

## ПО СЛЕДАМ ГЕНАЛДОНСКОЙ КАТАСТРОФЫ: ГОД СПУСТЯ

Д. А. Петраков<sup>1,2</sup>, О. В. Тутубалина<sup>1,2</sup>, С. С. Черноморец<sup>2</sup><sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, Россия<sup>2</sup> Университетский центр инженерной геодинамики и мониторинга (УЦИГМ), 125252, Москва, ул. Куусинена, 25, Россия

Оценено состояние верхней и средней части зоны Геналдонской ледниковой катастрофы 20 сентября 2002 г. и проведен анализ изменений, произошедших за год. По результатам полевых исследований и анализа космических снимков высокого разрешения, объем льда ледника Колка, вовлеченного в катастрофическое движение, оценен в  $80 \pm 15$  млн м<sup>3</sup>; часть ледника, возможно, все еще остается в ложе. Составлена карта состояния ледникового цирка Колка через год после катастрофы. По наблюдениям лета 2003 г., в верхней части цирка обвально-осыпные процессы в дневное время шли непрерывно, а небольшие сели формировались несколько раз в час. В ледовом теле, находящемся в Кармадонской котловине, отмечены активное образование трещин и распад массивов льда на блоки в период с мая 2003 г. Деградация ледового тела идет более быстрыми темпами, чем предполагалось ранее, вследствие обрушения блоков льда над поверхностными и подледными руслами рек. Из 13 новых озер, образовавшихся в конце сентября 2002 г., к концу лета 2003 г. остались только три. На основе новых данных уточнен прогноз развития событий в зоне катастрофы: в ближайшие 10–20 лет новые катастрофические процессы в ледниковом цирке Колка маловероятны; ледовое тело в Кармадонской котловине растает за 2–3 года, но его полная деградация займет не менее 10 лет.

*Ледник, катастрофа, обвал, гляциальные озера, экзарация, деградация льда*

## THE 2002 GENALDON GLACIAL CATASTROPHE: ONE YEAR LATER

D. A. Petrakov<sup>1,2</sup>, O. V. Tutubalina<sup>1,2</sup>, S. S. Chernomorets<sup>2</sup><sup>1</sup> Moscow State University, 119992, Moscow, GSP-2, Leninskie Gory, Russia<sup>2</sup> University Centre for Engineering Geodynamics and Monitoring (UCEGM), 125252, Moscow, Kuusinen str., 25, Russia

We assess the state of the upper and middle parts of the area affected by the 20 September 2002 Genaldon glacier catastrophe and analyse changes which occurred during one year after the event. On the basis of field data and the analysis of high-resolution satellite images we estimate the volume of Kolka Glacier, moved by the catastrophe, at  $80 \pm 15$  million m<sup>3</sup>. Part of the glacier may be still in its bed. A map of the Kolka Glacier cirque one year after the catastrophe has been compiled. In summer 2003, continuous rockfalls were observed in the upper part of the cirque during daytime, and small debris flows occurred several times per hour. The ice body in the Karmadon depression is being actively dissected by crevasses; blocks of ice are being destroyed since May 2003. The ice body degradation is happening quicker than expected due to fast degradation of ice above river channels. Out of 13 new lakes, formed in the area at the end of September 2002, only three had been left by the end of summer 2003. New data allow us to update the forecast for the catastrophe area: no new catastrophic processes are expected in the Kolka Glacier cirque in the next 10 to 20 years; the ice body in the Karmadon depression will mostly melt in the next 2–3 years, though its complete degradation will take at least 10 years.

*Glacier, catastrophe, rockfall, glacial lakes, exaration, ice degradation*

## ВВЕДЕНИЕ

Прошел год с момента, когда в Северной Осетии (рис. 1) произошла ледниковая катастрофа мирового значения. Гигантские объемы перемещенного вещества, необычайно высокие скорости движения, большое количество жертв в Кармадонской котловине и долине р. Геналдон выделяют это событие 20 сентября 2002 г. из ряда других.

Катастрофа вызвала обширные дискуссии среди специалистов. Высказывались различные мнения о причинах события и механизме его развития [Полквой, 2002; Осокин, 2002; Панов и др., 2002; Десинов, 2003; Запорожченко, 2002; Kääh et al., 2003; Осипова, Цветков, 2003; Котляков и др., 2003;

Котляков, Рототаева, 2003]. Точка зрения авторов изложена в работе, написанной совместно с В.В. Поповниным [Поповнин и др., 2003].

До сих пор главным объектом научного интереса было объяснение причин катастрофы и механизма ее развития. Большинство публикаций базируется на материале, полученном в течение первых недель после катастрофы. Однако почти отсутствовали наземные материалы о верховьях бассейна, без чего анализ приходилось основывать на большом количестве допущений.

Основной целью данной статьи является оценка современного состояния верхней и средней



Рис. 1. Местоположение района исследований.

части зоны ледниковой катастрофы (выше Скалистого хребта) и анализ изменений, произошедших за год с момента события. Для этого были проведены исследования, результаты которых позволяют сделать некоторые выводы о предстоящем развитии процессов в ледниковом цирке Колка и зоне транзита ледово-водно-каменных масс, оценить темпы деградации ледового тела и изменений временных озер в Кармадонской котловине.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Полевые исследования.** Исследование долины р. Геналдон летом 2003 г. проводилось в четыре этапа. 17–21 июня осуществлены полевые маршруты в зоне транзита от Кармадонских ворот до языка ледника Майли и наблюдения стены г. Джимарай-хох. 10–12 июля под руководством И.В. Крыленко промерены глубины Санибанского озера эхолотом с GPS-привязкой. 14–19 августа и 26–29 сентября проводились полевые обследования верховий долины р. Геналдон — от верхней части ледового завала в Кармадонской котловине до тыловой части ледника Колка. В ходе полевых обследований проводились геоморфологические описания ключевых участков, географическая привязка точек с помощью приемников GPS, фотографирование, дешифрирование космических снимков. При анализе авторы использовали также материалы предыдущих полевых работ, проведенных 22 сентября 2001 г. и 3–7 октября 2002 г.

**Аэрокосмические и наземные снимки.** Нами использовались материалы прицельной цифровой космической съемки IRS LISS/Pan, проведенной ИТЦ „СканЭкс“ в районе катастрофы в 2002–2003 гг. для оценки возможности оперативного мониторинга ситуации [Тутубалина, Черноморец, 2003]. Получена серия качественных малооблачных вертикальных снимков за 10 дат в период с 19 октября 2002 г. по 30 августа 2003 г., с пространственным разрешением 5,8 м (панхроматическая съемка) и 23 м (многозональная съемка). Снимки проходили предварительную обработку в ИТЦ „СканЭкс“,

включавшую радиометрическую и геометрическую коррекцию, совмещение результатов панхроматической и многозональной съемки. Впоследствии мы проводили уточняющую географическую привязку фрагментов снимков на Кармадонскую котловину и ледниковый цирк Колка по опорным точкам в программе ERDAS Imagine, с приведением в проекцию Гаусса–Крюгера на эллипсоиде Красовского, со средней квадратической ошибкой трансформирования менее 20 м. Более точное трансформирование невозможно без детальной цифровой модели рельефа ледникового цирка Колка после катастрофы, для создания которой требуется кондиционная фотограмметрическая съемка или аэрофото-съемка, до настоящего момента не проведенная.

Для анализа произошедших за год изменений сравнивались снимки, полученные авторами в полевые сезоны 2001–2003 гг. (рис. 2), наземные и

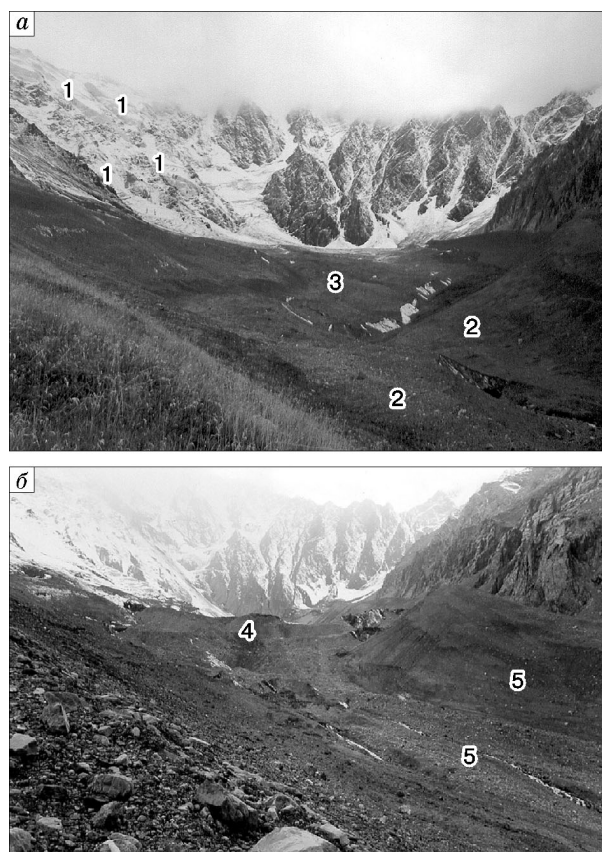


Рис. 2. Ледниковый цирк Колка за год до катастрофы и через год после нее.

а — 22 сентября 2001 г., фото С.С. Черноморца; б — 26 сентября 2003 г., фото Д.А. Петракова. 1 — висячие ледники на склонах г. Джимарай-хох; 2 — массивы мертвых льдов, покрытые мореной; 3 — замороженный язык ледника Колка; 4 — аккумулятивные массивы ледяных конгломератов во вместилище ледника; 5 — поверхности морен с наложенным экзарационным микрорельефом (каменные мостовые, флютинг).

вертолетные снимки 2002 г., выполненные Д.Е. Соллодким, И.В. Галушкиным, А.П. Полквым и О.Н. Рыжановым.

**Оценка объема ледовых масс, ушедших из ледникового цирка.** Поскольку инструментальные съемки ледника Колка после катастрофы 2002 г. не проводились, можно лишь приблизительно оценить объемы выноса, сравнивая разновременные наземные и космические снимки. По наземным снимкам в период с сентября 2001 г. по сентябрь 2003 г. было установлено положение поверхности ледника Колка относительно боковых морен. Далее на снимке IRS LISS/Pan 11 июля 2003 г. была оцифрована соответствующая граница ледника до катастрофы (не включающая примыкающие висячие и присклоновые ледники). Затем на том же снимке была оцифрована граница участка, вмещающего оставшиеся после катастрофы фрагменты ледника Колка. В пределах созданных границ были выявлены 19 точек GPS-определений, высоты которых хорошо соответствовали высотам на топографической карте масштаба 1:50 000. С использованием наземных фотографий были проведены сгущение сети высотных отметок в программе ArcView и интерполяция модельных поверхностей ледника до и после катастрофы 20 сентября 2002 г. Интерполяция осуществлялась в программе ERDAS Imagine (для каждой поверхности использовались 35–40 высотных отметок, размещенных оптимальным образом для учета характерных форм рельефа). Затем полученные поверхности вычитались в пределах границ участка до катастрофы. Высоты точек сгущения определялись с погрешностью 10–15 м, что при площади участка около 1,3 млн м<sup>2</sup> приводит к погрешности оценки объема около ±15 млн м<sup>3</sup>. За счет малого количества точек сгущения и неточностей интерполяции ошибка может быть даже несколько больше.

**Составление карты состояния ледникового цирка Колка через год после катастрофы.** В основу карты (рис. 3) положены результаты полевого и камерального дешифрирования космического снимка IRS LISS/Pan 11 июля 2003 г., приведенного к пространственному разрешению 5,8 м. При составлении карты использовались также данные полевых исследований авторов, материалы дистанционных и наземных съемок сентября 2001–сентября 2003 г., схема ледников верховий долины р. Геналдон в конце 1960-х годов [Рототаев и др., 1983], составленная нами карта зоны катастрофы [Поповнин и др., 2003]. Все содержание карты разделено на три группы: объекты, сохранившие свое положение при катастрофе 2002 г.; объекты, связанные с катастрофой; изменения после нее.

Рисовка контуров осуществлялась в программе ArcView путем цифрования по экрану, с использованием ранее созданных геоинформационных слоев (карт и разновременных космических снимков, трансформированных в проекцию Гаусса–Крюгера).

## ПРИНЯТАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Произошедшая в Осетии ледниковая катастрофа относится к нетипичным явлениям, поэтому общепринятая терминология не подходит для обозначения отдельных объектов и процессов.

Для названия указанного события обычно употребляются такие обозначения, как „Кармадонская катастрофа“, „Геналдонская катастрофа“, а также разговорное выражение „сход ледника Колка“. В данной статье мы используем название „Геналдонская катастрофа“, поскольку затронутой оказалась не только Кармадонская котловина, но и другие части долины р. Геналдон. Применительно ко всей Геналдонской катастрофе использовать такие термины, как „обвал“, „сель“, „лавины“ не слишком удачно, поскольку катастрофическое событие, по нашему мнению, состояло из каскада процессов, переходящих один в другой.

Обозначим содержание, вкладываемое в отдельные понятия, используемые в данной статье.

„Ледниковым цирком Колка“ именуется верховья долины р. Геналдон, ограниченные горными хребтами сверху и языком ледника Майли снизу.

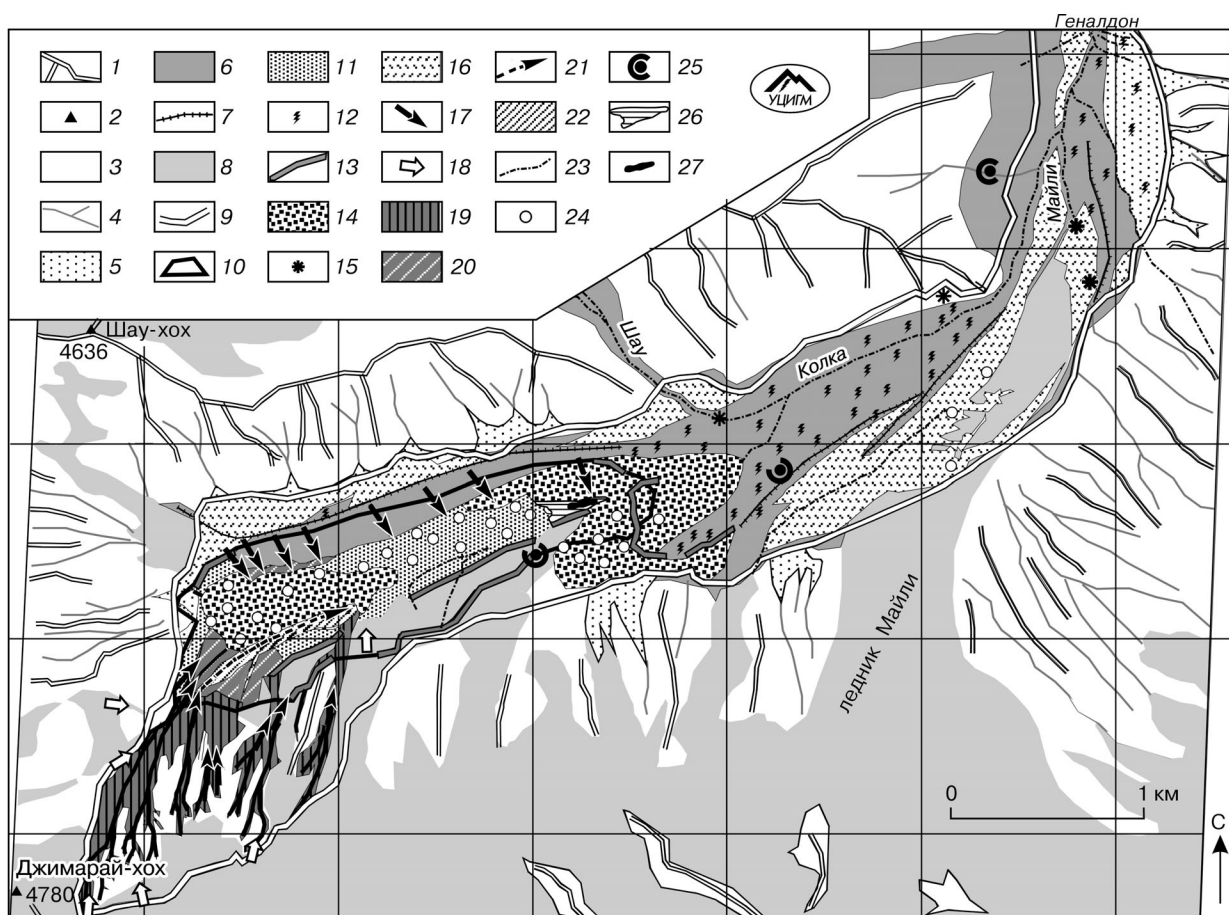
Возникает вопрос о том, как назвать участок, на котором была расположена основная часть ледника Колка, покинувшая ледниковый цирк в момент катастрофы. Использование термина „ложе ледника“ подразумевало бы отсутствие льда под обломочными отложениями, но пока неизвестно, так ли это. Вслед за специалистами Института географии РАН [Котляков, Рототаева, 2003; Осипова, Цветков, 2003] для обозначения указанной части цирка мы используем термин „вместилище ледника“.

При описании небольших холмиков мелкодисперсного грунта высотой от 0,5 до 5,0 м, распространенных во вместилище Колки и не имеющих ледяного ядра, условно применяется обозначение „муравьиные кучи“.

Еще одним из терминов, которые следует определить, является „ледовое тело“ в Кармадонской котловине. Представляется, что на данный момент это массив мертвого льда с литогенными включениями, образовавшийся после быстрого перемещения и остановки ледово-водно-каменных масс и покрытый обломочным чехлом.

Для обозначения процессов таяния льда под воздействием текущей воды постоянных и временных водотоков можно использовать близкие в данном контексте термины „механическая абляция“ и „термоэрозия“. Поскольку речь идет о разрушении ледового тела, выбор сделан в пользу понятия „механическая абляция“.

Остальная терминология, в том числе применявшаяся при составлении карты состояния ледникового цирка Колка через год после катастрофы, соответствует общепринятой [Гляциологический словарь, 1984; Тимофеев, Маккаев, 1986].



**Рис. 3. Карта состояния ледникового цирка Колка через год после катастрофы. Составлена по данным полевых исследований сентября 2001—сентября 2003 г. с использованием космического снимка IRS LISS/Pan 11 июля 2003 г.**

*Объекты, сохранившие свое положение при катастрофе 2002 г.:* 1 — скальные гребни, 2 — вершины, 3 — скалы, склоны овально-осыпного сноса, 4 — денудационные лотки, 5 — осыпные конусы и шлейфы, 6 — морены, 7 — гребни морен, 8 — ледники, снежники.

*Объекты, связанные с катастрофой 2002 г.:* 9 — граница зоны катастрофы; экзарационные формы: 10 — вместилище масс ледника Колка, ушедших в ходе катастрофы, 11 — днище вместилища с рельефом „муравьиных куч“, 12 — поверхности с экзарационным микрорельефом (штриховка, шлифовка, флютинг), 13 — ледяные обрывы; аккумулятивные формы, 14 — массивы переотложенного льда, 15 — фрагменты льда, впрессованные в ложбины и скальные кулуары (на 17 августа 2003 г.), 16 — переотложенные морены с включениями льда.

*Изменения после катастрофы:* 17 — скальные обвалы и осыпание, 18 — очаги ледовых обвалов, 19 — обновленные обвальнo-осыпные лотки, 20 — обновленные обвальнo-осыпные конусы и шлейфы, 21 — сели высокой повторяемости, 22 — селевые отложения, 23 — русла водотоков со следами селей, 24 — термокарст и деградация „муравьиных куч“, 25 — оползни, 26 — временные озера в октябре 2002 г., 27 — временные озера в июле 2003 г.

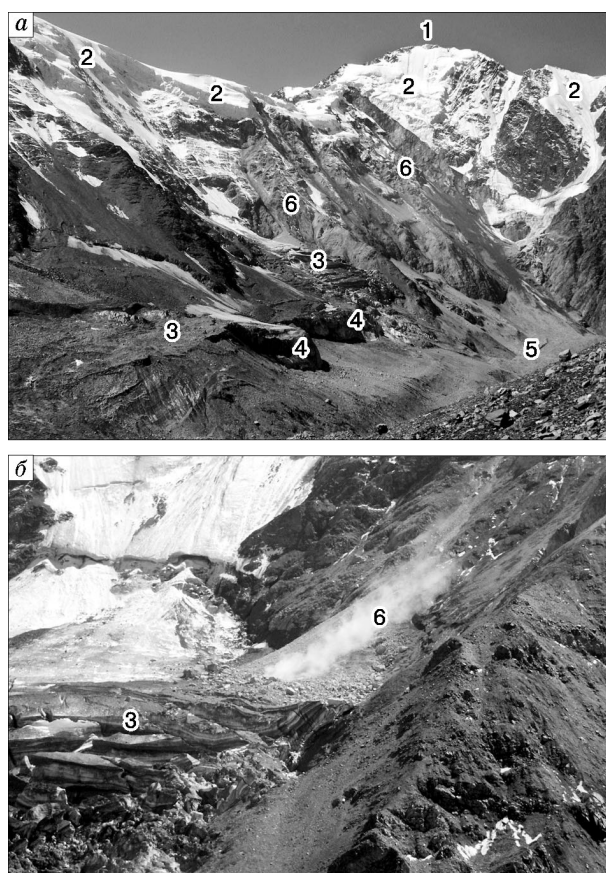
## ИЗМЕНЕНИЯ В ЗОНЕ КАТАСТРОФЫ

### Ледниковый цирк Колка

Наибольший интерес представляет развитие процессов в ледниковом цирке Колка, из которого начался катастрофический процесс. Цирк расположен на высотах 2700—4700 м на северном склоне Казбекско-Джимарайского массива в труднодоступной местности. По причинам синоптического (частые туманы) и организационного характера (недостаток финансирования, близость государст-

венной границы России) здесь затруднено и проведение аэросъемок. Поэтому сведения о процессах в цирке были достаточно скудными.

**Стена г. Джимарай-хох.** Активность экзогенных процессов в ледниковом цирке Колка остается высокой до настоящего времени (рис. 4). Ледово-каменные обвалы на северном склоне г. Джимарай-хох продолжают, после октября 2002 г. существовавшие ранее обвальнo-осыпные лотки были пройдены заново (см. рис. 4, а). В дневное время летом 2003 г. обвалы происходили практически непрерывно, а



**Рис. 4. Начальный участок зоны катастрофы по состоянию на 17 августа 2003 г. (фото О.В. Тутубалиной).**

*а* — стена г. Джимарай-хох, висячие ледники, ледяные обрывы в цирке Колка; *б* — выдвинувшийся правый боковой ледник и обвально-осыпные процессы на его поверхности.

1 — вершина г. Джимарай-хох; 2 — висячие ледники; 3 — боковые ледники — бывшие фрагменты Колки; 4 — ледяные стенки отрыва; 5 — вместилище ледника Колка; 6 — обвально-осыпной процесс.

небольшие селевые потоки у подножия склона формировались несколько раз в час. В конце сентября 2003 г. обвальная активность на северном склоне Джимарай-хоха уменьшилась.

Очагом камнепадов является также левая береговая морена Колки, особенно ее верхняя часть. Осыпание обломков активизируется из-за вытаивания льда.

По-видимому, активизация обвалов на стене г. Джимарай-хох началась летом 2002 г. Наблюдения показывают, что в 2003 г. доля скальных пород в обвальном материале была в несколько раз больше, чем льда. Это согласуется и с данными о характере обвалов, предшествовавших другим гляциальным катастрофам, происходившим в прошлом на ледниках Казбекско-Джимарайского мас-

сива. Так, скальные обвалы предшествовали ледниковым катастрофам XIX в. на Девдоракском леднике [Статковский, 1877]. Обвалы со скального массива Багни в 1909 г. предвещали катастрофу на леднике Абано [Духовской, 1917].

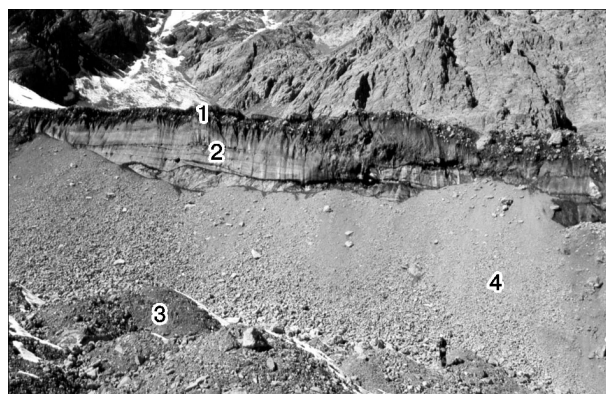
**Ледник Колка.** Один из наиболее актуальных вопросов — остался ли лед на месте ледника Колка после катастрофы. Высказывались мнения, что „ледник ушел из своего вместилища полностью, оставив обнаженным скальное ложе“ [Котляков, Рототаева, 2003], „ледник... полностью «вылетел» из своего вместилища“ [Осинова, Цветков, 2003].

Мы попытались оценить изменение объема льда Колки во вместилище за период с сентября 2001 г. до сентября 2003 г. По результатам расчетов, объем льда, вынесенного из цирка вниз по долине, за этот период составил  $80 \pm 15$  млн м<sup>3</sup> при площади этого участка около 1,3 млн м<sup>2</sup>. Таким образом, средняя толщина слоя ушедшего льда составляет около 60 м. В дискуссионной части статьи эти результаты сравниваются со значениями объемов, полученными К.П. Рототаевым и др. [1983].

Бывшие боковые притоки ледника Колка стали самостоятельными ледниками, круто обрывающимися во вместилище Колки. Один из правых боковых ледников-притоков начал наступать, на нем стали образовываться широкие поперечные разломы и ледопады. Обрушения льда и движение вперед усиливаются в связи с интенсивным накоплением материала скальных обвалов на поверхности ледника (см. рис. 4, б). С конца сентября 2002 г. по 11 июля 2003 г. этот ледник продвинулся к осевой части вместилища на 180–200 м.

**Аккумулятивные образования.** Сразу после катастрофы поверхность вместилища была покрыта блоками раздробленного льда, которые потом частично растаяли. В ходе полевых наблюдений 2003 г. во вместилище ледника были обнаружены четыре массива, перпендикулярных к направлению долины. Они покрыты мореной, в двух массивах имеются обнажения льда. Лед в массивах рыхлый и характеризуется отсутствием слоистости, что свидетельствует о его быстром и хаотичном перемещении к месту нынешнего залегания. Общий объем этих массивов составляет порядка 5–8 млн м<sup>3</sup>. Ледяные скопления находятся рядом с экзарационными поверхностями. Около половины площади вместилища представляет из себя рельеф с многочисленными „муравьиными кучами“. На глубинах до 130 см лед в этих кучах не был обнаружен. Скальные выходы на дне цирка отсутствуют.

На рис. 5 виден ледяной конгломерат, перекрывающий толщу ненарушенного глетчерного льда в верхней части вместилища. Отмечен перехлест ледово-каменной массы через левую береговую морену Колки. Заплеск заполнил карман морены на протяжении 1500 м. В нижней части морену перехлестнул второй заплеск.



**Рис. 5. Верхняя часть вместилища ледника Колка (фото Д.А. Петракова, 27 сентября 2003 г.).**

1 — ледяной конгломерат, перекрывший в момент катастрофы толщу глетчерного льда; 2 — ненарушенный слоистый глетчерный лед в месте отрыва тыловой части ледника; 3 — аккумулятивные формы, сложенные перемещенным льдом в днище цирка; 4 — осыпной шлейф.

Массивы переотложенного льда толщиной до 10–15 м, перенесенные через общую морену ледников Колка и Майли, сохранились около языка ледника Майли и на его поверхности. После протаивания над крупными трещинами в воронках обнажилось напластование такого льда (рис. 6, а).

**Экзарационный микрорельеф.** Комплекс форм экзарационного микрорельефа встречается в разных частях цирка, но основные его площади расположены ниже вместилища ледника и аккумулятивных массивов.

При катастрофическом передвижении массы ледника Колка отшлифовали подстилающие поверхности ниже по долине и создали своеобразные „мостовые“. На валунах обнаружена экзарационная штриховка, позволяющая судить о направлениях движения потока (рис. 7, а).

Морены ледников Колка и Майли в основном устояли под воздействием перемещаемой массы. Их поверхность была лишь „затесана“ обломками, двигавшимися в нижней части ледника. Образовались своеобразные каменные мостовые, покрытые валунами со штриховкой (см. рис. 7, б). Глубина штриховых борозд достигает 0,5–3,0 мм. Штриховка на камнях в пределах цирка направлена преимущественно по азимуту 65–80°. Почти во всех случаях штриховка имеет единственное направление, и лишь на одном участке удалось обнаружить след повторного перемещения массы под острым углом к первоначальному.

Отмечен также флютинг — рельеф продольных параллельных желобков и грядок, последние из которых представляют собой ухвостья в „тени“ полутотпрепарированных валунов. На проксималь-



**Рис. 6. Следы движения ледово-каменных масс в момент катастрофы.**

а — пористый ледяной конгломерат, покрытый мореной, на поверхности языка ледника Майли (фото С.С. Черноморца, 16 августа 2003 г.); б — перехлест через правобережную морену ледника Майли на повороте долины (фото С.С. Черноморца, 18 августа 2003 г.). 1 — язык ледника Майли, 2 — переотложенный лед Колки, 3 — обнажение глетчерного льда Майли в воронке вытаивания под переотложенным льдом Колки, 4 — заплеск льда на осыпном склоне, 5 — правобережная морена ледника Майли.

ных поверхностях валунов сохранились следы динамических ударов, приведших к дроблению горных пород без дальнейшего переноса. За дистальной частью такого валуна следует постепенно выклинивающееся ухвостье протяженностью до 50 м.

**Временное Колкинское озеро,** образовавшееся вскоре после катастрофы и имевшее длину около 300 м в октябре 2002 г., к июлю 2003 г. уменьшилось в несколько раз, к августу распалось на три части, а к сентябрю почти исчезло. Полевые исследования показали, что озеро было подпружено уступом из принесенного рыхлого льда, а не скальным ригелем, как предполагалось ранее некоторыми специалистами. Следы прошлых уровней озера находятся на высоте до 3–5 м над дном и маркируются глинистым налетом на лежащих в озерной котловине валунах.





Рис. 7. Следы экзарации.

*a* — штриховка на валунах, образовавшаяся под воздействием мелких быстро летящих обломков в нижней части перемещавшихся ледниковых масс (фото С.С. Черноморца, 16 августа 2003 г.); *б* — каменные „мостовые“ на подстилающих моренах (фото О.В. Тутубалиной, 17 августа 2003 г.). Стрелка показывает направление движения при катастрофе.

#### Морены как „рассекатели“ ледового потока.

При ударе ледниковой массы в морену, расчленившую языки ледников Колка и Майли, поток разделился на две части. Основная часть пошла вдоль русла р. Колка, вторая перепрыгнула морену и прошла по языку ледника Майли. Вероятно, при перемещении по леднику поток ускорился, поэтому после удара о правобережную морену Майли он поднялся на склон с некоторым набором высоты (см. рис. 6, б) и образовал самый высокий (до 150 м над руслом) дугообразный заплеск по правому борту на повороте долины.

В осевой части совместной морены ледников Колка и Майли, находившейся между двумя ледовыми потоками, сохранился фрагмент гребня с нарушенным травяным покровом.

#### Зона транзита

**Деградация ледовых заплесков.** В долине р. Геналдон, между ледниковым цирком Колка и Кармадонской котловиной, движение ледово-водно-каменного потока имело транзитный характер на протяжении 8,5 км. Зона транзита представляет собой прямолинейный участок долины с большим количеством ледовых заплесков, осыпными бортами высотой 50–130 м, на которых имеется значительное количество селеактивных кулуаров. Левый борт осложнен также серией небольших оползней. Формы флютинга на склонах в верхней части зоны транзита образуют две системы направлений, одна из которых наложена на другую. По-видимому, это свидетельствует о том, что во время катастрофы по зоне транзита прошло не менее двух волн движения ледово-водно-каменной массы.

Быстро разрушались массивы ледово-каменного конгломерата, оставшиеся в виде заплесков на склонах. Таяние льда приводило к широкому развитию осыпных процессов, активизации небольших оползней и микроселей. Интенсивность осыпания на склонах, где сохранились ледовые заплески, оставалась на высоком уровне, однако объем сохранившихся заплесков к сентябрю 2003 г. резко уменьшился. После исчезновения льда склоны имели тенденцию к стабилизации, скорость осыпных и оползневых процессов снижалась во много раз.

**Миграция русла.** Остатки льда в днище долины в начале лета еще занимали значительную площадь, но быстро деградировали. В июне р. Геналдон была в двух местах перекрыта льдом и текла в ледовых тоннелях длиной 100–150 м, однако к августу оба моста обрушились и растаяли.

Выше устья левобережного притока (р. Белая) имеются следы посткатастрофической миграции русла р. Геналдон. Брошенный сухой участок русла под левым бортом имеет длину более 1 км. Новое русло реки расположено под левым бортом и врезано на 12–15 м глубже предыдущего.

Перед ледовым телом в Кармадонской котловине, в зоне подпора происходила аккумуляция флювиогляциальных отложений. По оценке Ш.С. Муратова (устное сообщение), отметки русла выше ледового тела за весну и лето 2003 г. поднялись больше чем на 10 м.

**Режим селевых процессов.** Имеются следы перекрытия р. Геналдон до лета 2003 г. в средней части зоны транзита, ниже устья р. Белая, явившегося результатом обвально-осыпных процессов с левого борта. После прорыва по главному руслу образовался селевой поток, оставивший валы протяженностью до 0,5 км.

При сильных ливнях одновременный сход микроселей объемом 0,5–10,0 тыс. м<sup>3</sup> происходит в зоне транзита по 20–30 лоткам и руслам притоков. Такой массовый сход наблюдался нами при грозе 15 августа 2003 г., причем по руслу р. Геналдон, в результате схода мелких селей по притокам, сформировался наносоводный паводок.

### Кармадонская котловина

**Ледовое тело**, расположенное в Кармадонской котловине, является на сегодняшний день одним из наиболее динамичных объектов. Его объем на конец сентября 2002 г. составлял около 115 млн м<sup>3</sup>, мощность льда в отдельных местах достигала 140 м [Поповнин и др., 2003]. После катастрофы идет активное таяние льда и разрушение его водными потоками.

Поверхностную абляцию ледового тела можно оценить, используя известную формулу Кренке—Ходакова [Кренке, Ходаков, 1966]. Расчет по ней показывает, что в 2003 г. мощность ледового тела, если бы оно состояло из чистого льда, должна была уменьшиться на 18–20 м. Однако фактически наблюдаемая поверхностная абляция должна быть существенно меньше из-за моренного чехла, покрывающего ледовое тело. Его толщина практически везде превышает 5–10 см, достигая на отдельных участках 1 м. Наблюдения на леднике Колка показали, что слой морены в 10 см уменьшает абляцию в два раза [Алябьев, Рототаев, 1972]. Таким образом, за счет поверхностного таяния средняя толщина ледового тела должна была уменьшиться, ориентировочно, на 9 м.

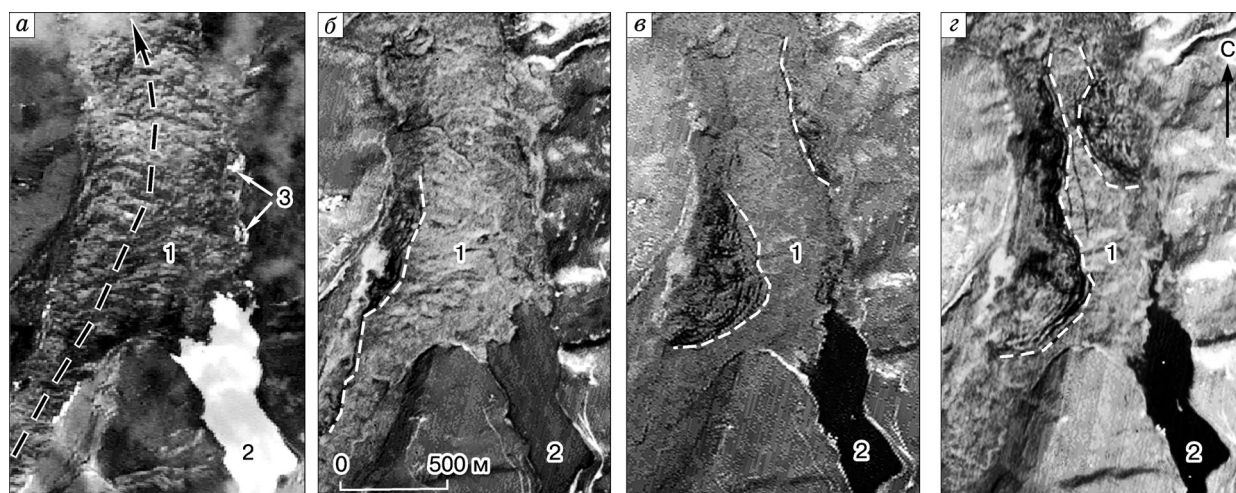
Как и предполагалось ранее [Поповнин и др., 2003], определенную роль в таянии ледового тела играет гидротермическая и механическая абляция за счет постоянных и временных водотоков. На рис. 8 видна система просадок и трещин, которые образуются над мигрирующим руслом р. Геналдон вследствие обрушения гrotтов. В отдельных местах просадки понижают поверхность ледового тела на



**Рис. 8.** Обрушение ледяных блоков по краю ледового тела, примыкающему к котловине спущенного озера (фото С.С. Черноморца, 17 июня 2003 г.).

1 — зона образования трещин отседания, 2 — днище исчезнувшего озера, 3 — флювиогляциальные отложения р. Геналдон.

первые десятки метров. Система трещин активно развивается, 30 августа она находилась в 230 м от Санибанского озера, за три месяца приблизившись к нему на 320 м (рис. 9). Помимо гидротермической и механической абляции значительную роль в таянии может играть и турбулентное тепло, переносимое по многочисленным полостям внутри ледового тела подледными потоками рек Геналдон и Кауридон.



**Рис. 9.** Динамика ледового тела в Кармадонской котловине и Санибанского озера в 2003 г. по снимкам IRS LISS/Pan.

а — 8 марта, б — 22 мая, в — 11 июля, г — 30 августа. Направление катастрофического движения ледово-водно-каменной массы 20 сентября 2002 г. показано черной пунктирной стрелкой.

1 — ледовое тело в Кармадонской котловине, 2 — Санибанское озеро, 3 — временные озера. Белый пунктир — границы систем ледовых трещин, активно развивающихся с мая 2003 г.



Геодезические измерения, проведенные специалистами предприятия „Севосгеоэко“, показали, что поверхность ледового тела понизилась в среднем на 20 м с экстремумами от 6 до 40 м. Это несколько больше, чем ожидалось нами ранее [Поповнин и др., 2003].

**Динамика временных озер.** К весне 2003 г. многие подпрудные озера в Кармадонской котловине исчезли. К концу лета 2003 г. из 13 новых озер, существовавших в долине р. Геналдон в октябре 2002 г., сохранились только три.

Наибольший интерес представляет динамика самого крупного из озер — Санибанского (см. рис. 9). В своем развитии оно прошло несколько этапов. Его площадь и объем росли с 20 сентября по 18 октября 2002 г. В этот период озеро не имело выраженного стока. К 18 октября из Санибанского озера наметился сток под правым бортом долины р. Геналдон. 22 октября оформился канал стока, уходящий под ледово-каменный завал, и через несколько дней уровень озера понизился на 6 м по сравнению с максимальным. Воды Санибанского озера стали уходить во внутренние полости ледового тела. По данным Северо-Осетинского ЦГМС, с 9 января 2003 г. на озере установился сезонный ледовый покров (см. рис. 9, а), продержавшийся до 18 апреля. Затем до 15 июня уровень воды плавно снижался. 16 июня 2003 г. произошел сброс части воды озера через подледный канал. В результате, прорывной паводок разрушил два новых моста в устье р. Геналдон, построенных позже катастрофы. После 18 июня 2003 г. падение уровня снова стало медленным. К июлю 2003 г. площадь Санибанского озера, по сравнению с максимальными значениями во второй половине октября 2002 г., уменьшилась почти в два раза.

Анализ аэрокосмических снимков в сочетании с материалами наземных исследований, проведенных совместно с И.В. Крыленко и И.Н. Крыленко, позволил уточнить публиковавшиеся нами ранее данные по оценке изменений озера. С 19 октября 2002 г. до 11 июля 2003 г. площадь озера сократилась на 47 %. Максимальный объем воды в озере в октябре 2002 г., по новым оценкам, был почти в четыре раза больше, чем в июле 2003 г., и составлял 4,9 млн м<sup>3</sup>. Наибольшая глубина достигала 34 м [Черноморец и др., 2003].

## ДИСКУССИЯ

### Объем перемещенного материала

Прежде всего, представляется интересным вопрос о том, какая часть ледника Колка осталась во вместилище в ледниковом цирке. Как отмечено выше, объем материала, вынесенного из цирка с лета 2001 г. до лета 2003 г., можно оценить в  $80 \pm 15$  млн м<sup>3</sup>.

В качестве исходных параметров для оценки объема льда во вместилище перед катастрофой

имеются только данные К.П. Рототаева и соавторов на 1967 г. [Рототаев и др., 1983]. По этим данным можно грубо оценить на 1967 г. объем льда во вместилище в 200 млн м<sup>3</sup>. При этом во время подвижки 1969—1970 гг. оттуда ушло 80 млн м<sup>3</sup>. Примем средний годовой прирост объема Колки с 1970 по 2001 г. в 1,0—1,3 млн м<sup>3</sup>, на основе масс-балансовых оценок [Рототаев и др., 1983]. Реальная величина прироста, вероятно, была больше из-за относительно благоприятных условий существования кавказского оледенения в этот период. Таким образом, к 2001 г. во вместилище было порядка 150 млн м<sup>3</sup> льда. За счет обвалов с г. Джимарай-хох прибавился дополнительный объем льда и камней [Поповнин и др., 2003].

Из этого следует, что во вместилище под моренным чехлом могла остаться существенная часть ледника Колка. Однако точный ответ на этот вопрос можно получить только путем геодезических исследований во вместилище и повторных фототеодолитных съемок, которые позволят более корректно оценить изменения во всем ледниковом цирке.

Объем материала, ушедшего из ледникового цирка Колка во время катастрофы, является сопоставимым с объемом ледового тела в Кармадонской котловине ( $115 \pm 10$  млн м<sup>3</sup> в сентябре 2002 г.). Превышение объема ледового тела над объемом льда, ушедшего из ледникового цирка, можно объяснить вовлечением в движение масс мертвого льда и моренных отложений, а также разуплотнением льда при движении.

### Прогноз развития процессов в зоне катастрофы

**Эволюция ледникового цирка Колка.** Как и предполагалось, в течение прошедшего года новых катастрофических процессов в цирке не произошло. Вряд ли следует ожидать их развития здесь и в ближайшем будущем (10—20 лет). Изменения сценария событий возможны только в случае резкого увеличения притока подземного тепла вследствие активизации вулканических процессов.

Ледово-каменные обвалы и снежные лавины со стены г. Джимарай-хох продолжают заполнять верхнюю часть вместилища. Следует ожидать наступания правых притоков Колки, превратившихся ныне в отдельные ледники, и постепенного заполнения ими вместилища ледника. Такое явление уже наблюдается в южной части цирка, где бывший приток ледника Колка начал наступать. Обвальноссыпная активность со временем будет ослабевать.

**Динамика зоны транзита.** Большая часть ледовых заплесков исчезла в течение первого года после катастрофы, несмотря на достаточно холодное лето. Сохранившиеся ледовые заплески, скорее всего, полностью деградируют в течение следующего лета. Остатки льда на дне долины полностью стаяли летом 2003 г. Перестройка русла на большей части долины завершилась.

Рыхлообломочные массы на склонах и в русле р. Геналдон способствуют образованию микроселей в теплое время года практически при каждом ливне. Мелкие сели в зоне транзита летом 2004 г. будут происходить раз в несколько дней по десяткам русел и лотков. По мере деградации остатков льда на склонах селевая активность будет уменьшаться.

**Накопление флювиогляциальных толщ выше ледового тела.** Новый базис эрозии (ледовое тело) находится существенно выше, чем был ранее. Пока ледовое тело остается преградой и перехватывает сток наносов р. Геналдон, в примыкающей к Кармадонской котловине части зоны транзита будет происходить интенсивная аккумуляция отложений. Скорость накопления флювиогляциальных толщ в зоне подпора в ближайшие годы можно оценить в 3–7 м/год, причем темпы накопления будут уменьшаться по мере удлинения открытого участка русла р. Геналдон вниз по долине.

**Разрушение ледового тела.** Предварительный прогноз развития событий был опубликован ранее [Поповнин и др., 2003]. Темпы деградации ледового тела в первый год после катастрофы оказались несколько выше ожидаемых из-за недооценки нами роли механической абляции. В дальнейшем по мере проработки каналов стока и увеличения мощности обломочного чехла на поверхности ледового тела темпы таяния будут понижаться. Несмотря на то, что основная масса льда растает в ближайшие 2–3 года, полная деградация ледового тела растянется, вероятно, на срок не менее 10 лет.

**Изменения Санибанского озера.** Можно ожидать, что тенденция медленного снижения уровня озера сохранится. Вероятность катастрофических паводков ниже Скалистого хребта, вызванных прорывом озера, на наш взгляд, невысока. Однако исключить возможность прорывов, например, в западном направлении, когда зона трещин во льду подойдет к озеру, нельзя. Следует продолжать мониторинг развития озера и трещин в массиве ледового тела.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наземные исследования, проведенные нами в долине р. Геналдон за год до катастрофы, через две недели после нее и в течение лета 2003 г., а также космический мониторинг на основе снимков IRS LISS/Pan позволили выявить основные тенденции изменений, составить карту состояния ледникового цирка Колка через год после катастрофы, оценить объемы перемещенного вещества. Для повышения точности оценок и прогнозов следует провести фототеодолитную съемку и геофизические исследования в цирке Колка. Было бы полезно обновить крупномасштабную топографическую карту долины р. Геналдон путем аэросъемки и создать сеть точек наблюдений для мониторинга процессов в зоне катастрофы.

Авторы выражают благодарность А.А. Алейникову за участие в полевых работах и подготовку снимков со спутников IRS; А.М. Алейниковой, П.Г. Журавлевой, Н.Ю. Красных, И.В. Крыленко, И.Н. Крыленко, М.Н. Петрушиной, В.В. Поповнину, А.В. Розовой (географический факультет МГУ и Университетский центр инженерной геодинамики и мониторинга); Л.С. Черноморцу за помощь в сборе полевых данных; Э.В. Запорожченко, К.Н. Носову (ОАО „Севкавгипроводхоз“); Ш.С. Муратову (Всероссийский центр „Антистихия“ МЧС РФ); А.П. Полквому (УПР и ООС по РСО-Алания МПР РФ) за содействие в организации полевых исследований; ИТЦ „СканЭкс“ за заказ прицельной космической съемки района; И.В. Галушкину (НПП „Инфотерра“); Г.А. Долгову, Ю.Д. Бунькову, И.М. Васькову (СОГЭП „Севостеоэко“); О.Н. Рыжанову (горный клуб „Каскад“); Северо-Осетинскому ЦГМС; Д.Е. Солодкому (команда „Форпост“) за предоставление информации; В.Н. Голубеву, Е.А. Золотареву, Ю.Г. Симонову (географический факультет МГУ) за обсуждение результатов.

Исследования выполнены при поддержке программы „Ведущие научные школы“ (проекты № НШ-2067.2003.5, НШ-1217.2003.5) и при поддержке грантов РФФИ № 03-05-64792, 03-05-64973, 03-05-06445мас.

## Литература

- Алябьев Н.И., Рототаев К.П.** Таяние поверхности ледников Колка и Майли после быстрой подвижки ледника Колка осенью—зимой 1969/1970 г. // Материалы гляциол. исслед. Вып. 20, 1972, с. 131–136.
- Гляциологический словарь** / Под ред. В.М. Котлякова. Л., ГИМИЗ, 1984, 527 с.
- Десинов Л.** Основные результаты изучения подвижки ледника Колка в Северной Осетии // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: III науч.-практич. конф. (22–23 сентября 2003 г.). Сб. материалов. М., Центр „Антистихия“, 2003, с. 30–31.
- Духовской А.И.** Исследование Казбекских ледников: Суатиси, Мна, Орцвери, Абано, Чачского и ледника Кибиша Кистинского ущелья в 1909–1913 гг. // Изв. Кавказ. отдела РГО / Под ред. А.Ф. Ляйстера. Т. XXV, № 1. Тифлис, 1917, с. 1–48.
- Запорожченко Э.В.** Сход ледника Колка 20 сентября 2002 г. и его последствия // Вестн. Кавказ. горного о-ва, № 4. Пятигорск, 2002, с. 44–48.
- Котляков В.М., Рототаева О.В.** Ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Природа, 2003, № 8, с. 15–23.
- Котляков В.М., Рототаева О.В., Десинов Л.В., Осокин Н.И.** Причины и следствия катастрофического выброса пульсирующего ледника Колка в Центральном Кавказе // Докл. РАН, 2003, т. 389, № 5, с. 688–692.
- Кренке А.Н., Ходаков В.Г.** О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // Материалы гляциол. исслед., 1966, вып. 12, с. 153–164.
- Осипова Г.Б., Цветков Д.Г.** Что дает мониторинг пульсирующих ледников? // Природа, 2003, № 4, с. 3–13.
- Осокин Н.И.** Ледниковая катастрофа в Осетии // География, 2002, № 43 (674), 16–22 ноября, с. 3–7.

**Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Лурье П.М.** Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 г. // Метеорология и гидрология, 2002, № 12, с. 94–98.

**Полквой А.П.** Каковы же причины схода ледяной лавины // Северная Осетия, № 178 (23735), 24.09.2002.

**Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** Гляциальная катастрофа 2002 г. в Северной Осетии // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 3–17.

**Роготаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н.** Исследование пульсирующего ледника Колка. М., Наука, 1983, 168 с.

**Статковский Б.И.** О причинах происхождения Казбекского завала и о мерах для его предупреждения. Тифлис, 1877, 42 с.

**Тимофеев Д.А., Маккавеев Н.А.** Терминология гляциальной геоморфологии. М., Наука, 1986, 256 с.

**Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** Снимки IRS для мониторинга последствий Геналдонской ледниковой катастрофы // Информ. бюл. ГИС-Ассоциации, 2003, № 4, с. 55–57.

**Черноморец С.С., Крыленко И.В., Крыленко И.Н.** Эпи-катастрофический лимногенез: Санибанское озеро после Геналдонской катастрофы 2002 г. // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: III науч.-практич. конф. (22–23 сентября 2003 г.). Сб. материалов. М., Центр „Антистихия“, 2003, с. 95–96.

**Kääb A., Wessels R., Haeblerli W. et al.** Rapid ASTER Imaging Facilitates Timely Assessment of Glacier Hazards and Disasters // EOS, Transactions, American Geophysical Union. Vol. 84, No 13, 1 April 2003, p. 117, 121.

*Поступила в редакцию  
20 сентября 2003 г.*