии, рассмотренной выше. Отопляющее воздействие газов на ложе ледников могло создать там условия, при которых избыточное подледниковое таяние с образованием аномально мощного слоя воды на контакте с субстратом привело к смене закона движения льда с вязкопластичного на глыбовый, породив тем самым отрыв необычно больших масс льда. Впрочем, возможно, выход газов стал не причиной, а следствием обвала, который обнажил fumarоольные трубки на стене (примерное положение трубок показано на рис. 5), проявив линию тектонического разлома на склоне горы. Линия отрыва обвала расположена значительно выше.

3. Метеорологическая версия учитывает погодные аномалии 2001/2002 балансового года. Зима 2001/2002 г. выдалась многоснежной, на репрезентативном для Кавказа леднике Джанкуат, расположенном в 100 км от верховий Геналдона, аккумуляция была на 25 % больше нормы. Снимок Landsat ETM+ от 2 июля 2002 г. показывает, что на поверхности ледника Колка было необычно много снега. Лето было холодным и экстремально влажным, а на высотах более 4000 м отмечалось небывалое частое выпадение свежего снега. Эта особенность летнего сезона привела к резко положительному вещественному балансу висячих ледников, расположенных на северной стене горы Джимарай-хох, а избыток массы, накопившейся на них, создал предпосылки для срыва особо крупного ледяного массива.

Характерно, что схожие причины назывались в качестве основных факторов катастрофы 3—6 июля 1902 г., вошедшей в историю как „Обвал Геналдонского ледника“. Остановка ледовых масс в 1902 г. произошла у с. Тменикау, в 6 км выше Кармадонских ворот. По мнению некото-

рых жителей Тменикау, причиной катастрофы было выпадение частых и сильных дождей, а Р. Р. Лейцингер указывал на влияние больших уклонов ложа ледника [Обвал..., 1904]. Э. А. Штебер [1903] считал причиной сильное таяние в сезон 1901 и в июне 1902 г., ослабившее „опоры“ висячих ледников над Колкой, а также экстремальный ливень в начале июня; а версии о связи обвала с землетрясениями и деятельностью горячих источников упоминал как маловероятные. Н. В. Поггенполь [1905] связывал причину происшедшего с Шемахинским землетрясением 1902 г., хотя эта точка зрения была позже раскритикована К. П. Рототаевым с соавторами [1983], который показал, что отголосок того землетрясения в районе Казбека не мог достигать и 1 балла по шкале Рихтера.

В генерировании событий 2002 г., по-видимому, в той или иной степени участвовали все три вышеописанные механизма. На сегодняшний день нет однозначных аргументов, которые позволяли бы считать один из механизмов главным, а другие — второстепенными.

О МЕХАНИЗМЕ И СКОРОСТЯХ ДВИЖЕНИЯ

Расшифровка сейсмограммы от 20 сентября свидетельствует о том, что фокус начального сигнала, зарегистрированного в 20 ч 08 мин, располагался вблизи дневной поверхности. Тогда логично заключить, что толчок в 20 ч 08 мин был не причиной обвала льда, а его следствием, возможно, результатом удара низвергнутого ледяного массива о долинную часть ледника Колка и левобережную морену. Это является аргументом в пользу гипотезы о единовременном обрушении значительного по объему ледяного тела.

Обрушение ледовых массивов, приведшее к катастрофе, обусловило вовлечение в движение масс, превышающих первые во много раз. Как показывают результаты имитации событий по модели ледяной лавины А. Н. Божинского, сразу после обвала за пределы бывлых границ ледника Колка ушло бы не менее 32,5 млн м³ льда. Аналогичное событие произошло 20 августа 1960 г. в Дагестане, когда под ударом огромных масс фирна, упавших с вершинной части горы Базардюзю, на несколько сотен метров был сдвинут язык долинного ледника Муркар [Кисин, Тертепов, 1961]. Здесь же удаление значительных объемов глетчерного льда Колки привело к формированию депрессий на месте ледникового языка, которые служат резервуарами для накапливающихся талых вод, образующих озера.

Особого внимания заслуживает проблема оценки объема горных пород, перемещенных непосредственно со стены Джимарай-хоха. На фотографиях, сделанных 22—25 сентября с верто-

лета, ясно прослеживаются не только откосы льда по границам оторвавшейся ледяной массы, но и лоткообразный врез в подстилавших ви-сячий ледник скалах. Он свидетельствует о том, что наряду со льдом вниз съехали обширные по площади массивы горных пород. Данный участок Главного Кавказского хребта сложен, в частности, палеозойскими глинистыми сланцами, чья плитчато-сланцеватая текстура способствует оползневому соскальзыванию. В этой связи нельзя сбрасывать со счетов и еще одну гипотезу зарождения катастрофического потока: он мог быть инициирован не ледовым обвалом, захватившим при срыве часть субстрата, а наоборот, подледниковым оползнем горных пород, унесшим на себе вниз лежавший поверх них ледник. Похожий феномен описан в литературе [Mokievsky-Zubok, 1978]: в 1975 г. на канадском леднике с красноречивым названием Девастэйшн — devastation (англ.) „опустошение“ — подледниковый оползень, вызванный аномальными темпами абляции и вероятным сейсмическим толчком, оторвал лежавший сверху ледниковый язык и увлек за собой вниз по долине, в процессе чего изначальная масса в 2,5 млн м³ возросла до 30 млн м³, сам поток прошел 6,5 км, погубив четверых человек.

Еще одним дискуссионным моментом является определение скорости распространения ледово-водо-каменного потока вниз по ущелью р. Геналдон. Хронометраж между первым сейсмическим сигналом (вероятно, удар обрушившегося льда о Колку) и обрывом ЛЭП через 5,5 мин позволяет определить среднее значение скорости — порядка 180 км/ч или 50 м/с. Необъяснимым, правда, остается происхождение второго сейсмического сигнала через 3,5 мин после первого, который часть аналитиков склонна отождествлять с ударом головы потока о Скалистый хребет, расположенный ниже ЛЭП. Скорость тогда должна была достигать чрезвычайно высоких значений — 290 км/ч или 80 м/с. К сожалению, интерпретация сейсмограммы пока не является однозначной, поскольку датчики могли включиться уже в процессе движения потока. Во всяком случае скорость потока при Геналдонской катастрофе 1902 г. оценивается Э. А. Штебером [1903] лишь в 80—120 км/ч. Моделирование динамики потока 2002 г., предпринятое А. Н. Божинским, исходя из предположения, что после выхода за пределы былой долинной части ледника Колка ледовая лавина скачкообразно трансформируется в селевой поток (т. е. насыщается водной составляющей), показывает, что в момент этой трансформации масса движется со скоростью 215 км/ч или 60 м/с. Однако далее чтобы обеспечить измеренную в поле дальность выброса, т. е. удовлетворить условие, при кото-

ром поток достигает Скалистого хребта при самых низких из допустимых значений коэффициентов вовлечения и турбулентного трения, также при предельных величинах угла внутреннего трения сухого и влажного материалов, модель демонстрирует максимально возможную скорость не более 140 км/ч или 37 м/с. Это условие выполняется, если соотношение лед/вода в селевом потоке составляет 3:1, т. е. толщина придонного слоя воды — не менее 10 м. Однако вряд ли стоит считать неправдоподобно высокими скорости, выводимые из натурального хронометража с привлечением сейсмографических данных. При ледниковой катастрофе 1970 г. в Перу, когда ледовый обвал с горы Уаскаран вызвал мощнейший водо-ледовый сель и привел к гибели 23 тыс. людей в г. Юнгай [Morales Arnao, 1971], скорости доходили до 300 км/ч.

Представляется, что Геналдонский поток 2002 г. мог достичь столь высоких скоростей за счет двух обстоятельств. Во-первых, разгон ледово-каменного материала в верхнем секторе своего пути мог быть облегчен продвижением его по кровле мертвых льдов, которые, по нашим обследованиям 2001 г., прослеживались в долине на расстоянии по меньшей мере 3 км ниже фронта ледника Колка. Перекрывающий их моренный чехол, вероятно всего, был в 2002 г. содран передовыми порциями несущихся масс, после чего поток продолжал скольжение по обнажившемуся ледяному субстрату с минимальным трением. При продвижении ледово-каменной массы с ледника Девастэйшн во время катастрофы 1975 г. именно вскрытая линза мертвого льда сыграла главную роль в ускорении потока [Mokievsky-Zubok, 1978]. Во-вторых, факторами, способствующими быстрому и дальнему продвижению, могли стать постоянно возрастающее количество воды, которая играла роль смазки (она захватывалась из водотоков и небольших озер, высвобождалась из каверн и полостей ледника и образовывалась в результате фазовых переходов при движении ледяного потока), а также воздушная подушка и явления кавитации.

В заключение необходимо остановиться на точке зрения, озвученной во многих СМИ [Самарина, 2002], — о том, что происшедшее 20 сентября 2002 г. в Геналдонском ущелье представляло собой очередную подвижку пульсирующего ледника Колка, случившуюся ранее прогнозируемого срока. К. П. Рототаев и др. [1983] считали, что следующая после наблюдавшейся в 1969—1970 гг. пульсация произойдет здесь не ранее 30-х годов XXI в., исходя из периода подготовки порядка 65 лет, как это следует из цепочки дат известных Геналдонских катастроф: 1835, 1902, 1969 гг. В связи с этим предпринимались попытки объяснить, почему очередная

подвижка произошла чуть ли не вдвое раньше, чем ожидалось. Представляется, однако, что события 2002 г. вряд ли вообще следует считать классической пульсацией, происходящей через отрезок времени, более или менее фиксированный для каждого ледника, по меньшей мере по трем причинам.

1. Максимальные скорости пульсирующих ледников на стадии подвижки измеряются десятками метров в сутки, порой они превосходят 100 м/сут, однако скорости в десятки метров в секунду, отмечаемые в Геналдонском ущелье 20 сентября 2002 г., явно относятся к совершенно иным гляциальным явлениям.

2. При пульсациях выдвинувшийся вниз по долине язык не теряет связи с остальным телом ледника. В 2002 г. ледовое тело аккумуляции оказалось удаленным от оставшихся в изначальном вместилище фрагментов ледника на 15 км. Наши маршрутные обследования зоны транзита вниз по руслу Геналдона примерно от точки слияния потоков Майли и Колка до хвоста тела аккумуляции в створе с. Кармадон, предпринятые 6 октября, показали, что прирусловая часть долины не только свободна от сплошного льда, но и практически лишена ледяных останцов, которые появляются в заметном количестве только в нижней четверти зоны транзита, т. е. в 8—10 км ниже конца Колки в спокойном состоянии.

3. Переходу к быстрому продвижению языка вниз по долине (собственно сердцу) всегда предшествует стадия подготовки, на которой происходят разительные изменения в облике поверхности ледника от самого фронта до верховья: ледник дробится и растрескивается на множество изолированных блоков, сераков и т. п. На фотоматериалах вплоть до самых последних недель перед 20 сентября такой подготовки не отмечается. Сторонники версии пульсации рассматривают несколько дугообразных форм ледникового мезорельефа в прифронтальной части языка (крайне слабо различимых) как свидетельство распространения кинематических волн, вызывающих сердж. Однако данные валы мало чем отличаются от многих других похожих образований на поверхности ледника — лопастей морен, следов действия поверхностных водотоков, огив.

С другой стороны, можно согласиться с утверждением, что очередная подвижка Колки готовилась. В тыловой части Колки краснодарские туристы сфотографировали вздыбившуюся поверхность ледника, соизмеримую по высоте с левой береговой мореной, что скорее всего следует расценивать как действительный аргумент в пользу утверждения об активизации Колки. Тем не менее признаки активизации еще не означают саму подвижку. На пульсирующем леднике (а в пульсационности Колки сомневаться не прихо-

дится) признаки подготовки к сердцу должны наблюдаться заблаговременно. Однако неизвестно, как долго еще должен был „дозреть“ ледник после появления первых признаков до перехода в наступание.

Таким образом, нет строгих оснований считать, что обвал льда с Джимарай-хоха лишь усугубил уже идущую подвижку — неоспоримых свидетельств этой подвижки пока не предъявлено.

Сопоставление фактов 2002 г. с описаниями 1902 г. и более скудной информацией о 1835 г. вообще ставит под сомнение правомерность отнесения всех этих событий к категории ледниковых пульсаций в силу вышеприведенных причин. По сути дела на Колке строго документально доказана лишь одна пульсация — 1969/1970 г.; более ранние же катастрофы имеют гораздо больше общего с 2002 г., и потому их следовало бы также рассматривать как гляциальные ледово-каменные сели, порожденные скорее всего обвалами льда с висячих глетчеров. По-видимому, нельзя считать строго установленным характерный для данного ледника период подготовки каждого следующего сердца в 65—70 лет. Можно добавить, что строгая периодичность между пульсациями вообще в природе выдерживается лишь в одном частном случае — при стационарном климате. Ожидать же проявления жесткой ритмики, с установленным однажды периодом серджей, в эпоху глобальных климатических перемен неправомерно.

ОЦЕНКА ПРЕДСТОЯЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Имеющиеся данные не позволяют сделать достаточно четкие выводы о предстоящем развитии событий. Попробуем выразить мнение о будущем в виде экспертной оценки.

В верховьях долины, по всей вероятности, будет происходить восстановление исчезнувших висячих ледников и Колки. Вряд ли следует ожидать повторения катастрофических обвалов, несмотря на то, что обвалы не прекратятся (как не прекращались и ранее): из-за уже удаленных объемов льда долинной части Колки обваливающиеся массы в ближайшее время не смогут набрать столь угрожающего потенциала. Не исключены, однако, прорывы Колкинского озера с образованием селевых потоков.

По-видимому, не следует ожидать катастрофических последствий от эволюции ледника Майли. Сам по себе он никогда не был источником бедствий, а поступление массы с его верхних поясов на язык отчасти регулировано грандиозным ледопадом.

В зоне транзита от ледника Майли до Кармадонской котловины ледовые массы растают в течение одного-двух лет. Ледово-каменные заплески на склонах будут разрушаться путем

осыпания и оползания в днище долины. Массивы льда в прирусловой части будут, помимо таяния, вовлекаться и в селевые процессы.

Ледовое тело в Кармадонской котловине будет таять существенно дольше. Дольше всего мертвые льды сохранятся, по-видимому, в осевой части долины, между с. Нижнее Кани и Кармадонскими воротами, где в настоящее время лед имеет наибольшую толщину. Расчеты на основании формулы А. Н. Кренке и В. Г. Ходакова [1966] показывают, что если бы тело аккумуляции состояло из чистого льда, то оно могло бы стоять за 7—8 лет. В реальности, этот процесс будет идти гораздо медленнее из-за бронирующего эффекта литогенного материала на дневной поверхности, который, при постоянном вытаивании и просадках будет увеличивать свою толщину, усиливая во времени эффект экранирования и тем самым сводя все к нестационарной задаче. Опыт решения таких задач имеется [Bozhinskiy et al., 1986], а применение его в данном случае растягивает процесс полного стаивания льда в Кармадонской котловине на первые десятки лет. Правда этот срок может быть сокращен деятельностью водотоков. Вероятно, к лету 2003 г. оформятся пути стока рек Геналдон и Кауридон через ледовое тело. В южной части тело будет разрушаться быстрее из-за термоэрозии водами р. Геналдон. Участок открытого русла Геналдона будет удлиняться от пос. Кармадон вниз по долине. В районе Кармадонских ворот сток, возможно, еще какое-то время будет проходить по подледным каналам.

Основные преобразования в долине ниже Кармадонских ворот, по-видимому, уже произошли. Из-за таяния ледового тела можно ожидать изменение режима р. Геналдон, увеличение ее расходов по сравнению с докатастрофическими показателями. В случае прорывов временных озер будут сходиться сели и паводки, которые могут достичь с. Гизель.

Все перечисленные выводы являются предварительными. В долине Геналдона в ближайшее время нужно провести комплексные исследования, направленные на всестороннее изучение процессов, происходящих на ледовом теле, новообразованных озерах, в цирке ледника Колка и на стене Джимарай-хоха. Безусловно, тут требуется тщательный масс-балансовый, гидрологический и фотограмметрический мониторинг. Следует также наладить систему оповещения людей, находящихся в долине, чтобы в случае возникновения опасности обойтись без жертв.

Геналдонская гляциальная катастрофа 2002 г. относится к событиям планетарного значения. Долина р. Геналдон является бассейном,

равного которому по объемам одновременно перемещенного вещества нет в России, поэтому изучение его в будущем могло бы помочь избежать новых трагедий в горах.

Авторы выражают благодарность С. А. Баскаеву, Е. А. Гридневу, А. П. Полквому (Управление природных ресурсов по РСО-А, Владикавказ), А. Н. Божинскому и А. В. Розовой (Географический факультет МГУ, Москва), Б. А. Дзгоеву (МЧС РСО-А, Владикавказ), И. З. Владимирской, Д. В. Добрынину, Н. О. Шумилиной (ИТЦ СканЭкс, Москва), И. В. Галушкину, О. А. Гончаренко (НИЛ „Геологоразведчик“ ФГУП „Севосгеологоразведка“, Владикавказ), Л. Д. Долгушину (Музей земледования МГУ, Москва), Э. В. Запорожченко (ОАО „Севкавгипроводхоз“, Пятигорск), Б. В. Малахову, Н. В. Обуховой (Турклуб МАИ, Москва), М. Ю. Никитину (Геологический факультет МГУ, Москва), Дж.А. Робинсон (NASA Johnson Space Center, США), О. Н. Рыжанову (Горный клуб „Каскад“, Владикавказ), Е. С. Таратынко (ДГУ ГП „Цветметразведка“, Владикавказ), А. В. Фалину (команда „Форпост“, Краснодар) за содействие, помощь и предоставление материалов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 00-05-64825а, 00-15-98505, 02-05-79112к).

Литература

- Варданиц Л.А. Геотектоника и геосейсмика Дарьяла как основная причина катастрофических обвалов Девдоракского и Геналдонского ледников Казбекского массива // Изв. Гос. геогр. о-ва, 1932, т. 64, вып. 1, с. 51—60.
- Каталог ледников СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Ч. 10. Бассейны рек Фиагон, Гизельдон. Ч. 11. Бассейн верховьев р. Терек. Л., Гидрометеиздат, 1977, 67 с.
- Кисин И.М., Тертеров А.А. Обвал ледника Муркар // Природа, 1961, № 2, с. 66—67.
- Кренке А.Н., Ходаков В.Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // Материалы гляциол. исслед., 1966, вып. 12, с. 153—164.
- Обвал Геналдонского ледника // Ежегодник Кавказского горного общества в г. Пятигорске / Под ред. П.Н. Первого. Пятигорск, тип. Е.П. Садовникова, 1904, № 1 за 1902 и 1903 гг., с. 61—66.
- Панов В. Трагедию в Северной Осетии спровоцировало землетрясение // Известия от 09.10.2002, с. 2.
- Поггенполь Н.В. По северным долинам Казбекского массива и первое восхождение на Майли-хох // Ежегод. Рус. горн. о-ва, 1903, т. 3. М., 1905, с. 1—37.
- Полквой А.П. Каковы же причины схода ледяной лавины // Северная Осетия, № 178 (23735) от 24.09.2002.
- Рототаев К.П. Ледник Колка — факты и выводы // Материалы гляциол. исслед., М., 1974, вып. 24, с. 109—116.
- Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Исследование пульсирующего ледника Колка. М., Наука, 1983, 168 с.
- Самарина А. Виновной объявлена природа // Время МН, № 175 от 28.09.2002, с. 1, 3.

ГЛЯЦИАЛЬНАЯ КАТАСТРОФА 2002 ГОДА В СЕВЕРНОЙ ОСЕТИИ

Ходаков В.Г. Измерение, расчет и прогноз деградации новообразованного языка ледника Колка // *Материалы гляциол. исслед.*, 1974, вып. 24, с. 125—136.

Штебер Э.А. Ледниковые обвалы в истоках р. Геналдон на Кавказе // *Терский сб.*, Екатеринослав. научн. о-во, 1903, т. II, № 7, с. 72—81.

Bozhinskiy A.N., Krass M.S., Popovnin V.V. Role of debris cover in the thermal physics of glaciers // *J. Glaciology*, 1986, vol. 32, No. 111, p. 255—266.

Kolka Glacier, Russia. <http://www.jsc.nasa.gov/images/eol/kolka.html> 14.11.2002.

Mokievsky-Zubok O. A slide of glacier ice and rocks in Western Canada // *J. Glaciology*, 1978, vol. 20, No. 82, p. 215—217.

Morales Arnao B. El día más largo en el Hemisferio Sur // *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología*, 1971, No. 9, p. 63—71.

*Поступила в редакцию
18 ноября 2002 г.*