НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, т. IX, № 4, с. 62–71

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 511.311.21.(234.9)

ЛЕДНИК КОЛКА ПЕРЕД КАТАСТРОФОЙ 2002 ГОДА: НОВЫЕ ДАННЫЕ

О. В. Тутубалина, С. С. Черноморец*, Д. А. Петраков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119992, Москва, Ленинские горы, Россия
**Университетский центр инженерной геодинамики и мониторинга (УЦИГМ), 125252, Москва, ул. Куусинена, 25, Россия*

Впервые проанализированы космические снимки Landsat 7 ETM+ от 19 августа, 4 и 20 сентября 2002 г., позволяющие оценить состояние ледникового цирка Колка перед катастрофой 20 сентября 2002 г. Установлено, что резкая активизация обвалов с северного склона г. Джимарай-хох произошла в конце июля–первой половине августа 2002 г. Обвалы льда с висячих ледников практически завершились к 20 сентября, скальные обвалы продолжались длительное время после катастрофы. Определены площади висячих ледников, обрушившихся на Колку перед катастрофой (0,34 км^2), и площади зон аккумуляции обвалов на поверхности Колки. На снимках 19 августа и 4 сентября признаков активизации ледника Колка не наблюдается, на снимке 20 сентября прослеживается участок активизации в тыловой части ледника. Установлено, что в период с июля 2002 г. до утра 20 сентября 2002 г. (за 8,5 часов до катастрофы) фронт ледника Колка находился в квазистационарном состоянии.

Ледник, обвал, ледниковая катастрофа, Колка

KOLKA GLACIER BEFORE THE 2002 COLLAPSE: NEW DATA

O. V. Tutubalina, S. S. Chernomorets*, D. A. Petrakov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 119992, Moscow, Leninskie Gory, Russia
**University Centre for Engineering Geodynamics and Monitoring (UCEGM), Kuusinen str., 25, 125252, Moscow, Russia*

We have analysed for the first time the series of satellite images Landsat 7 ETM+ on August 19, September 4, and September 20, 2002 to assess the state of the Kolka glacier cirque before the disaster on September 20, 2002. Large collapses of ice and rocks on the northern slope of the Mt. Dzhimarai-khokh began in late July–early August 2002. Ice collapses from hanging glaciers have mostly finished before September 20, while rock falls were continuing for a long time after the disaster. We have estimated the total area (0,34 km^2) of the hanging glaciers that fell onto the Kolka glacier some weeks before the disaster, and the areas of the collapsed rocks and ice on the Kolka glacier surface. There were no signs of the Kolka glacier activity in the August 19 and September 4 images, but in the image of September 20 we can see an activated zone in the rear part of the glacier. Kolka glacier terminus was quasi-stationary from July 2002 to the morning of September 20, 2002 (8.5 hours before the disaster).

Glacier, slope failure, glacier disaster, Kolka

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем при исследовании природных катастроф является оценка особенностей подготовительного периода. Как правило, информации о подготовительном периоде недостаточно либо она вообще отсутствует. Это приводит к различиям во взглядах исследователей на роль разных факторов в подготовке катастроф.

20 сентября 2002 г. на Кавказе произошла катастрофа на леднике Колка, находящемся под склонами г. Джимарай-хох вблизи г. Казбек. Это крупнейшая по объему перемещенного материала (до 140 млн м^3) из зафиксированных в мире ледниковых катастроф. После события были проведены дистанционные съемки и многочисленные научные экспедиции. Однако оставалось загадкой, что именно происходило перед катастрофой и привело к ней. Среди ученых велись дискуссии о роли обвалов со стены г. Джимарай-хох на Колку. При этом оставалось неизвестным, сколько материала упало за месяцы и годы до катастрофы, а сколько – в последние часы.

© О.В. Тутубалина, С.С. Черноморец, Д.А. Петраков, 2005

Высказывались различные, часто противоречащие друг другу гипотезы о процессе подготовки катастрофы, ее причинах и механизме. Основные версии нами рассмотрены ранее [*Поповнин и др., 2003; Петраков и др., 2004*]. В данной статье анализируется именно период подготовки катастрофы, причем мы намеренно исключаем из рассмотрения причины катастрофы и ее триггерный механизм.

Недавно авторам стали доступны уникальные снимки 19 августа, 4 сентября и 20 сентября 2002 г., полученные сканером Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) с борта американского спутника Landsat 7. Эти снимки до сих пор не изучались специалистами. Последний снимок сделан в 11 часов 31 минуту утра по местному времени, за 8,5 ч до того, как ледник ринулся с огромной скоростью по долине р. Геналдон, в результате чего погибли 125 человек.

Спутник передал информацию на станцию приема на Шпицбергене, а в центральный архив снимки поступили позже. Авторы обнаружили эти материалы в архиве USGS Earth Explorer и получили доступ к ним благодаря помощи Р. Линдсей и других сотрудников Интернет-издания NASA Earth Observatory и Геологической съемки США. Снимки позволяют более взвешенно подойти к оценке роли обвалов в период подготовки катастрофы, измерить площадь обвальных накоплений и упавших ледников по данным вертикальной съемки. Анализ новых данных проводился на основе материалов 10 полевых поездок авторов в район катастрофы, а также архива наземных и воздушных съемок.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЕДКАТАСТРОФИЧЕСКОГО ПЕРИОДА

Подготовительный период катастрофы 2002 г. интерпретировался по-разному. В частности, обсуждалась роль обвалов со стены г. Джимарай-хох. Одни специалисты полагали, что катастрофу вызвал единовременный обвал 20 сентября. Другие утверждали, что обвальные массы поступили на ледник задолго до катастрофы, а 20 сентября произошла подвижка ледника. Исходными материалами для дискуссии послужили фотографии туристов и альпинистов, посещавших район перед катастрофой. Были высказаны также точки зрения, учитывающие обе версии.

Версия единовременного обвала появилась в первые дни после катастрофы. А.П. Полквой [*2002*] считал, что причиной катастрофы послужило обрушение висячего безымянного ледника из-под вершины Джимарай-хох с высоты около 4000 м на ледник Колка. Г.А. Долгов утверждал, что в 2000 г. ледник Колка был спокоен и ничто не предвещало катастрофы. 20 сентября 2002 г. от висячего ледника с высоты 4350 м оторвалась ледовая масса объемом около 8 млн м^3, пролетела 1000 м по воздуху и ударила по леднику Колка, что нарушило его равновесие и привело к началу катастрофического движения [*Можно ли прогнозировать..., 2002*]. Эта точка зрения содержится и в других работах [*Васьков и др., 2004; Панов и др., 2002*].

Следует отметить, что сразу после катастрофы информации о предкатастрофическом периоде почти не было, и авторы также принимали версию единовременного обвала [*Поповнин и др., 2003*].

Сообщения очевидцев. Туристы Б.В. Малахов и Н.В. Обухова побывали в цирке ледника Колка 5–6 мая 2002 г. и сделали снимки будущей зоны зарождения обвалов [*Малахов, 2002*] (рис. 1,*а*). Они наблюдали многочисленные лавины, однако крупных ледовых и скальных обвалов еще не было.

По мнению альпиниста Э.Т. Манукянца, за 54 дня до катастрофы не было заметно ничего, что „могло бы предвещать столь ужасное развитие событий в скором времени" [*Манукянц, 2002*].

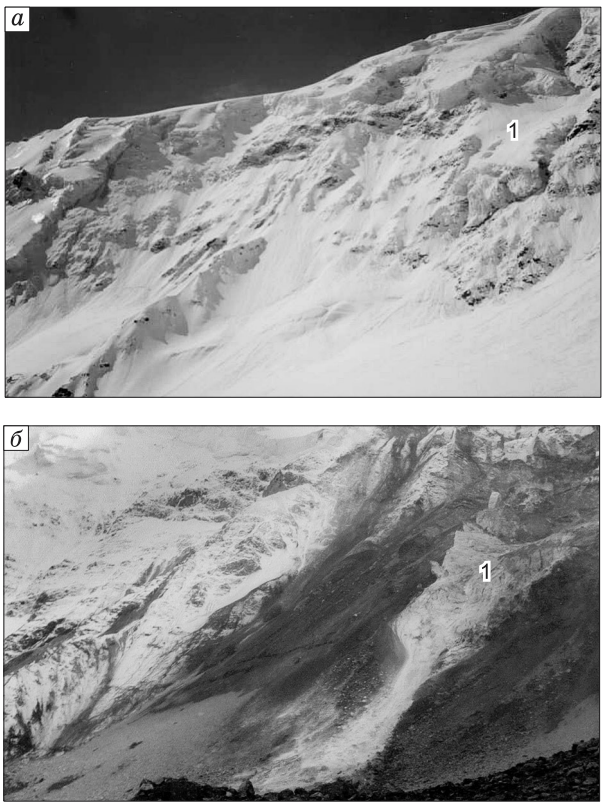

Рис. 1. Северный склон г. Джимарай-хох до катастрофы:

а – 5 мая 2002 г., фото Б.В. Малахова [*Малахов, 2002*]; *б* – начало сентября 2002 г., фото Д.Е. Солодкого. 1 – висячий ледник, полностью обрушившийся до 20 сентября 2002 г.

О.В. Неподоба и Д.Е. Солодкий, посетившие район катастрофы в конце августа–начале сентября 2002 г., видели следы свежего гляциального селя, прошедшего по р. Колка. Со стороны ледника Колка раздавался непрерывный грохот. Со склонов г. Джимарай-хох не прекращаясь сыпались крупные ледово-каменные обвалы (см. рис. 1,*б*), ширина полосы обвалов достигала 1 км. Рельеф склона „менялся на глазах". Вблизи фронта ледника Колка образовалось три небольших временных озера.

Местный житель А. Цирихов, по информации Л.В. Десинова [*2004*], находился в ночь на 20 сентября в соседней долине р. Цатадон и сообщил о сильных сотрясениях поверхности, сопровождавшихся гулом, в 2 часа ночи накануне катастрофы.

Версия подвижки ледника. По мнению Л.В. Десинова [*2004*], на снимке В.Г. Корзуна с борта Международной космической станции (МКС) от 13 августа 2002 г. видны кинематические волны, отражающие начало подвижки ледника. На основе снимков Д.Е. Солодкого Л.В. Десинов утверждает, что к началу сентября 2002 г. уже произошла полная разгрузка упавших висячих ледников на поверхность Колки. После 28 августа ледник Колка начал движение вниз по долине. Началом подвижки Л.В. Десинов считает ледниковый сель, сошедший в последних числах августа. До 20 сентября ледник продвинулся на 1600 м. „Газогидравлический удар", ставший, по мнению ученого, спусковым механизмом катастрофы, произошел в 2 часа ночи 20 сентября 2002 г. Удар был вызван прорывом горячих вод и фумарольных газов с ложа, когда ледник стал более тонким вследствие начавшейся за неделю до этого подвижки. Между ночным „газогидравлическим ударом" и вечером 20 сентября продвинувшийся ранее ледник получил дополнительный материал из тыловой зоны и наконец накопил критическую массу, что привело вечером 20 сентября к прорыву через сужение долины и началу катастрофически быстрого движения [*Десинов, 2004*].

Промежуточные и иные версии. И.В. Галушкин, В.О. Гроппен, М.Ю. Никитин [*Отчет..., 2003*] не нашли следов кинематических волн на снимке В.Г. Корзуна с борта МКС от 13 августа 2002 г. Они считают, что факта пульсации (подвижки) не было, а катастрофа стала результатом гигантского обвала.

В.Н. Дробышев [*2005*] полагает, что причиной начала обвалов могло стать землетрясение 14 июля 2002 г. Обвалы фирновых полей объемом 12–15 млн м^3, продолжавшиеся более двух месяцев, перегрузили тыловую часть ледника Колка и привели к образованию плоскости скола в слое придонного льда. Обширный конус выноса на поверхности ледника Колка сформировался уже в конце августа 2002 г. Масштабные обвалы фирновых полей, по мнению В.Н. Дробышева, не прекращались и после схода ледника.

В.М. Котляков, О.В. Рототаева и Н.И. Осокин [*2004*] считают, что в течение июля–сентября 2002 г. ледник в результате обвалов льда и горных пород набрал критическую массу и начал терять устойчивость, а непосредственным пусковым импульсом мог стать очередной обвал.

По мнению группы исследователей [*Huggel et al., 2005*], несколько миллионов кубометров породы и льда упало в течение считанных недель до основного события. Несмотря на полевые наблюдения, нет четких свидетельств наличия горячих источников и фумарол на склоне, где шли обвалы. Авторы заключают, что нельзя оценить, как много породы и льда обвалилось в ходе предкатастрофических событий, а сколько – во время основного события 20 сентября.

Такое многообразие взглядов на предкатастрофический период связано с недостатком фактических данных. Вновь полученные снимки позволяют оценить достоверность высказанных гипотез и уточнить роль обвалов в ходе подготовки катастрофы.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалы космической съемки. В основу проведенного анализа легли космические снимки Landsat 7 ETM+ от 19 августа, 4 сентября и 20 сентября 2002 г. (рис. 2). Съемка проводилась с одной и той же орбиты в 11 часов 31 минуту утра по местному времени (8 часов 31 минуту по Гринвичу). Дополнительно использовались снимки Landsat 7 ETM+ от 2 июля 2002 г. и 16 октября 2000 г., снимки Terra ASTER от 22 июля и 3 октября 2001 г., 18 июля 2002 г., 6 октября 2002 г., снимок, сделанный цифровой камерой Kodak с борта МКС (В.Г. Корзун) 13 августа 2002 г. Анализировались также фрагменты посткатастрофических снимков со спутника QuickBird от 25 сентября 2002 г., приведенные в работе К. Хуггеля с соавторами [*Huggel et al., 2005*].

При дешифрировании использовались следующие спектральные зоны снимков: для ETM+ – с разрешением 30 м в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах и с разрешением 15 м в видимом диапазоне; для ASTER – с разрешением 15 м в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах; для снимка с МКС – цветной снимок в видимом диапазоне, с разрешением около 6 м; для QuickBird – три фрагмента цветного снимка различного масштаба (см. рис. 3, 4, 7 в статье [*Huggel et al., 2005*]), разрешение которых составило от 3 до 5 м (разрешение исходных снимков 0,7 и 2,5 м, в видимом диапазоне).

Снимки ETM+ получены авторами после геометрической коррекции по орбитальным данным,

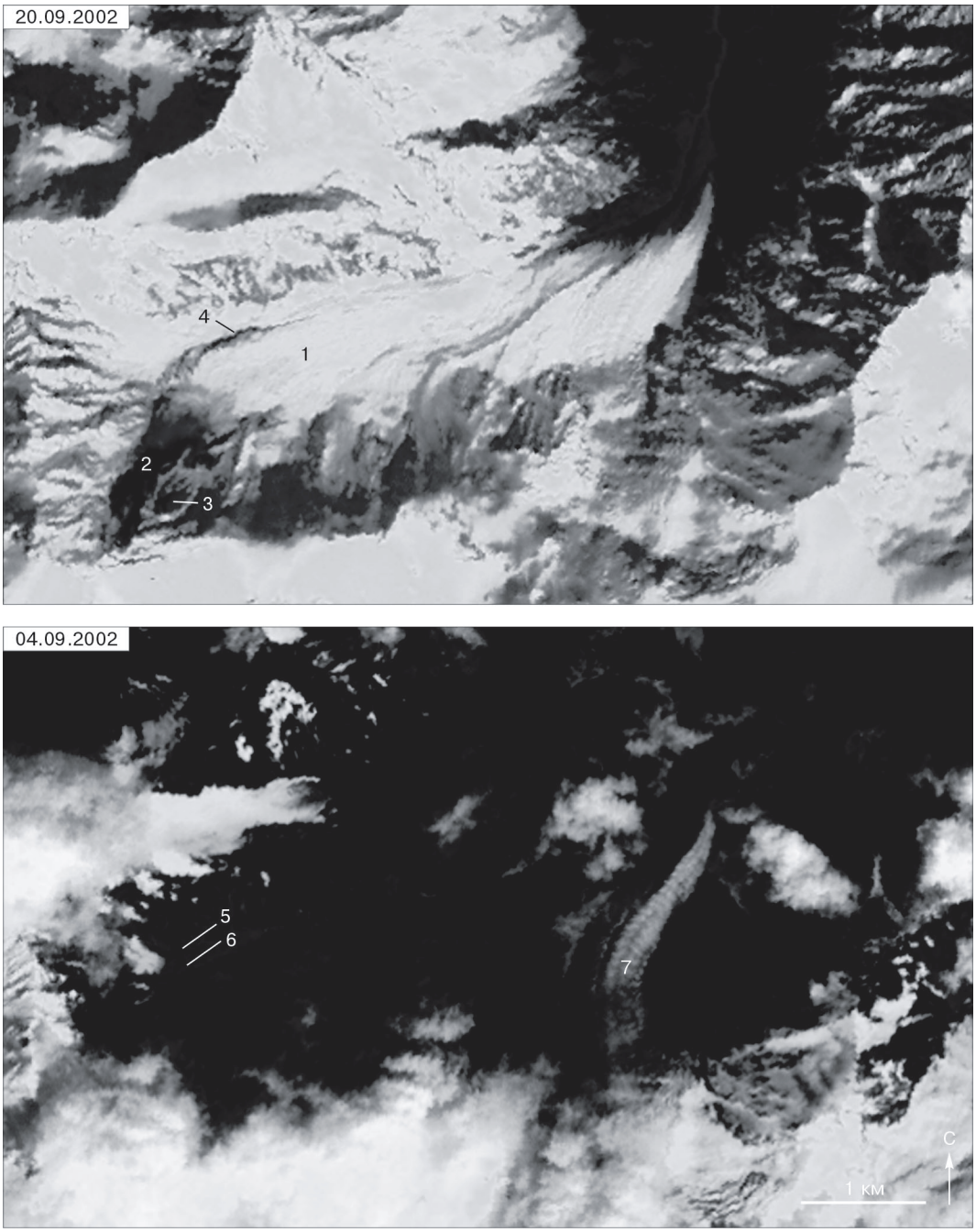

Рис. 2. Ледниковый цирк Колка за 8,5 часов, за 16 дней и за месяц до катастрофы 20 сентября 2002 г. на космических снимках Landsat 7 ETM+:

1 – ледник Колка; 2 – зона выноса обвалившихся горных пород; 3 – место висячего ледника, обвалившегося в период с 19 августа до 20 сентября 2002 г.; 4 – тень уступа поверхности ледника; 5, 6 – граница обвального шлейфа горных пород на 4 сентября и 19 августа соответственно; 7 – ледник Майли; 8 – обвальный шлейф горных пород 19 августа; 9 – висячий ледник, позднее полностью обвалившийся; 10 – г. Джимарай-хох.

На снимках снег и лед ярко-голубые, облака белые, скалы и участки с разреженной растительностью розовые, а растительность ярко-зеленая. На двух более ранних снимках поверхность ледника Колка темного цвета, поскольку она покрыта моренными отложениями. К 20 сентября выпал свежий снег.

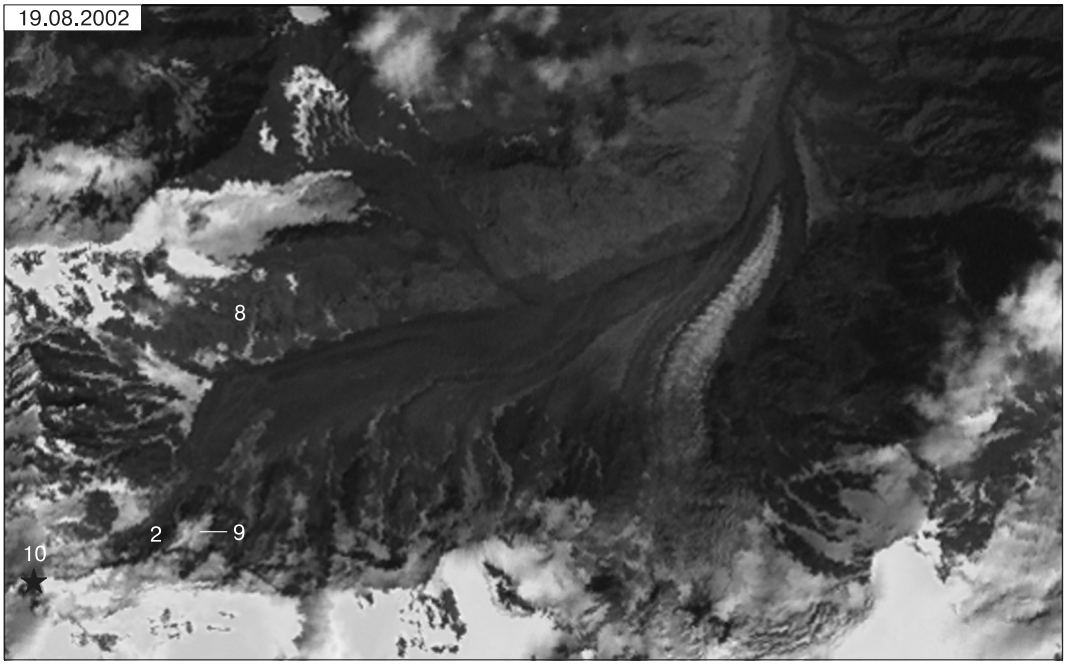

Рис. 2 (окончание).

в универсальной поперечно-цилиндрической проекции Меркатора (UTM) на эллипсоиде WGS84. Погрешности орбитальной привязки привели к сдвигам до 100 м во взаимном положении снимков. Для обеспечения анализа изменений все снимки были совмещены со снимком 20 сентября 2002 г. с погрешностью до 15 м. Совмещение проводилось в пакете программ ERDAS Imagine 8.5. Величина сдвигов определялась по 15-метровой зоне, по 3–4 опорным точкам для каждого снимка. Поскольку все снимки получены в одной и той же проекции, между ними не было значительного разворота. Таким образом, примененная процедура коррекции оказалась достаточной и позволила избежать дополнительных искажений растрового изображения.

Фрагменты снимков QuickBird совмещались друг с другом по опорным точкам на перекрывающихся участках, а также со снимком ETM+ от 20 сентября 2002 г. Погрешность взаимного совмещения фрагментов снимков QuickBird составила около 2 м. При совмещении со снимком ETM+ возникли трудности, связанные с большими изменениями на местности в ходе катастрофы и с тем, что съемка со спутника QuickBird велась с наклоном (18 градусов от надира), а со спутника Landsat 7 – вертикально. Поэтому выполнено два варианта совмещения: один для анализа динамики обвалов висячих ледников со стены г. Джимарайхох, другой для изучения участка левой боковой морены ледника Колка напротив этой стены. Для каждого участка погрешность совмещения снимков составила около 10 м.

Другие материалы. Для дешифрирования космических снимков привлекались наземные фотографии ледникового цирка Колка, сделанные в октябре 1997 г. (С.В. Егорин), 22 сентября 2001 г. (С.С. Черноморец), 5 мая (Б.В. Малахов), 6 мая (Н.В. Обухова), 28 июля (Э.Т. Манукянц) и в начале сентября 2002 г. (Д.Е. Солодкий), 5 октября 2002 г. (Д.А. Петраков), 17 августа 2003 г. (С.С. Черноморец), а также вертолетные снимки 22 сентября 2002 г. (А.П. Полквой).

Использовались также материалы 10 полевых поездок авторов в район катастрофы в период с сентября 2001 г. по август 2004 г. и ранее составленные карты района катастрофы [*Поповнин и др., 2003*] и цирка Колка через год после катастрофы [*Петраков и др., 2004*].

Методика измерений по снимкам. Участки выноса и аккумуляции обвального материала, границы висячих ледников на разные даты оконтуривались по совмещенным космическим снимкам в программе ArcView путем цифрования по экрану. В этой же программе рассчитывались площади полученных контуров.

Погрешность измерений площадей оценивалась с учетом возможной неточности проведения границ и взаимного совмещения снимков (±1 пиксел на 30-метровых снимках ETM+), а также с учетом линейной протяженности объектов.

Высота предполагаемого уступа поверхности ледника в северной части его тыловой зоны (см. ниже, рис. 6) определялась по ширине тени, отбрасываемой уступом на панхроматическом снимке

ETM+ от 20 сентября 2002 г., с учетом записанных в метаданных снимка высоты стояния Солнца (44,1°) и азимута Солнца (150,1°) в момент съемки. Применялась следующая формула: $h = l\,\mathrm{tg}a$, где h – высота уступа, м; l – ширина тени, измеренная в направлении азимута Солнца; a – высота Солнца в градусах. С учетом разрешения панхроматического снимка ETM+ погрешность определения ширины тени и высоты уступа оценивается в ±15 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты, полученные при анализе серии снимков, – определение положения фронта ледника Колка непосредственно перед катастрофой (утром 20 сентября 2002 г.), расчет площадей зон зарождения и аккумуляции обвалов, уточнение режима обвальной активности.

О положении фронта ледника Колка перед катастрофой. Высказывались гипотезы, что к 20 сентября фронт Колки продвинулся на 1600 м [*Десинов, 2004*]. На основе дешифрирования снимков мы считаем, что он оставался почти стационарным до момента катастрофы. Разрешение снимков (15 м в пикселе) и наличие свежевыпавшего снега на леднике и приледниковой поверхности не позволяют определить положение фронта Колки с высокой точностью. Мы не можем исключать незначительного продвижения (до 50 м) фронта ледника перед катастрофой. Тем не менее признаков, свидетельствующих о начале движения ледника вниз по долине (вздутие лба ледника, образование зон трещин и т. п.), не выявлено. Изменения в языковой части Колки между 19 августа и 20 сентября отсутствуют. Можно со всей уверенностью утверждать, что по состоянию на утро 20 сентября значительного продвижения фронта Колки вперед не было. Ручей Шау не тек под ледником, а впадал в поток, текущий с Колки. Кинематические волны, о существовании которых говорилось в некоторых работах [*Десинов, 2004*], на языке ледника не прослеживаются.

О роли обвалов в подготовительный период. По нашим полевым наблюдениям 22 сентября 2001 г., крупных обвалов со стены г. Джимарай-хох не было, не прослеживались линии отрыва крупных обвалов с висячих ледников. В мае 2002 г. обвалы еще не начались (см. рис. 1,*а*). На снимке Landsat 7 ETM+ от 2 июля и Terra ASTER от 18 июля 2002 г. в тыловой части Колки видны следы обвалов и лавин со склонов г. Джимарай-хох (рис. 3,*б*,*в*), по размеру не превышающие наблю-

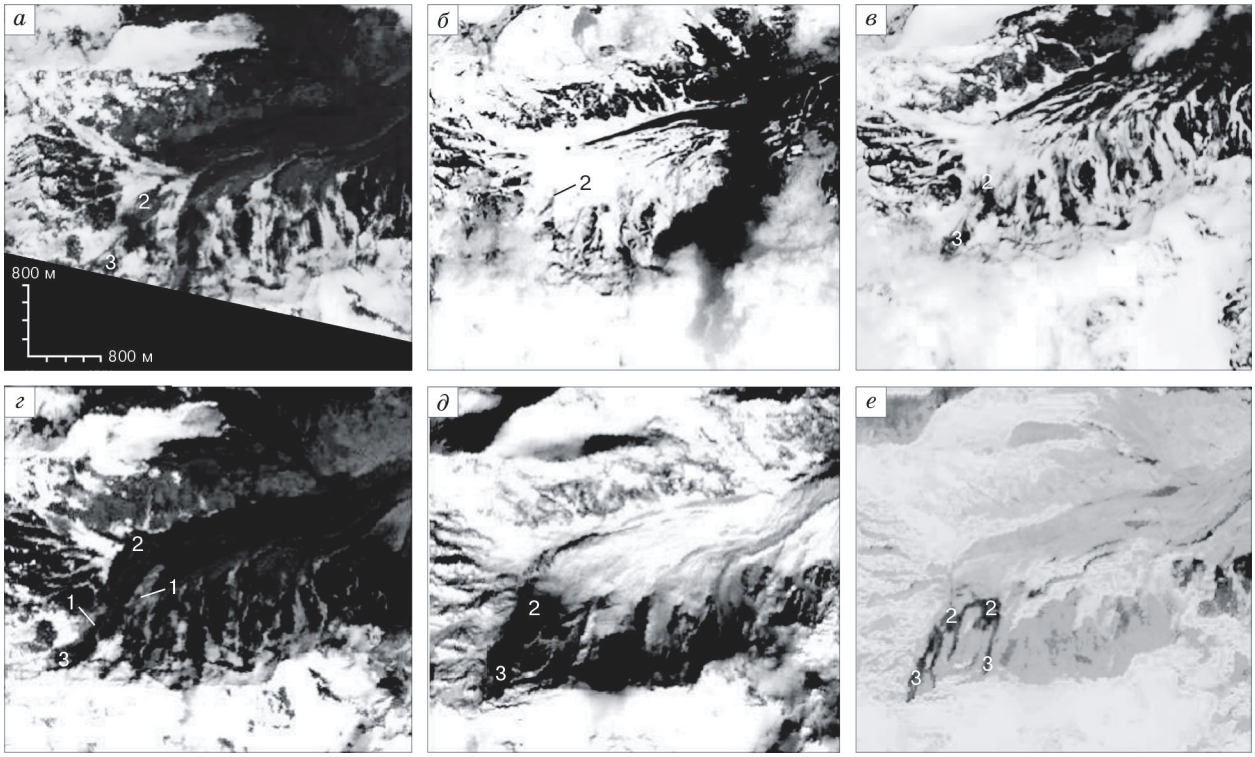

Рис. 3. Обвальные отложения в тыловой части ледника Колка:

а – 22 июля 2001 г.; *б* – 2 июля 2002 г.; *в* – 18 июля 2002 г.; *г* – 19 августа 2002 г.; *д* – 20 сентября 2002 г.; *е* – 6 октября 2002 г. 1 – зона аккумуляции льда; 2 – зона аккумуляции горной породы; 3 – зона выноса горной породы. Использованы снимки Terra ASTER (*а*, *в*, *е*) и Landsat 7 ETM+ (*б*, *г*, *д*).

Площади обвальных участков, определенные по снимкам Landsat 7 ETM+

Дата (местное время съемки 11:31)	Участок	Площадь, км^2
20.09.2002 г.	выноса горной породы	0,20 ± 0,03
20.09.2002 г.	аккумуляции горной породы	0,17 ± 0,02*
19.08.2002 г.	выноса горной породы	0,13 ± 0,02
19.08.2002 г.	аккумуляции горной породы	0,36 ± 0,03
19.08.2002 г.	аккумуляции льда	0,19 ± 0,03

* Свежий обвальный шлейф поверх снежного покрова.

давшиеся здесь ранее (см. рис. 3,*а*). 28 июля в верхней части северного склона г. Джимарай-хох еще не наблюдалось ничего экстраординарного [*Манукянц, 2002*]. Однако уже на снимке ETM+ от 19 августа отмечены обвальные шлейфы, перехлестывающие через весь ледник Колка и его левую береговую морену. На этом же снимке видны мощные ледовые обвалы (см. рис. 2,*в*).

Таким образом, установлено, что крупные скальные и ледовые обвалы начались в период между 28 июля и 19 августа 2002 г. Накопление обвального материала и расширение границ обвалов продолжалось и в дальнейшем. На снимке 20 сентября фиксируется крупный обвал, лежащий поверх свежего снега, площадью (0,17 ± 0,02) км^2 (см. рис. 2,*в*, таблица).

Обвалы висячих ледников на Колку к 20 сентября практически завершились, что подтверждается сопоставлением снимка ETM+ от 20 сентября с фрагментом снимка QuickBird от 25 сентября, опубликованного в работе [*Huggel et al., 2005*]. Общая площадь обвалившегося льда составила 0,34 км^2. Основной объем льда обвалился в период с 19 августа до 20 сентября. Скальные обвалы продолжались и после катастрофы. Интенсивные

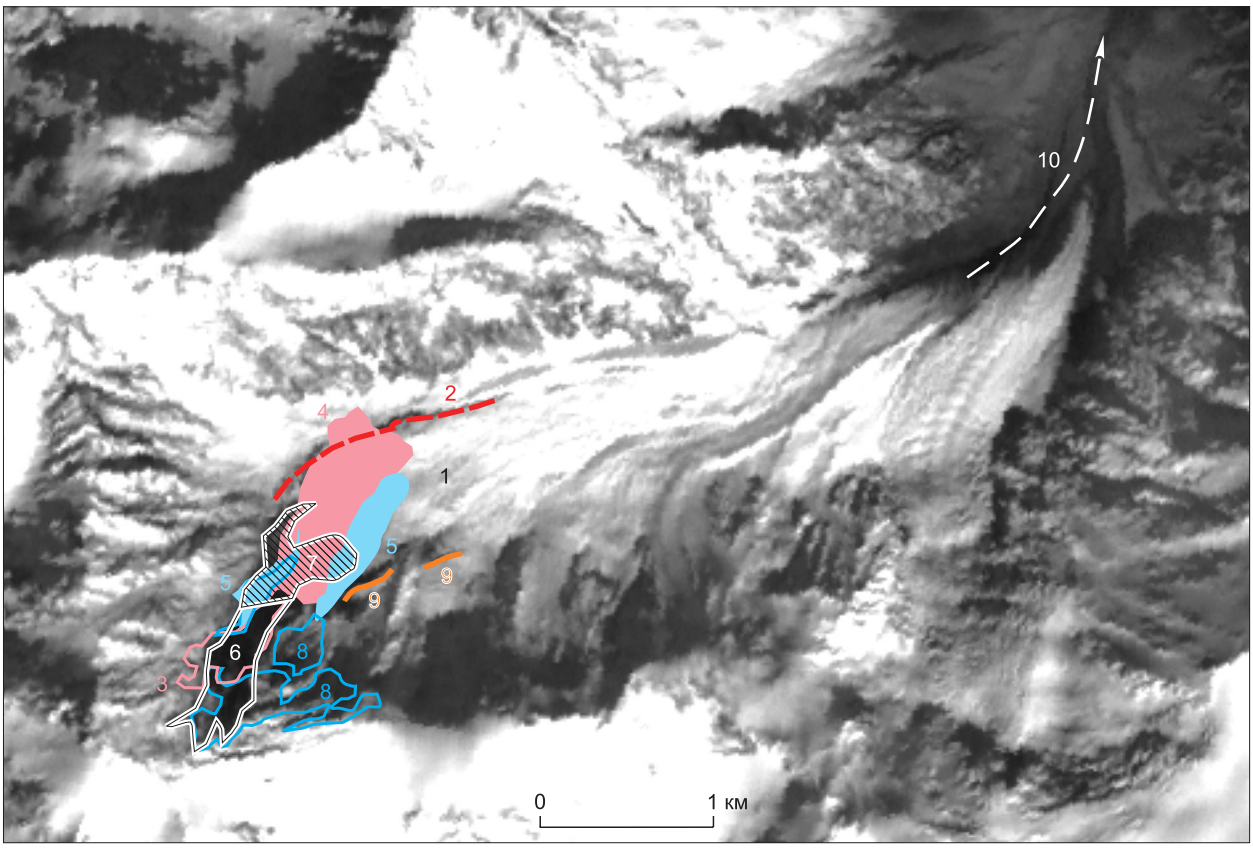

Рис. 4. Ледник Колка в период перед катастрофой (снимок Landsat 7 ETM+ от 20 сентября 2002 г.):

1 – тыловая часть ледника Колка; 2 – положение уступа, ограничивающего участок активизации утром 20 сентября. Обвалы на поверхность ледника Колка по состоянию на 19 августа: 3 – зона выноса горных пород; 4 – зона аккумуляции горных пород; 5 – зона аккумуляции льда. Обвалы по состоянию на утро 20 сентября (виден последний обвал, лежащий поверх свежевыпавшего снега): 6 – зона выноса горных пород; 7 – зона аккумуляции горных пород; 8 – контуры участков висячих ледников, обвалившихся на поверхность Колки с 19 августа до утра 20 сентября; 9 – положение разлома в южной части ледника, утро 20 сентября; 10 – направление движения ледника Колка в ходе катастрофы, через 8,5 ч после съемки ETM+ от 20 сентября.

обвалы отмечались в августе–ноябре 2002 г., июне–сентябре 2003 г., а летом 2004 г. активность обвалов уменьшилась [*Тутубалина, Черноморец, 2003; Lindsey, 2004*].

Ледник Колка за 8,5 часов до катастрофы. Сопоставление серии снимков показывает, что, по-видимому, к утру 20 сентября произошло образование разлома, отделяющего пологую часть ледника от его правых притоков. Разлом маркируется двумя участками ледяных обрывов длиной около 300 и 250 м. Участки дешифрируются на снимке 20 сентября по резким теням и разделены скальным гребнем (рис. 4). На снимке 19 августа обрывы не прослеживаются, хотя трещины на этом участке ледника существуют длительное время, например, они четко отобразились на фотографии С.В. Егорина [*2003*], сделанной в октябре 1997 г. (рис. 5,*а*). На фотографии Д.Е. Солодкого (начало сентября 2002 г.) существенного раскрытия этих трещин еще не наблюдается (см. рис. 1,*б*). Проявившись на снимке ETM+ от 20 сентября 2002 г., участки обрывов в целом сохраняют свои очертания на снимке QuickBird от 25 сентября 2002 г. Под обвальным конусом у стены г. Джимарай-хох разлом на снимке не читается, что можно объяснить как его отсутствием, так и перекрытием его свежими обвалами. Форма западного участка ледяных обрывов в основном сохранилась и к концу лета 2003 г., однако восточный участок сильно изменился в связи с наступанием ледника – бывшего притока Колки в освободившийся цирк (см. рис. 5,*б*).

Интересная деталь наблюдается на севере тыловой части ледника (рис. 6). Непосредственно к югу от левой береговой морены отчетливо прослеживается темная полоса. Анализ этого объекта приводится в дискуссионной части статьи.

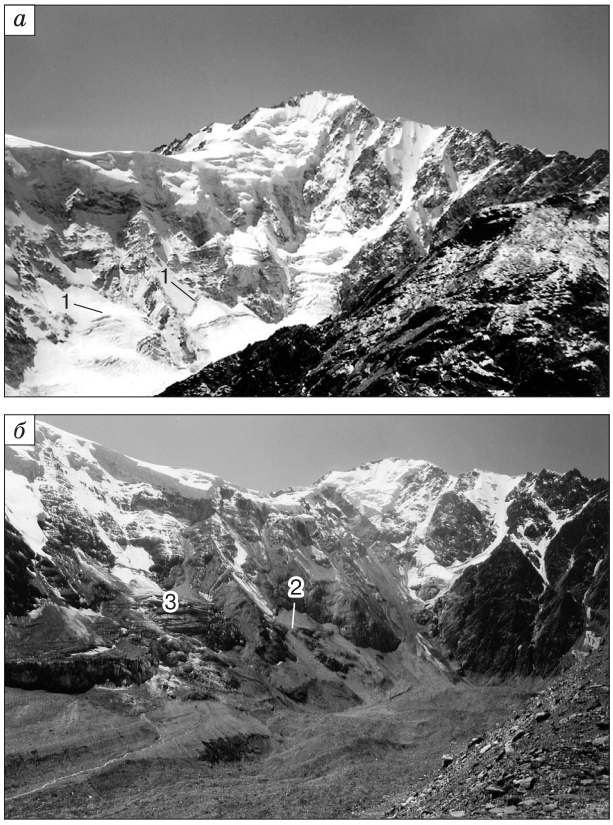

Рис. 5. Ледниковый цирк Колка до и после катастрофы:

а – октябрь 1997 г., фото С.В. Егорина [*Егорин, 2003*]; *б* – 17 августа 2003 г., фото С.С. Черноморца. 1 – трещины, по которым позднее произошел отрыв масс ледника Колка; 2 – ледяной обрыв, образовавшийся по трещине; 3 – наступающий ледник, бывший приток Колки.

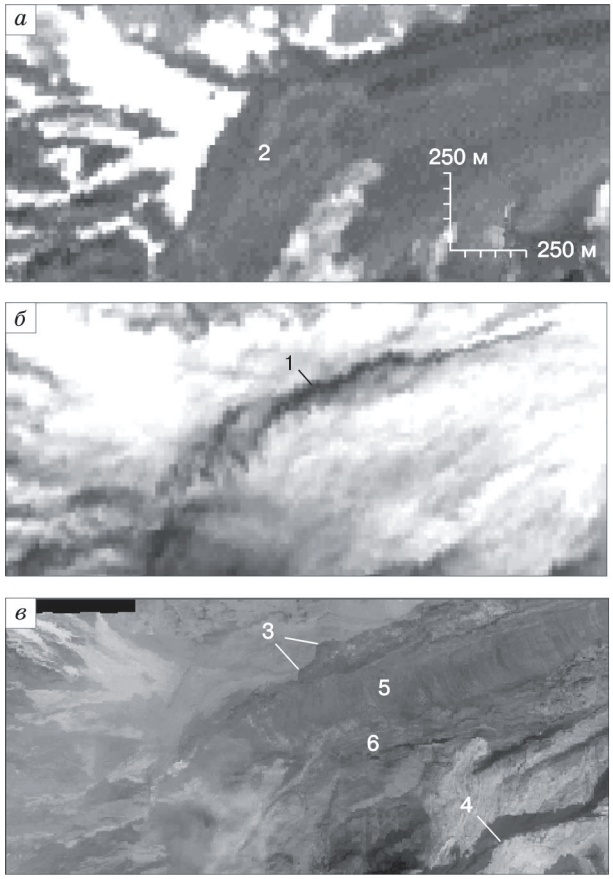

Рис. 6. Север тыловой части ледника Колка до и после катастрофы:

а – 19 августа 2002 г., снимок Landsat 7 ETM+; *б* – 20 сентября 2002 г., снимок Landsat 7 ETM+; *в* – 25 сентября 2002 г., снимок QuickBird [*Huggel et al., 2005*]. 1– затененный склон уступа, обращенного к северу; 2 – обвальный шлейф на поверхности ледника; 3 – заплеск ледово-каменных масс за левой береговой мореной; 4 – ледяные обрывы, по которым произошел отрыв масс ледника в ходе катастрофы; 5 – обнажившийся склон левой береговой морены; 6 – днище вместилища ледника.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показано выше, к утру 20 сентября 2002 г. на поверхности Колки находился основной объем обвального материала, поступившего на ледник до катастрофы. Как отразилась такая перегрузка на леднике?

Обратим особое внимание на тыловую часть ледника Колка (см. рис. 4) – зону, подверженную непосредственному воздействию обвалов. Она представляет собой верховья ледника, лежащие на дне цирка. За 8,5 ч до катастрофы в тыловой части здесь наблюдаются признаки активизации ледника.

На снимке 20 сентября отчетливо видна темная полоса на северо-западе тыловой части ледника (см. рис. 6). Полоса имеет неровный северный край, на отдельных участках перекрывает гребень левой боковой морены. В восточной части полоса сужается и переходит в тонкую темную линию, которую можно интерпретировать как границу левого края ледника.

Анализ условий освещенности в момент съемки (Солнце находилось на юго-востоке), сравнение со снимками 19 августа и 4 сентября и форма полосы приводят к выводу, что это тень склона, образовавшегося вследствие подъема поверхности и обращенного к северу. С учетом высоты стояния Солнца в момент съемки можно предположить, что крутизна склона составляла не менее 44°. Высота этого крутого уступа, определенная по длине тени с учетом азимута Солнца, оценивается в (50 ± 15) м.

Существует два варианта происхождения такого склона: гигантское обвальное тело или крутой уступ начавшего продвижение ледника.

По северной и западной границе тени склона наблюдаются своеобразные „кулисы" (см. рис. 6). Положение большинства „кулис" совпадает с границами обвальных шлейфов на снимке 19 августа. Это может говорить как о том, что склон является границей обвального тела на 20 сентября, так и о том, что по границе накопления обвальных масс началась деформация ледника.

Однако, по нашим оценкам, высота уступа слишком велика для склонов обвальных тел с г. Джимарай-хох.

В пользу гипотезы о начале продвижения ледника говорит наличие разломов в южной части его тыловой зоны (см. рис. 4). Скорее всего, они образовались из-за проседания поверхности ледника под воздействием обвалов. Объем ледникового льда на дне цирка Колка за год до катастрофы оценивался нами в 150 млн м^3 [*Петраков и др., 2004*], что соответствует массе льда (с учетом внутренней и поверхностной морен) порядка 150 млн т. В предкатастрофический период на поверхность Колки обвалилось большое количество льда: по разным оценкам, от 8,5–13 млн м^3 [*Huggel et al., 2005*] до 18 млн м^3 [*Поповнин и др., 2003*], и горной породы: от 6 млн м^3 (оценка Д.А. Петракова) до 10–14 млн м^3 [*Huggel et al., 2005*]. В результате масса ледника увеличилась более чем на 10 %, масса же тыловой части (см. рис. 4) с учетом ее площади увеличилась примерно на треть. Перегрузка тыловой части должна была привести к возникновению деформаций в теле ледника и к его активизации. Вероятно, началось ускоренное движение льда по ложу ледника или внутриледниковым плоскостям скольжения. Линии тока на леднике Колка направлены к левой береговой морене [*Рототаев и др., 1983*], поэтому фронт активизации сперва должен был проявиться именно там. Приближение к морене и малоподвижному льду, текущему со склонов г. Шау-хох, могло вызвать вспучивание поверхности из-за резкого падения скоростей движения и роста напряжений сжатия. Крутой лоб высотой в десятки метров отмечался на многих пульсирующих ледниках [*Долгушин, Осипова, 1982*].

Таким образом, представляется возможным, что в тыловой части ледника по состоянию на утро 20 сентября находился участок активизации, а в ходе катастрофы лед был выброшен и с языка ледника Колка. Почему это могло произойти?

Обвалы били в юго-западный угол ледника подобно кию, ударяющему по бильярдному шару. Один из таких обвалов вечером 20 сентября 2002 г. мог послужить импульсом к началу катастрофы. Он ударил в нестабильный ледяной массив и сдвинул его вниз по долине. Выброс тыловой части ледника Колка привел к нарушению устойчивости его языка. В результате большая часть ледника покинула вместилище в цирке Колка и начала быстрое движение вниз по долине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уникальные космические снимки Landsat 7 ETM+ от 19 августа, 4 и 20 сентября 2002 г. позволили оценить, что происходило в ледниковом цирке Колка за недели и считанные часы до катастрофы. Мощные обвалы падали на поверхность Колки уже в середине августа, высокая обвальная активность наблюдалась вплоть до начала катастрофы. Прямым следствием этого стало нарушение динамического равновесия тыловой части ледника, наблюдавшееся за 8,5 ч до катастрофы. В то же время фронт Колки оставался в квазистационарном состоянии, кинематических волн на языке ледника не наблюдалось. Таким образом, обсуждавшаяся ранее гипотеза о начале продвижения ледника за несколько дней или недель до катастрофы не подтвердилась. Судя по всему, катастрофа началась после очередного обвала, выбросившего неустойчивую тыловую часть ледника Колка вниз по долине.

Авторы выражают благодарность Р. Линдсей (R. Lindsey, NASA Earth Observatory, США) и Р. Беку (R. Beck, USGS – Геологическая съемка США и NASA Landsat Science Data Project), Дж.А. Робинсон (J.A. Robinson, NASA Johnson Space Center, США), ИТЦ „СканЭкс" (Москва) за предоставление космических снимков, Дж. Аллену (J. Allen, NASA Earth Observatory, США) за помощь в подготовке иллюстрации, В.Н. Дробышеву (РЦ „Севосгеомониторинг", Владикавказ), Б.В. Малахову, Н.В. Обуховой (Турклуб МАИ, Москва), Э.Т. Манукянцу (Владикавказ), Д.Е. Солодкому и О.В. Неподобе (команда „Форпост", Краснодар), К. Хуггелю (C. Huggel, University of Zurich, Швейцария) за предоставление материалов, Л.В. Десинову (Институт географии РАН, Москва) за ценные дискуссии, а также И.В. Крыленко (МГУ, Москва).

Исследования выполнены при финансовой поддержке программы „Ведущие научные школы" (гранты № НШ-2067.2003.5, НШ-1217.2003.5) и РФФИ (гранты № 03-05-64792, 03-05-64973).

Литература

Васьков И.М., Долгов Г.А., Музаев И.Д., Пикалюк Г.В. Динамика движения ледово-каменного обвала в верховьях р. Геналдон РСО-А 20 сентября 2002 г. // Вестн. Владикавк. науч. центра, 2004, т. 4, № 1, с. 18–26.

Десинов Л.В. Пульсация ледника Колка в 2002 году // Вестн. Владикавк. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 72–87.

Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Пульсирующие ледники. Л., Гидрометеоиздат, 1982, 192 с.

Дробышев В.Н. Гляциальная катастрофа в Северной Осетии 20 сентября 2002 года. 2005 (*в печати*).

Егорин С.В. Район Тепли–Джимарай–Казбек. 2003. (http://www.mountain.ru/world_mounts/caucasia/kasbek/2003/opisanie/).

Котляков В.М., Рототаева О.В., Осокин Н.И. Пульсирующие ледники и ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Вестн. Владикавк. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 65–71.

Малахов Б. Отчет о горном походе 1 к.с. с восхождением на Казбек 7 мая 2002 г. (http://www.turclubmai.ru/heading/papers/331).

Манукянц Э.Т. Геналдонская катастрофа 2002 года. 2002. (http://www.piligrim-andy.narod.ru/text/obval.html).

Можно ли прогнозировать стихию? // Северная Осетия, 2002, 1 окт., № 183 (23740).

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., Ильичев Ю.Г., Лурье П.М. Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 году // 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.

Полквой А.П. Каковы же причины схода ледяной лавины // Северная Осетия, 2002, 24 сент., № 178 (23735).

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

Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Исследование пульсирующего ледника Колка. М., Наука, 1983, 169 с.

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

Huggel C., Zgraggen-Oswald S., Haeberli 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.

Lindsey R. Collapse of the Kolka Glacier. 2004. (http://earthobservatory.nasa.gov/Study/Kolka/).

Поступила в редакцию
16 апреля 2005 г.