

## ИЗМЕНЕНИЯ В ЗОНЕ ГЕНАЛДОНСКОЙ ГЛЯЦИАЛЬНОЙ КАТАСТРОФЫ В ПЕРИОД 2002–2010 гг.

Д.А. Петраков<sup>1</sup>, В.Н. Дробышев<sup>2</sup>, А.А. Алейников<sup>1,3</sup>, К.А. Аристов<sup>1</sup>,  
О.В. Тутубалина<sup>1</sup>, С.С. Черноморец<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; [dpetrakov@gmail.com](mailto:dpetrakov@gmail.com)

<sup>2</sup>Владикавказский научный центр РАН и Правительства Республики Северная Осетия-Алания,  
362008, Владикавказ, пр. Коста, 93, Россия

<sup>3</sup>ИТЦ “СканЭкс”, 119021, Москва, ул. Россолимо, 5/22, стр. 1, Россия

Проведен анализ изменений, произошедших в зоне гляциальной катастрофы 20 сентября 2002 г. в Республике Северная Осетия-Алания (Россия). По результатам ежегодных полевых наблюдений 2002–2010 гг., топографических съемок 2002, 2003, 2004, 2009 гг. и анализа космических снимков определены темпы восстановления ледников в цирке Колка и темпы разрушения ледяного завала в Кармадонской котловине. Установлено, что в 2004–2009 гг. на фоне неблагоприятных для кавказского оледенения погодных условий в цирке ледника Колка накопилось 16 млн м<sup>3</sup> льда. Бывшие притоки Колки стали самостоятельными ледниками, один из них продвинулся по днищу цирка на 500 м. Это единственный на Кавказе случай значительного наступания ледников в XXI в. В днище цирка, освободившемся от ледника после катастрофы 2002 г., площадь ледников в 2010 г. достигла 0,6 км<sup>2</sup>. Объем ледяного завала в Кармадонской котловине в 2002–2009 гг. сократился на три четверти, площадь – более чем наполовину, а поверхность местами понизилась на 90 м. При прогрессирующем замедлении темпов таяния лед в котловине может сохраниться до 2020 г. Основную опасность для землепользования в долине р. Геналдон представляет возможность формирования крупного селя дождевого или гляциально-дождевого генезиса при выпадении осадков редкой обеспеченности. В ближайшие 10–15 лет повторение событий, схожих с гляциальной катастрофой 2002 г., маловероятно.

*Ледник Колка, гляциальная катастрофа, Северная Осетия-Алания, наступание ледника, таяние ледового тела, прогноз*

### CHANGES IN THE AREA OF GENALDON GLACIAL DISASTER IN 2002–2010

D.A. Petrakov<sup>1</sup>, V.N. Drobyshev<sup>2</sup>, A.A. Aleinikov<sup>1,3</sup>, K.A. Aristov<sup>1</sup>,  
O.V. Tutubalina<sup>1</sup>, S.S. Chernomorets<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,  
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; [dpetrakov@gmail.com](mailto:dpetrakov@gmail.com)

<sup>2</sup>Vladikavkaz Scientific Center of the RAS and the Government of the Republic North Ossetia-Alania,  
362008, Vladikavkaz, Kosta Av., 93, Russia

<sup>3</sup>R&D Center ScanEx, 119021, Moscow, Rossolimo Str., 5/22, b. 1, Russia

We have analyzed changes in the area of Genaldon glacial disaster on 20 September 2002 in the Republic of North Ossetia-Alania (Russia). Using results of annual fieldwork (2002–2010), topographic surveys in 2002, 2003, 2004 and 2009, and interpretation of satellite imagery, we have determined the rate of glacier regeneration in the Kolka cirque and the rate of downwasting for the ice accumulated in the Karmadon depression in 2002. We register accumulation of 16 M m<sup>3</sup> in the Kolka cirque in 2004–2009 despite unfavorable conditions for Caucasus glaciers. Former Kolka Glacier tributaries have become separate glaciers, one of them has advanced by 500 m. It is a unique phenomena for the Caucasus in the 21st century. In the bottom of Kolka cirque from where Kolka Glacier evacuated during the 2002 disaster, the glacier-covered area has grown to 0.6 km<sup>2</sup> by 2010. The volume of ice blockage in the Karmadon depression decreased by 75 % in 2002–2009, the ice-covered area decreased by over 50 %, and surface lowering reached 90 m in some sites. Taking into account the progressive deceleration of ice thawing, we suppose that ice in the depression may exist until 2020. The main current hazard for land use in the Genaldon River valley is the possible initiation of a large-scale rain- or glacier-rain debris flow in case of heavy rainfall. In the next 10–15 years we do not expect recurrence of an event similar to the glacial disaster of 20 September 2002.

*Kolka Glacier, glacial disaster, North Ossetia-Alania, glacier advance, ice blockage degradation, forecast*

### ВВЕДЕНИЕ

Вечером 20 сентября 2002 г. в бассейне р. Геналдон в Северной Осетии произошла ледниковая катастрофа планетарного масштаба. Более

100 млн м<sup>3</sup> льда, воды и камней были сброшены из цирка ледника Колка в Кармадонскую котловину и преодолели почти 20 км за 5,5 минут. Теснина

Скалистого хребта остановила ледяную массу, но порожденный ею дистальный селевой поток прошел еще 17 км [Поповнин и др., 2003] и не дошел всего 2 км до селения Гизель с населением более 7000 чел. Это событие стало полной неожиданностью для населения и органов власти. По последним оценкам, погибли 135 чел., а экономический ущерб составил 1385 млн р. [Кортнев и др., 2009]. За прошедшие годы были опубликованы десятки работ, посвященных исследованию причин катастрофы, механизмов ее развития, особенностей движения ледово-водно-каменной массы вниз по долине [Ланов и др., 2002; Поповнин и др., 2003; Десинев, 2004; Котляков и др., 2004; Муравьев, 2005; Тутубалина и др., 2005; Познанин, Геворкян, 2008; Познанин, 2009; Kotlyakov et al., 2004; Huggel et al., 2005; Kääh et al., 2005; Drobyshev, 2006; Chernomoretz et al., 2007; Petrakov et al., 2008; Evans et al., 2009; Huggel, 2009].

Одним из наиболее острых на сегодня остается вопрос о том, повторится ли такое событие в будущем, и если да, то когда и какого масштаба оно будет. По нашему мнению, катастрофический сценарий возможен только при восстановлении объема льда в леднике Колка до значений, близких к предкатастрофическим. Такую точку зрения разделяют В.М. Котляков с соавт. [2004], В.Л. Познанин [2009] и др. Для того чтобы новое событие в очередной раз не стало катастрофой, необходимо проводить регулярный мониторинг ледникового цирка Колка. Наблюдения в этом месте выполнялись рядом исследователей [Васьков, Валиев, 2010; Чернов, Ротомалева, 2010], но большинство работ носило, по сути, полуколичественный характер. В.М. Котляков и соавторы справедливо отмечали, что «мониторинг не может отвечать минимальным современным требованиям» без «крупномасштабной топографической карты уникального объекта – пустого ложа, где начинается формирование нового ледника, грозящего будущими катастрофами» [Котляков и др., 2004, с. 71]. Первая такая карта была составлена В.Н. Дробышевым по результатам тахеометрической съемки августа 2004 г. в рамках работ Межведомственной экспедиции [Отчет..., 2003; Drobyshev, 2006]. Эта карта послужила основой топогеодезического мониторинга ледникового цирка Колка.

Вторым по важности объектом мониторинга является ледовое тело в Кармадонской котловине. После регулярного топогеодезического [Отчет..., 2003; Drobyshev, 2006] и космического [Петраков и др., 2004, 2006] мониторинга 2002–2004 гг. здесь проводились измерения высоты поверхности при помощи GPS в 2006 г. [Мавлюдов, 2011]. В этой же работе даны ссылки на измерения, проводившиеся ежегодно 1 января с 2003 по 2007 г., но о методике работ ничего не сказано.

Целью статьи стала оценка современного состояния верхней и средней части зоны Геналдонской катастрофы (выше Скалистого хребта), анализ изменений, происходящих здесь после события, и уточнение сделанных ранее прогнозов. Для этого в августе 2009 г. авторы провели повторную тахеометрическую съемку цирка ледника Колка, повторную съемку ледового тела в Кармадонской котловине по трем профилям и обобщили результаты ежегодных наблюдений, проводимых в верховьях р. Геналдон после 2002 г.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

**Наземный мониторинг.** Авторы статьи выполняют регулярные полевые обследования верховьев р. Геналдон начиная с 2001 г. За это время нами было организовано 14 экспедиций. При всех обследованиях традиционно проводились гляциогеоморфологические описания ключевых участков, географическая привязка опорных точек с помощью приемников GPS, повторное фотографирование с закрепленных точек, дешифрирование космических снимков на местности. Топогеодезические работы осуществлялись на ледовом теле в 2002–2004 и 2009 гг., в цирке ледника Колка – в 2004 и 2009 гг.

**Определение объема льда, накопившегося в ложе ледника Колка в 2004–2009 гг.** Первая тахеометрическая съемка ледникового цирка Колка после катастрофы 2002 г. проводилась В.Н. Дробышевым, В.В. Макликовым и Ш.С. Муратовым в августе 2004 г. Для съемки масштаба 1:5000 использовались теодолит 4Т15П и безотражательный лазерный дальномер ЛП-1. Семь съемочных точек располагались на орографически левой береговой морене ледника Колка. Координаты съемочных точек определялись методом триангуляции с привязкой к трем пунктам государственной геодезической сети: Чижит-хох, Майли-раг и Реком-раг. Передача высот проводилась посредством тригонометрического нивелирования в двух направлениях. При расчетах перепадов высот и горизонтального проложения линий учитывались кривизна Земли и рефракция. В соответствии с масштабом съемки в 2004 г. в цирке ледника Колка были измерены координаты более 1000 съемочных точек.

Вторая тахеометрическая съемка ледникового цирка Колка проводилась с 8 по 14 августа 2009 г. К.А. Аристовым, В.Н. Дробышевым и Д.А. Петраковым. Для съемки масштаба 1:5000 были использованы те же съемочные точки и то же оборудование, что и в 2004 г. Кроме того, для уточнения координат съемочных точек применялся двухчастотный GPS/ГЛОНАСС-приемник JAVAD. Количество измеренных точек было сокращено до 394, поскольку не требовалось повторять измере-

ния для стабильных скальных поверхностей. Обе карты составлены в единой системе координат.

По съемкам 2004 и 2009 гг. В.Н. Дробышевым были составлены топографические карты масштаба 1:10 000. Погрешность определения координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  при съемке не превышала 5 м. По этим картам в программе Surfer на основе тригонометрической интерполяции были построены цифровые модели рельефа (ЦМР) местности и проведено их наложение. Погрешность интерполяции  $x$ ,  $y$ ,  $z$  также не превышает 5 м.

**Определение изменений ледового тела в Кармадонской котловине в 2002–2009 гг.** Для выявления изменений объема ледового тела в Кармадонской котловине использовались данные шести тахеометрических съемок, проведенных В.Н. Дробышевым и В.В. Макликовым 28.09.2002 г., В.Н. Дробышевым 16.05.2003, 05.07.2003, 04.11.2003, 08.08.2004 г., К.А. Аристовым и В.Н. Дробышевым 16.08.2009 г. Эти работы выполнены на том же оборудовании, что и съемка цирка ледника Колка. В 2002 г. съемкой была покрыта вся площадь ледового тела, составлена цифровая модель рельефа его поверхности и определен объем [Drobyshev, 2006]. Впоследствии съемки проводились по трем поперечным профилям (рис. 1). Полученные данные экстраполировались на всю площадь ледового тела.

**Аэрокосмический мониторинг.** Для дистанционного мониторинга зоны катастрофы нами использовались космические снимки Quick Bird от 25.09.2002 г. (версия снимка из Google Earth) с пространственным разрешением 0,7 м, IRS 1D от 30.09.2004 и 24.08.2005 г., IRS 1C от 16.08.2006 г. с разрешением 5,8 м, SPOT 4 от 02.09.2007 г. и SPOT 2 от 17.08.2008 г. с разрешением 10 м, SPOT 4 от 25.08.2009 г. с разрешением 10 м и Иконос от 29.08.2010 г. с разрешением 0,8 м. Все снимки прошли ортокоррекцию с использованием ЦМР, составленных по топографическим картам 2004 и 2009 гг., и были взаимно привязаны в программах ESRI ArcGIS 9.3 и Scanex Image Processor. На базе указанных космических снимков проведено дешифрирование контуров ледников в цирке Колка и определение их колебаний в 2002–2010 гг. Погрешность определения контуров зависит от разрешения снимков и изменяется от 2,5 до 20 м в разные годы.

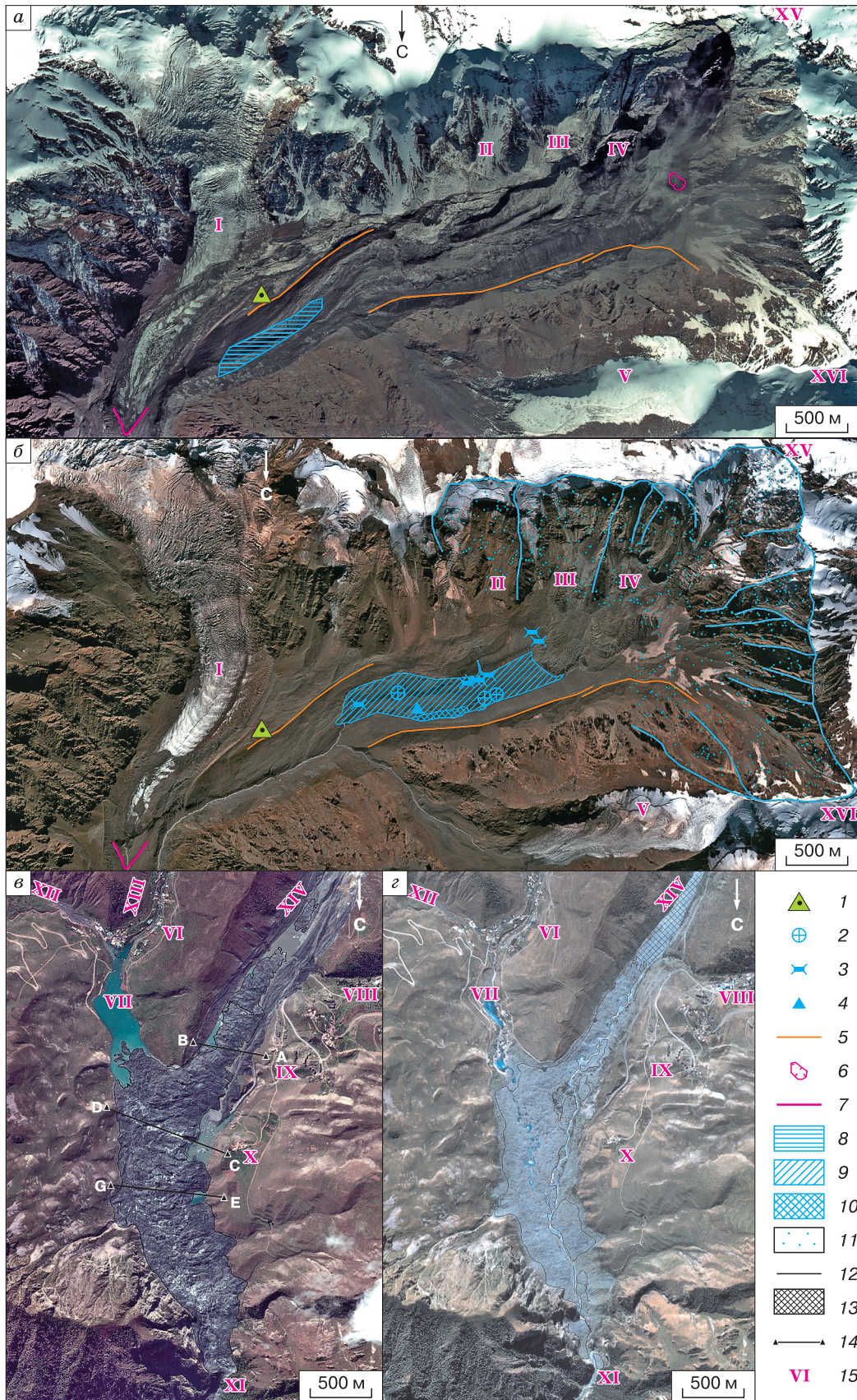
Космический снимок Иконос от 29 августа 2010 г. использовался для оценки площади ледового тела в Кармадонской котловине на дату съемки. Следует отметить, что дешифрирование границ ледового тела в последние годы представляет собой серьезную проблему из-за схожести рисунка поверхности на участках, сложенных льдом, перекрытым мореной, и на участках, уже освободившихся ото льда. Тем не менее холмисто-западин-

ный рельеф на участках со льдом прослеживается более четко. Для анализа динамики процессов использовались также перспективные аэроснимки, выполненные в 2002–2009 гг. с самолета и вертолета в рамках обследований, организованных МЧС. Авторы снимков А.П. Полквой (Севосетиннедра), И.В. Галушкин (ООО “Инфотерра”), М.Ю. Никитин (МГУ), И.М. Васьков СКГМИ (ГТУ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ – ИЗМЕНЕНИЯ В ЗОНЕ КАТАСТРОФЫ

**Цирк ледника Колка.** Наибольший интерес представляют изменения в цирке ледника Колка, откуда начался катастрофический процесс в 2002 г. Как и предполагалось в [Петраков и др., 2004, 2006], доминирующим процессом здесь стало накопление льда в ложе Колки и восстановление ледника. С момента катастрофы до осени 2003 г. в тыловой части цирка Колки заметного накопления льда не происходило. В конце сентября 2003 г. под склоном г. Джимарай-хох сохранялась депрессия в мертвых льдах глубиной около 50 м. В 2004 г. ледяные, снежные и каменные лавины со склонов гор Джимарай-хох и Шау-хох заполнили депрессию, в августе на ее месте находился лавинный снежник. В 2006 г. фирново-ледяной массив в тыловой части ложа Колки приобрел слабовыпуклую форму, а в 2007 г. на его поверхности появились трещины, свидетельствующие о начале движения льда. Основным источником питания этого возрожденного ледника – снежные и ледяные лавины с северо-восточного склона г. Джимарай-хох (см. фотографию на обложке). Ортогональная площадь лавиносборов превышает 1 км<sup>2</sup>. Роль лавин с южного склона г. Шау-хох существенно меньше, поэтому поверхность нового ледника наклонена с юга на север. Другим источником питания стало продвижение вниз бывшего “источка” Колки – фрагмента ледника, расположенного на северо-восточном склоне г. Джимарай-хох. В 2009 г. бывший “исток” и возрожденный ледник в верхней части вместилища представляли собой единое целое.

Одновременно происходила активизация бывших правых притоков Колки, ставших после катастрофы самостоятельными ледниками, круто обрывающимися во вместилище Колки. В конце лета 2003 г. поверхность двух таких ледников № 7 и 9 растрескалась. На других ледниках видимых изменений не наблюдалось. К августу 2004 г. фронт ледника № 7 продвинулся вперед примерно на 100 м [Петраков и др., 2006], но еще оставался на склоне. Продвижение фронта ледника № 9 было существенно меньше (рис. 2, 3). В августе 2005 г. фронт ледника № 7 уже спустился на днище цирка. К августу 2006 г. сильно растрескавшийся язык ледника № 7 выдвинулся на ложе ледника



**Рис. 1. Изменение ледового тела в Кармадонской котловине в 2002 и 2010 гг.**

*a* – верхняя часть зоны Геналдонской катастрофы, 2002 г.; *б* – верхняя часть зоны Геналдонской катастрофы, 2010 г.; *в* – Кармадонская котловина, 2002 г.; *г* – Кармадонская котловина, 2010 г. На заднем плане *a* и *в* – фрагменты космического снимка Quick Bird от 25.09.2002 г.; *б* и *г* – фрагменты космического снимка Ikonos от 29.08.2010 г.; 1 – поляна Шелестенко; 2 – участки распространения термокарста; 3 – участки развития термоэрозии; 4 – “муравьиные кучи”; 5 – гребни береговых морен ледника Колка; 6 – депрессия в тыловой части цирка, просуществовавшая до 2004 г.; 7 – положение фронта ледника Майли в 2002 г.; 8 – область распространения каменных мостовых в цирке ледника Колка; 9 – мертвый лед; 10 – отложения микроселей; 11 – лавиносорбы на склоне г. Джимарай-хох и на стенах Джимарай-Майли и Джимарай-Шау-хох; 12 – контуры ледового тела в Кармадонской котловине; 13 – участок аккумуляции выше ледового тела; 14 – положение профилей (А–Г) через ледовое тело; 15 – объекты на местности: I – ледник Майли, II – ледник № 5, III – ледник № 7, IV – ледник № 9, V – ледник Шау, VI – пос. Горная Саниба, VII – Санибанское озеро, VIII – пос. Кармадон, IX – пос. Кани, X – пос. Нижнее Кани, XI – Кармадонские ворота, XII – р. Фардон, XIII – р. Кауридон, XIV – р. Геналдон, XV – г. Джимарай-хох (4780 м), XVI – г. Шау-хох (4636 м).

Колка (см. рис. 2), его фронт в 2004–2006 гг. продвинулся на 300 м (см. рис. 3). К осени 2008 г. ледник № 7 практически пересек ложе Колки и подошел к подножию левой береговой морены, преодолев еще 100 м (см. рис. 3). После этого положение его фронта стабилизировалось. В 2009 г. крутой лоб ледника имел выпуклую форму при относительной высоте 50 м (см. рис. 2). С языка ледника осыпались камни, формируя стадиальную морену. По сравнению с 2006 г. поверхность языка стала более ровной и менее трещиноватой. В целом после катастрофы фронт ледника № 7 наступил на 500 м (см. рис. 3). Это уникальный случай для кавказского оледенения в начале XXI в., других случаев значительного наступления фронта ледников в этот период отмечено не было.

Ледник № 9 в 2006 г. вперед практически не продвигался, но уже в 2007 г. он соединился с массивом мертвого льда в ложе Колки (см. рис. 2). Осенью 2008 г. язык ледника вздулся, к августу 2009 г. продвинулся вперед. К лету 2009 г. бывший “исток” Колки слился с ледниками № 9 и 7, язык последнего пока сохраняет динамическую независимость и служит дамбой, препятствующей растеканию льда из верхней части ложа. В 2010 и 2011 гг. наступание ледников продолжилось (см. рис. 2, 3). Судя по топографической карте, в 2009 г. площадь ледников в ложе Колки достигла 0,6 км<sup>2</sup>, что составляет около трети площади ледника Колка в днище цирка перед катастрофой 2002 г.

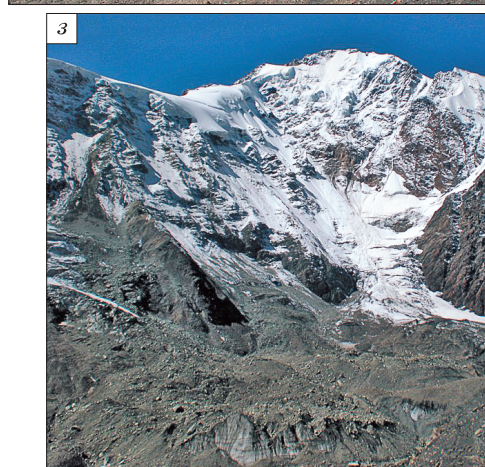
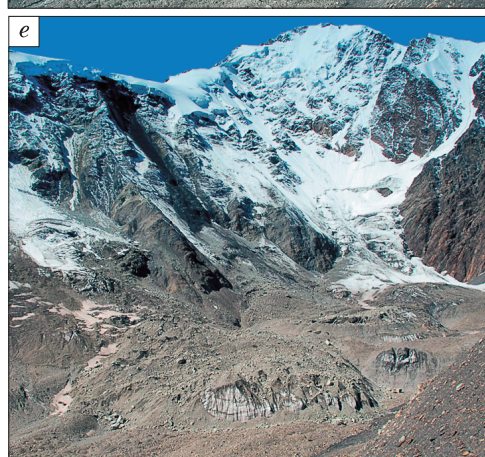
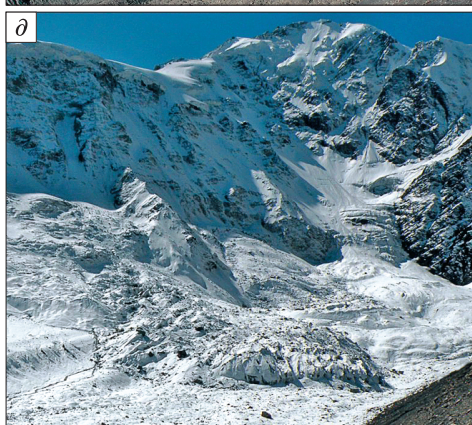
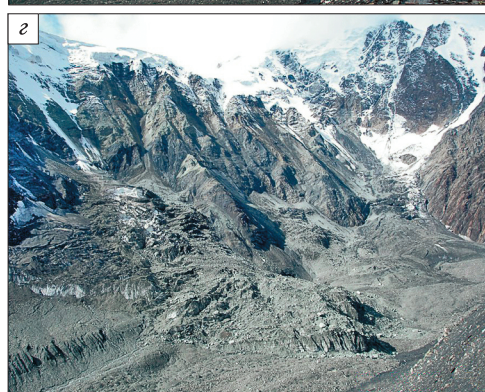
По нашим расчетам, проведенным путем наложения топографических карт, в 2004–2009 гг. в цирке ледника Колка накопилось около 16 млн м<sup>3</sup> льда, фирна, снега и обломочного материала. Большая часть этого объема сконцентрировалась в верхней и средней частях днища цирка. Средняя толщина накопившегося слоя льда здесь составила 25 м, максимальная толщина незначительно превышает 50 м (рис. 4). Небольшой участок повышения поверхности на 15 м расположен вблизи фронта ледника № 5. Это свидетельствует о вероятной активизации фронта ледника в недалеком будущем. Участки понижения поверхности имеют незначительную площадь. Один из них расположен

в верхней части языка ледника № 7, другой – под склоном г. Джимарай-хох. Значения понижения поверхности не превышают 20 м, они не отображаются в масштабе карты.

В нижней части днища цирка Колки принципиальных изменений не произошло. Поверхность ложа стала более ровной, но, как и в 2003–2004 гг., имеет мелкобугристый характер. Процессы термокарста и термоэрозии, отмечавшиеся на ложе раньше, продолжают до настоящего времени. Особенно велика их интенсивность у подножия орографически правого борта долины и вблизи левой береговой морены в связи с притоком воды со склонов. Под правым бортом нижней части цирка ручьи, стекающие с ледника № 7 и соседних небольших ледников, формируют современный первый исток р. Колка. Сперва река течет по поверхности мертвых льдов, а затем попадает в широкую каверну. От каверны до второго истока река течет в подледном тоннеле длиной 400–500 м. Центральная часть цирка (см. рис. 1) представляет собой рельеф небольших холмов и западин – “муравьиных куч”, сформированный в результате таяния остатков льда, перемещенных в ходе катастрофы. Высота холмов варьирует от 2 до 7 м. Под левым бортом формируется пологонаклонный шлейф из отложений микроселей, сходящих с поверхности левобережной морены.

Активность склоновых процессов на северном склоне г. Джимарай-хох понизилась по сравнению с 2003 г., но до сих пор остается достаточно высокой. В ходе ежегодных обследований 2003–2009 гг., проводившихся в теплый период года (июнь–сентябрь), небольшие обвалы, камнепады и высокоплотные селевые потоки сходили со стены по несколько раз в день. Висячие ледники, расположенные на участке хребта между вершинами Джимарай-хох и Майли-хох, были в этот период достаточно стабильными. За годы после катастрофы значительных изменений на этих ледниках не отмечено.

На выходе из цирка ледника Колка, на так называемой поляне Шелестенко, расположенной на моренах между ледниками Колка и Майли, уже



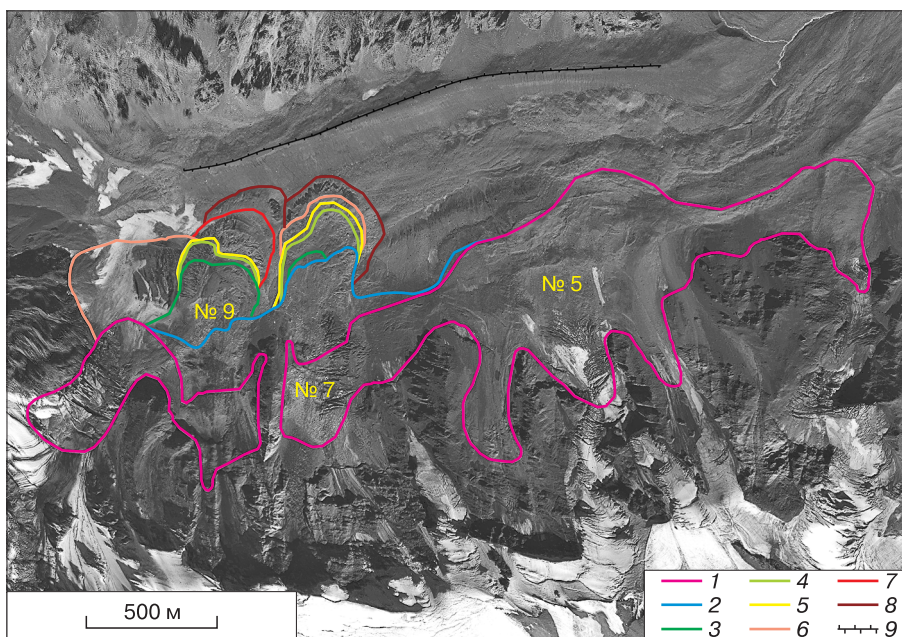
**Рис. 2. Восстановление ледника Колка в 2004–2011 гг. Серия фотографий с левой береговой морены ледника Колка в разные годы с точки № 3 повторной фотосъемки.**

*a* – август 2004 г., фото Д.А. Петракова; *б* – август 2005 г., фото О.В. Тутубалиной; *в* – август 2006 г., фото Д.А. Петракова; *г* – август 2007 г., фото С.С. Черноморца; *д* – сентябрь 2008 г., фото С.С. Черноморца; *е* – август 2009 г., фото Д.А. Петракова; *ж* – сентябрь 2010 г., фото В.Н. Дробышева; *з* – сентябрь 2011 г., фото В.Н. Дробышева.

к 2006 г. произошло полное стаивание массивов мертвого льда, отложенных там сразу после катастрофы. Плоскостной смыв, наблюдавшийся там во время ливней в 2003–2004 гг., прекратился. Пионерная растительность (камнеломки и незабудки), появившаяся в 2004 г., уступила место разнотравно-злаковым ассоциациям с проективным покрытием, приближающимся к 100 %. На внутренней стороне морены ледника Колка, в зоне “каменных мостовых” (см. рис. 1), проективное покрытие растительности существенно ниже, а ее видовой состав менее разнообразен.

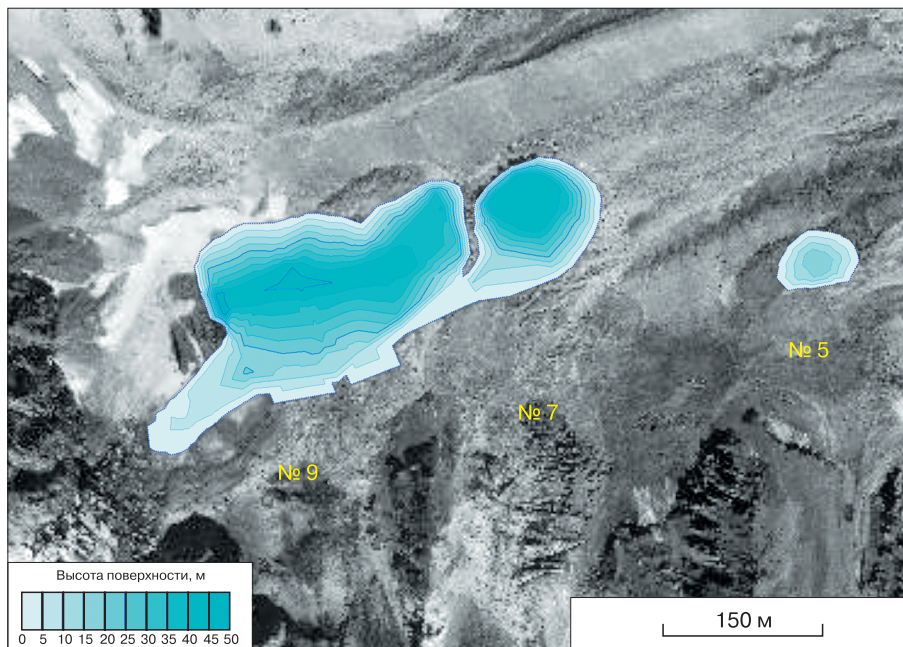
**Участок от ледника Майли до входа в Кармадонскую котловину.** На протяжении всего участка движение ледово-водно-каменного потока имело транзитный характер. Зона транзита представляет собой прямолинейный участок долины с осыпными бортами высотой 50–130 м, на которых имеется значительное количество селевых и лавинных кулуаров. Левый борт осложнен серией

оползней. Сразу после катастрофы 2002 г. из-за подрезки нижней части склонов резко активизировались обвально-оползневые процессы. Впоследствии активность крупных оползней начала снижаться. Массивы мертвого льда, заброшенные на склоны во время катастрофы (заплески), быстро разрушались летом 2003 г. Таяние льда приводило к широкому развитию осыпных процессов, активизации небольших оползней и микроселей. Интенсивность осыпания на склонах, где сохранились ледовые заплески, оставалась высокой, однако объем заплесков резко уменьшился к сентябрю 2003 г. Остатки льда в днище долины в начале лета 2003 г. еще занимали значительную площадь, но быстро деградировали. В июне р. Геналдон в двух местах была перекрыта льдом и текла в ледовых тоннелях длиной 100–150 м, однако к августу оба моста обрушились и растаяли. Летом 2004 г. лед в днище долины р. Геналдон на этом участке уже полностью отсутствовал. Интенсивность таяния



**Рис. 3. Изменения положения фронтов ледников в цирке Колки в 2002–2010 гг. по космическим снимкам Quick Bird от 25.09.2002 г. (версия снимка из Google Earth), IRS 1D от 30.09.2004 и 24.08.2005 г., IRS 1C от 16.08.2006 г., SPOT 4 от 02.09.2007 г., SPOT 2 от 17.08.2008 г., SPOT 4 от 25.08.2009 г., Ikonos от 29.08.2010 г.**

Положение ледников: 1 – 25.09.2002 г.; 2 – 30.09.2004 г.; 3 – 24.08.2005 г.; 4 – 16.08.2006 г.; 5 – 02.09.2007 г.; 6 – 17.08.2008 г.; 7 – 25.08.2009 г.; 8 – 29.08.2010 г.; 9 – гребень левой береговой морены ледника Колка; № 5, № 7, № 9 – соответствующие ледники; фон – снимок Ikonos от 29.08.2010 г.



**Рис. 4.** Изменение высоты поверхности ледников в цирке Колки в 2004–2009 гг. по материалам топографических съемок в августе 2004 и августе 2009 гг.

№ 5, № 7, № 9 – соответствующие ледники.

ледяных заплесков на склонах летом 2004 г. снизилась из-за перекрытия их обломочным материалом. Активизация таяния наблюдалась после выпадения ливневых осадков. К концу 2005 г. ледяные заплески на склонах полностью растаяли. После исчезновения льда склоны стали стабилизироваться, скорость осыпных и оползневых процессов снизилась во много раз. Зарастание дна долины и склонов, ободранных ледово-водно-ка-

менным потоком, началось уже в 2004 г. К 2009 г. высота травостоя на бывших заплесках превышала 1 м (рис. 5). Восстановление древесной растительности, уничтоженной во время катастрофы, на орографически правом склоне долины еще не началось. Таким образом, зона транзита в основном вернулась к предкатастрофическому состоянию. Следы движения потока все менее заметны на бортах долины.



**Рис. 5.** Средняя часть зоны транзита ледово-водно-каменного потока (вид вниз по долине).

*a* – октябрь 2002 г., фото С.С. Черноморца; *б* – август 2009 г., фото С.С. Черноморца.



При этом массивы рыхлообломочного материала, перемещенные в ходе катастрофы и оставшиеся на днище долины, весьма велики. В истории долины р. Геналдон был случай, когда ливневые осадки в августе 1967 г. привели к формированию селя объемом около 3 млн м<sup>3</sup> [Рототаев, 1983]. Отложения ледово-водно-каменного потока 2002 г. также представляют собой потенциальный источник материала для селей в случае прохождения экстремальных ливней.

Следует отметить, что фронт ледника Майли отступил в 2002–2010 гг. на 150 м (см. рис. 1). Отложения ледово-водно-каменного потока, отчетливо видимые на языке ледника Майли, за тот же период сместились вниз на 300 м у краев языка и на 400 м в осевой зоне языка. Скорость движения льда на языке Майли в начале XXI в. составляет 40–50 м/год, что несколько ниже, чем в 1970-е гг., когда она достигала 55 м/год [Рототаев, 1983].

Перед ледовым телом в Кармадонской котловине, в зоне подпора, происходила аккумуляция флювиогляциальных отложений (см. рис. 1). По оценке В.Н. Дробышева, подъем отметок русла выше по течению от ледового тела с конца сентября 2002 г. до августа 2004 г. превысил 10 м. Дальнейших измерений скорости этого процесса не проводилось.

**Кармадонская котловина.** Как и прогнозировалось ранее, темпы таяния ледового тела плавно понижались. В первый год после катастрофы (с 28.09.2002 по 04.11.2003 г.) объем ледового тела сократился на 48 млн м<sup>3</sup>, или чуть менее половины от первоначального объема (рис. 6). На поверхности отмечались обширные зоны просадок и трещин. В 2003–2004 гг. темпы сокращения объема снизились более чем в 3 раза. Поверхность ледового тела по-прежнему оставалась трещиноватой и неровной. На отдельных участках значения

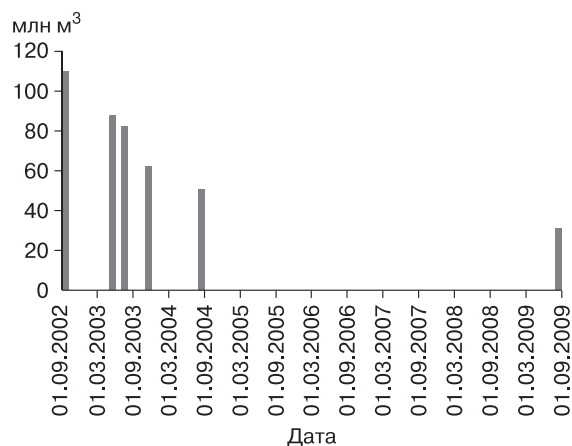


Рис. 6. Изменение объема ледового тела в Кармадонской котловине в 2002–2009 гг. по данным повторных тахеометрических измерений высоты поверхности ледового тела.

понижения поверхности изменялись в 2 раза и более на расстоянии до 200 м. Впоследствии произошло выравнивание поверхности. В 2004–2009 гг. ледовое тело потеряло всего 17 млн м<sup>3</sup>, т. е. примерно треть от объема 2004 г. (см. рис. 6).

Максимальное понижение поверхности в 2002–2009 гг. достигало 90 м и отмечалось в средней части завала, минимальное было приурочено к верхней части завала и составляло 30 м. Площадь ледового тела к августу 2010 г. уменьшилась до 1 км<sup>2</sup>, или на 50 %. На освободившихся ото льда участках, а местами и на перекрытом мореной льду наблюдается произрастание травянистой, а кое-где и кустарничковой растительности (рис. 7). На всем протяжении Кармадонской котловины р. Геналдон течет по поверхности, за исключением од-



Рис. 7. Поверхность ледового тела в Кармадонской котловине (вид вверх по долине от пос. Нижнее Кани).

а – октябрь 2002 г., фото С.С. Черноморца; б – июль 2011 г., фото С.С. Черноморца.

ного участка. Перед Кармадонскими воротами р. Геналдон течет по старому автодорожному тоннелю, выходя из него ниже поверхности в виде своеобразного грифона. Далее от Кармадонских ворот русло Геналдона имеет примерно те же плановые очертания, что и до катастрофы. Река Кауридон, дренирующая Санибанское подпрудное озеро и впадающая в Геналдон, в настоящее время течет по поверхности. При этом ее русло состоит из нескольких участков, разделенных озерными ваннами. Площадь Санибанского озера, образовавшегося в первые дни после катастрофы из-за подпруживания ледовым телом р. Кауридон, сократилась с почти 300 до 17,8 тыс. м<sup>2</sup>, т. е. более чем в 10 раз. Основная доля сокращения площади и объема озера пришлась на первые годы после катастрофы [Петраков и др., 2006]. Подтопленными остаются пять домов. Ниже Санибанского озера сохраняется небольшое озерко площадью около 7 тыс. м<sup>2</sup>.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### О темпах восстановления ледника Колка.

Авторы установили, что в 2004–2009 гг. в цирке ледника Колка накопилось 16 млн м<sup>3</sup> материала, преимущественно льда. Из этого вытекает, что баланс массы ледников в цирке Колки в 2004–2009 гг. составлял +3,2 млн м<sup>3</sup> льда или +2,8 млн т в год. В 1902–1969 гг. баланс массы ледника Колка составлял +(1,0–1,3) млн т или +(400–500) мм/год [Рототаев, 1983], а в 1970–2002 гг. оценивался в +2,5 млн т или +1000 мм/год [Петраков и др., 2006]. Столь высокие темпы накопления льда в цирке Колки резко контрастируют с неблагоприятными для кавказского оледенения условиями в 2004–2009 гг. Баланс массы опорного для масс-балансовых наблюдений на Кавказе ледника Джанкуат в этот период составлял –500 мм/год [WGMs, 2007, 2009; неопубликованные данные В.В. Поповнина]. Такое же значение баланса было на Джанкуате и в 1902–1969 гг. [Дюргеров, Поповнин, 1980]. Темпы накопления льда в цирке Колки различаются в 1902–1969 гг. и 2004–2009 гг. в 2,5–3 раза. Чем это может быть вызвано?

Основной вклад в аккумуляцию на Джанкуате вносят твердые осадки, а на Колке – снежные и ледяные лавины. В 2004–2009 гг. высокая лавинная активность отмечалась на Кавказе лишь зимой 2004/05 г., в остальные годы она была средней и низкой. Тем не менее можно предположить, что вклад лавинного питания на Колке увеличился по сравнению с 1902–1969 гг. За счет чего это происходит? Тыловая часть цирка получает лавинное питание из лавиносборов общей площадью около 2 км<sup>2</sup> со средней высотой 3900–4000 м. Несмотря на относительно небольшое количество осадков холодного периода (725 мм, по данным измерений на метеостанции “Казбеги высокогорная”, распо-

ложенной на высоте 3600 м в нескольких километрах от Колки, в 1930–1980-е гг.), реальное количество снега, аккумулирующегося в лавиносборах зимой, может быть намного больше. Значительную роль в снегонакоплении в лавиносборах, питающих Колку, играет метелевый перенос из области питания ледника Суатиси [Рототаев, 1983]. Следует отметить, что метелевый перенос на перевалах Кавказа составляет 1500–2000 м<sup>3</sup> на 1 м, на метеостанции Казбеги – более 7000 м<sup>3</sup> на 1 м [Панов, 1993]. С учетом того, что длина гребня хребта над тыловой частью Колки превышает 3 км, метелевый перенос должен давать не менее 4–6 млн м<sup>3</sup> снега в среднеснежную зиму. В последние годы стены цирка на высоте порядка 4000 м освобождаются от снега уже к июлю–августу. Можно предположить, что доля снега, сбрасываемого на дно цирка, выросла после событий 2002 г. Это могло стать следствием изменения термического режима на склонах г. Джимарай-хох [Huggel et al., 2005; Huggel, 2009]. Другой причиной изменения лавинного режима могло стать сокращение площади ледников на склонах г. Джимарай-хох в 2002 г. Так, деградация оледенения в Приэльбрусье рассматривается как одна из причин активизации лавинной деятельности [Олейников, Володичева, 2005]. В будущем роль лавин как фактора восстановления Колки может уменьшиться.

Интенсивность таяния снега и льда в цирке зависит от двух основных показателей: температуры воздуха и толщины моренного чехла. Температура воздуха в цирке зависит не только от общеклиматических показателей, но и от местных условий, прежде всего от степени заполнения цирка льдом. Р.А. Чернов и О.В. Рототаева [2010] справедливо отмечают, что события 20 сентября 2002 г. привели к резкому изменению температурных условий таяния, и считают, что изменение теплового баланса будет препятствовать быстрому накоплению льда. Твердые осадки, выпадающие на днище цирка Колка, полностью стаивают в начале лета и не оказывают влияния на восстановление ледника. В то же время поверхность формирующихся языков ледников покрыта мощным, практически сплошным чехлом обломочного материала толщиной более 0,5 м. По экспериментальным данным [Рототаев, 1983], при толщине поверхностной морены 0,5 м таяние подморенного льда на Колке составляет около 10 % от таяния чистого льда. Поэтому таяние льда на языках наступающих ледников должно быть минимальным. В отличие от Р.А. Чернова и О.В. Рототаевой [2010], мы считаем, что изменение теплового баланса не является препятствием для восстановления ледника Колка. В ближайшие годы его баланс массы будет оставаться положительным. Значения баланса будут определяться почти исключительно условиями холодного периода.

Отметим также, что прогнозы восстановления Колки, сделанные авторами ранее [Петраков и др., 2006], пока оправдываются. Как и ожидалось, верхний фрагмент Колки начал продвигаться вниз по вместилищу. Мы предполагали, что к 2025 г. можно прогнозировать восстановление линейных размеров Колки. Подвергать это суждение ревизии преждевременно, но по мере восстановления ледника влияние условий теплого сезона на его баланс будет возрастать.

Мы прогнозировали, что объем накопившегося льда к 2025 г. не достигнет предкатастрофического. При экстраполяции существующих темпов накопления льда его объем к 2025 г. достиг бы 60–70 млн м<sup>3</sup>, однако фактически объем Колки вряд ли достигнет этого значения из-за ожидаемого возрастания роли абляции в балансе ледника.

Следует отметить, что толща погребенного льда, оставшаяся в ложе Колки после катастрофы [Петраков и др., 2004; Чернов, Роттаева, 2010], может быть вовлечена в движение ледника. Оценка объема погребенного льда затруднительна без проведения геофизических исследований.

**О темпах таяния ледового тела.** Как и ожидалось, темпы уменьшения объема ледового тела в Кармадонской котловине прогрессивно уменьшаются. Это происходит за счет резкого снижения роли термоэрозии в таянии льда, а также за счет уменьшения площади ледового тела, сопровождающегося возрастанием толщины чехла обломочного материала на поверхности льда. Роль термоэрозии была велика на начальном этапе таяния [Петраков и др., 2004; Мавлюдов, 2011]. Именно вклад термоэрозии привел к расхождению данных реального таяния в 2002–2003 гг. со сделанными ранее оценками [Поповнин и др., 2003; Петраков и др., 2004]. Выход русел рек, прежде всего Геналдона, на дневную поверхность, в основном реализовавшийся к 2006 г., привел к минимизации роли термоэрозии в таянии ледового тела. Содержание моренного материала в толще ледника Колка по данным натурных наблюдений оценивалось в 1,25 % [Роттаев, 1983]. Можно предположить, что в теле завала была такая же или более высокая концентрация обломочного материала. Второй вариант более вероятен, с учетом каменных обвалов августа–сентября 2002 г. Даже при концентрации обломочного материала 1,25 % толщина моренного чехла к лету 2009 г. могла увеличиться в среднем на 0,6 м. Данная величина получена исходя из среднего понижения поверхности ледового тела на 50 м, без учета сокращения его площади и возможного выноса материала. Это должно было привести к сокращению темпов таяния более чем в 10 раз по сравнению с 2002–2003 гг. Продолжающееся увеличение толщины чехла обломочного материала будет способствовать дальнейшему по-

нижению темпов таяния. Учитывая нестационарность режима таяния, ледяной завал будет сохраняться примерно до 2020 г. Общий срок его таяния достигнет 18 лет, что существенно больше, чем предполагалось нами ранее [Поповнин и др., 2003; Петраков и др., 2004].

В первый год после катастрофы гидрологическая роль ледяного завала в Кармадонской котловине была наибольшей. Таяние почти 50 млн м<sup>3</sup> дало среднегодовую прибавку к расходу р. Геналдон в 1,5 м<sup>3</sup>/с, что составляет более 50 % среднегодового расхода реки [Отчет..., 2003]. Однако, по нашим расчетам, уже в 2004 г. таяние ледового тела увеличивало расход воды в Геналдоне лишь на 12 %, а в 2004–2009 гг. – на 4 %. Можно сказать, что на сегодняшний день гидрологическая роль ледового тела пренебрежимо мала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ледниковом цирке Колка продолжается быстрое накопление льда. В 2009 г. толщина новообразованных ледниковых языков достигла 50 м. За 2004–2009 гг. в цирке накопилось около 16 млн м<sup>3</sup> льда, что составляет от 12 до 20 % от объема Колки перед катастрофой 2002 г. Это произошло на фоне неблагоприятных для оледенения Кавказа погодных условий. На современном этапе баланс массы новообразованного ледника Колка, перекрытого мощной толщей поверхностной морены, определяется преимущественно условиями периода аккумуляции. При квазистационарности климатических условий в будущем можно прогнозировать замедление темпов восстановления ледника из-за возрастания абляции. Ледяные заплески в зоне транзита полностью растаяли, произошло восстановление травянистой растительности. Объем ледового завала в Кармадонской котловине в 2002–2009 гг. сократился на три четверти. Лед в котловине, судя по всему, сохранится до 2020 г. из-за прогрессирующего замедления темпов таяния. Гидрологическая роль ледового тела в стоке р. Геналдон сегодня мала. Основную опасность для землепользования в долине р. Геналдон представляет возможность формирования крупного селя дождевого или гляциально-дождевого генезиса при выпадении осадков редкой обеспеченности. В ближайшие 10–15 лет повторение событий, схожих с катастрофой 2002 г., маловероятно. Необходимо продолжать наблюдения за восстановлением ледника Колка и каждые 5–10 лет проводить повторную съемку для измерения объема накопившегося льда.

Авторы выражают благодарность В.Г. Аддееву, В.А. Иванову, О.Н. Рыжанову, К. Царахову за логистическую поддержку, В.О. Михайлову и А.В. Петрасову за помощь в проведении полевых работ.

Работы выполнены при поддержке программы “Наука для мира” (проект 982143), РФФИ (проекты 09-05-00934, 10-05-01127, 10-05-00267, 12-05-00391), Программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-1097.2012.5), госконтракта “НОЦ” № 14.740.11.0200. Космические снимки на район исследований были предоставлены геопорталом МГУ им. М.В. Ломоносова и ИТЦ “СканЭкс”.

### Литература

- Васьков И.М., Валиев А.Л.** Ледники Колка и Майли сегодня // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2010, т. 10, № 1, с. 29–33.
- Десинов Л.В.** Пульсация ледника Колка в 2002 году // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 72–87.
- Дюргеров М.Б., Поповнин В.В.** Реконструкция баланса массы, пространственного положения и жидкого стока ледника Джанкуат со второй половины XIX в. // Материалы гляциол. исслед., 1980, вып. 40, с. 73–82.
- Кортиев Л.И., Кортиева В.Л., Чочиев С.В.** Анализ социального, экологического и экономического ущерба от разрушений ледника Колка // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2009, т. 9, № 3, с. 41–42.
- Котляков В.М., Рототаева О.В., Осокин Н.И.** Пульсирующие ледники и ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 65–71.
- Мавлюдов Б.Р.** Разрушение Геналдонского ледяного завала (Северная Осетия) в 2002–2006 годах // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 68–79.
- Муравьев Я.Д.** Газовое извержение в цирке – возможная причина развития подвижки ледника Колка по катастрофическому сценарию // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 98, с. 44–55.
- Олейников А.Д., Володичева Н.А.** Об увеличении лавинных катастроф в районах деградации горного оледенения // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 99, с. 89–93.
- Отчет** о результатах работы межведомственной экспедиции по сбору, анализу и обобщению данных о геодинамических, вулканических, гидрометеорологических и гляциологических процессах в Кармадонском ущелье за 2003 год (Республика Северная Осетия–Алания). Владикавказ, М., МЧС, МПР, Минобразования России, Росгидромет, РАН, МГУ, 2003, 392 с.
- Панов В.Д.** Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб., Гидрометеиздат, 1993, 430 с.
- Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Лурье П.М.** Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 г. // Метеорология и гидрология, 2002, № 12, с. 94–98.
- Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** По следам Геналдонской катастрофы: год спустя // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 1, с. 29–39.
- Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** Оценка и прогноз динамики ледовых образований и рельефа после Геналдонской катастрофы 2002 г. // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Докл. междунар. конф. (Владикавказ–Москва, 23–26 июня 2004 г.). Владикавказ, Олимп, 2006, с. 171–178.
- Познанин В.Л.** Механизмы селевых ледниковых катастроф. М., ИМГРЭ, 2009, 182 с.
- Познанин В.Л., Геворкян С.Г.** Гидравлический механизм отделения тела ледника Колка от ложа: начало срыва – кинетика и гравитация // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 3, с. 87–96.
- Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 3–17.
- Рототаев К.П.** Исследование пульсирующего ледника Колка / К.П. Рототаев, В.Г. Ходаков, А.Н. Кренке. М., Наука, 1983, 168 с.
- Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А.** Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 4, с. 62–71.
- Чернов Р.А., Рототаева О.В.** О развитии посткатастрофических процессов в цирке ледника Колка и долине р. Геналдон (северный склон Казбекского массива) // Лед и снег, 2010, вып. 4 (112), с. 25–29.
- Chernomorets S.S., Tutubalina O.V., Seinoва I.B. et al.** Glacier and debris flow disasters around Mt. Kazbek, Russia/Georgia // Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Rotterdam, Millpress, 2007, p. 691–702.
- Drobyshev V.N.** Glacial catastrophe of 20 September 2002 in North Ossetia // Russ. J. Earth Sci., 2006, vol. 8, ES4004, doi:10.2205/2006ES000207.
- Evans S.G., Tutubalina O.V., Drobyshev V.N. et al.** Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002 // Geomorphology, 2009, vol. 105, p. 314–321.
- Huggel C.** Recent extreme slope failures in glacial environments: effects of thermal perturbation // Quatern. Sci. Rev., 2009, vol. 28, p. 1119–1130.
- Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haerberli W. et al.** The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery // Natural Hazards and Earth System Sci., 2005, vol. 5, p. 173–187.
- Kääb A., Huggel C., Fischer L. et al.** Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview // Natural Hazards and Earth System Sci., 2005, vol. 5, p. 527–554. SRef-ID: 1684-9981/nhess/2005/5-527.
- Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A.** The September 2002 Kolka Glacier Catastrophe in North Ossetia, Russian Federation: evidence and analysis // Mountain Res. and Development, 2004, vol. 24, p. 78–83.
- Petrakov D.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Tutubalina O.V.** Catastrophic glacial multi-phase mass movement; a special type of glacial hazard // Adv. Geosci., 2008, vol. 14, p. 211–218.
- WGMS 2007.** Glacier Mass Balance Bull. No. 9 (2004–2005). Haerberli W., Hoelzle M., Zemp M. (eds). ICSU(FAGS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO. Zurich, World Glacier Monitor. Serv., 100 p.
- WGMS 2009.** Glacier Mass Balance Bull. No. 10 (2006–2007). Haerberli W., Gaertner-Roer I., Hoelzle M. et al. (eds). ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO. Zurich, World Glacier Monitor. Serv., 96 p.

Поступила в редакцию  
31 мая 2012 г.