

УДК 551

ДЕСЯТЬ ЛЕТ ПОСЛЕ КАРМАДОНСКОЙ КАТАСТРОФЫ В СЕВЕРНОЙ ОСЕТИИ – О ПРИЧИНАХ СОБЫТИЯ И ПРОЦЕССАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕДНИКА

© 2014 г. В.М. Котляков, О.В. Рототаева, Г.А. Носенко, Р.А. Чернов

Институт географии РАН

Поступила в редакцию 06.06.2013 г.

На основе разносторонних исследований и расчетных данных, полученных за десять лет, прошедших после грандиозной Кармадонской катастрофы, показано, что событие имело не только гляциальную природу, как предполагалось ранее. Основной его причиной стала активизация тектонических и вулканогенных процессов в районе массива Казбек. Повышение температур и давления газов в недрах под ледником Колка вызвало накопление предельных напряжений, разрядка которых привела к выбросу ледника из своего ложа и образованию гигантского ледово-водно-каменного потока.

О внезапной катастрофе 20 сентября 2002 г. в районе Казбека писалось в ряде статей вскоре после события [8, 9, 20 и др.], в том числе и в настоящем издании. Небольшой ледник Колка на северном склоне Казбек-Джимарайского массива был “выброшен” целиком из своего ложа, и масса льда, камней и воды, превратившись в сокрушительный высокоскоростной поток, пронеслась за несколько минут на 16 км по долине р. Геналдон и заполнила Кармадонскую котловину перед входом в ущелье Скалистого хребта. Нижние части склонов всей долины, прежде с лесами и пастбищами, были сорваны до высоты 100 м, в котловине образовался гигантский ледово-каменный завал длиной 4 км, объём которого был оценен в 110–120 млн м³.

Пульсирующий ледник Колка давно известен своими подвижками. Такому режиму способствует строение ледника, который расположен в глубоком цирке, питается лавинами и обвалами с крутого правого склона и имеет пассивный, заваленный мореной язык. Это вызывает многолетнее накопление в теле ледника избыточных масс льда, в итоге приводящее к резкой разгрузке.

Прежние подвижки происходили с интервалом около 70 лет; наиболее известны события 1835, 1902 и 1969 гг. Сведения о подвижке 1902 г. по описаниям Э.А. Штебера, Н.В. Поггенполя и Р.Р. Лейцингера изложены в работе [10]. Подвижка началась в мае и завершилась 3 июля двойным

высокоскоростным ледовым выбросом, который завалил дно долины на протяжении 8 верст и погубил много людей и тысячи голов скота. Подробно изучена подвижка 1969 г., которая прошла по “классическому” сценарию продвижения пульсирующего ледника и не имела катастрофических последствий: за три месяца язык удлинился на 4 км. С 1969 по 1978 г. во время и после этой подвижки Институт географии АН СССР проводил большой комплекс исследований на леднике Колка [16]. Было рассчитано, что в 1950–60-х годах (до подвижки) постоянный положительный баланс массы ледника обеспечивал в среднем ежегодное избыточное накопление в размере 1–1.3 млн т.

В публикациях сразу после события 2002 г. первые оценки возможных причин катастрофы были лишь предположениями, хотя тогда уже было очевидно, что ледник еще не был готов к “очередной” пульсации, и предполагалось участие вулканогенного фактора. После катастрофы Институтом географии РАН впервые проводились полевые работы весной и осенью 2003 г. в рамках Межведомственной экспедиции МЧС. В цирке ледника Колка и на прилегающей к нему территории бассейна ледника Майли были выполнены GPS-съемки, фотосъемки наземные и с борта вертолета, а также взяты образцы снега, остатков льда и воды на днище цирка. В последующие годы регулярно велись наблюдения за процессами постепенного накопления нового льда на днище цирка.

За десять прошедших лет были опубликованы результаты разносторонних исследований, высказаны гипотезы разных специалистов о причинах и механизме уникального природного явления. Задача данной работы заключается в кратком анализе накопленных материалов, определении факторов, влиявших на подготовку катастрофы и на развитие современных процессов восстановления ледника Колка в его цирке.

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ПОВЛИЯВШИХ НА ПОДГОТОВКУ И РАЗВИТИЕ КАТАСТРОФЫ

Обвал висячих ледников. При облете цирка ледника Колка на вертолете группой МЧС 21 сентября 2002 г. был обнаружен на правом крутом склоне с висячими ледниками ледяной обрыв и исчезновение большого участка фирново-ледяных полей под гребнем (рис. 1). Сразу возникла версия гигантского обвала льда и горной породы, который ударил по леднику и сорвал его с места. Эта версия была поддержана в ряде публикаций и средствах массовой информации.

Однако вскоре собранные свидетельства и фотоснимки очевидцев, побывавших в этом цирке в конце июля и первых числах сентября, показали, что необычно активное разрушение ледников и горной породы на этом склоне шло давно, и линия обрыва льда уже практически полностью сформировалась до катастрофы, а в тыловой части ледника к осени 2002 г. образовался мощный конус выноса обвального материала – льда и горной породы.

В частности, прекрасные фотографии Ольги Неподоба из краснодарской группы туристов были получены с 28 августа по 5 сентября 2002 г., и они свидетельствовали о том, что в этот период полностью обрушился последний ледник, расположенный в глубоком каре в нижней половине склона. На снимках видно, что упавшие массы льда и горных пород заполнили тыловую часть склона, но были остановлены левой береговой мореной. После схода ледника 20 сентября эти снимки были показаны по нескольким телевизионным каналам.

Такое развитие событий подтвердило затем и дешифрирование космических снимков. В работе [17] на снимке Landsat 7 ETM+ от 19 августа 2002 г. отмечены линии отрыва льда на гребне и обвальные шлейфы на поверхности ледника вплоть до его левого борта, а на снимке 20 сентября – за 8.5 ч до катастрофы – обвальный склон выглядит именно так, как и после катастрофы. Авторы работы, сравнивая снимок Landsat от



Рис. 1. Массив Джимарай-Хох и тыловая часть цирка ледника Колка: *а* – до катастрофы, 1975 г. *б* – после нее, 23 июня 2003 г.: видно исчезновение висячих ледников на склоне г. Джимарай-Хох; тыловая часть пустого дна цирка; верхняя часть левой морены; потёки воды на склонах правого борта в местах выхода фумарол и начавший продвижение бывший правый приток Колки.

20 сентября с фрагментом снимка со спутника QuickBird от 25 сентября, опубликованного в статье [19], обнаружили, что обвалы висячих ледников на поверхность ледника Колка к 20 сентября практически завершились. По их оценкам, общая площадь обвалившегося льда составила 0.34 км².

По наблюдениям, в июне–сентябре 2003 г. обвалов льда не было, но камнепады, сползание и оплывание горной породы в верхней части того же склона не прекращались.

Оценка всего объёма обрушений льда и твердых пород представляет большой интерес, но



Рис. 2. Долина р. Геналдон после прохождения ледового селя, октябрь 2002 г.

измерения многих параметров уже невозможны, а их расчёты по неточным картам и фотоснимкам слишком приблизительны, о чём пишет ряд авторов [14, 17 и др.].

Снимки со спутника QuickBird с географической привязкой позволили С. Huggel с соавторами примерно оценить объём исчезнувшего участка фирново-ледовых полей на гребне [19]. В области обвалов рассматриваются две зоны: верхняя, более пологая, где толщина уступов льда составляла 10–15 м, и нижняя с толщиной отрыва висячих ледников 30–40 м. Общий объём потерянного льда оценивается в 8.5–13 млн м³. Определить объём обвалившейся горной породы гораздо сложнее, но в сумме объём обрушений, по подсчетам этих авторов, приблизительно равен 18–27 млн м³.

Накопление воды под ледником. С первых дней после события 2002 г. считается, что подобное могло случиться лишь при условии накопления под ледником особенно больших масс воды [8, 9]. Невероятно, чтобы ледник, даже если бы испытал мощный удар, мог “посуху” преодолеть 16-километровый путь по долине, захлестывая волнами на ее правый и левый борта (рис. 2). Скорость его движения существенно превышала 100 км/ч и, возможно, достигала 180 км/ч. К сожалению, временные параметры, фиксировавшие

событие, оказались неоднозначны и недостаточно точны [6].

Скорость выброса ледового селя 1902 г. была оценена по меньшей мере в 100 км/ч [16]. И даже в те годы Р.Р. Лейцингер отмечал: обилию воды и талого снега приписывают факт, с какой поразительной быстротой ледник промчался по Геналдонскому ущелью [10].

Огромное количество воды, участвовавшее в катастрофическом процессе, подтвердилось рядом фактов. На поверхности ледового завала в Кармадонской котловине 20–21 сентября, сразу после события, оказалось множество мелких озер вдоль обоих его краев и в тыловой части. В остановившемся массиве льда было еще много воды, хотя при ударе ледово-каменной массы в стену Скалистого хребта вниз по узкому ущелью прошел мощный селевой поток. В теснине волна этого потока достигала высоты 30 м, но и ниже на широкой пойме он имел высоту 3–4 м [14].

В цирке, освободившемся от ледника, осенью 2002 г. находились два озера. Одно из них вскоре исчезло, другое, размером 150 × 50 м, застали на днище в июне 2003 г. Плотина его была сложена обломочным материалом с глыбами льда, что обеспечивало постепенный сток воды, и к концу сентября озеро исчезло.

При наземном обследовании бассейна ледников Колка–Майли в июне 2003 г. еще раз получено подтверждение участия большого количества воды в момент зарождения катастрофы [10, 20]. Анализ морфологических особенностей и характера отложений, оставленных на бортах цирка и разделяющем ледники моренном массиве, а также проведенные GPS-съемки позволили установить выплеск огромной массы воды вправо через морену и вниз на ледник Майли.

Поток воды с обломками льда и камней оставил след справа на выходе из цирка, смыл поверхность моренного “треугольника” между ледниками, где на крутом спуске к леднику Майли были видны глубокие эрозионные ложбины с кусками льда, и перехлестнул через язык Майли на правый склон его долины, оставив на поверхности ледника четкий след прошедшего потока. На осыпях правого склона долины Майли была хорошо видна верхняя граница заплеска волны в виде узкой полосы, отмеченной фрагментами льда на высоте до 300 м. При этом наиболее важным признаком, хорошо заметным даже сразу после катастрофы, была ненарушенная форма осыпей и всего прежнего рельефа этого участка склона, включая русло между моренной грядой и склоном, обрывы и эрозионные борозды в нижней части осыпей и др., чего бы никак не могло быть в случае прохождения здесь массы самого ледово-каменного селя. Летом 2003 г. рельеф склона уже практически не отличался от прежнего.

Точно такой же “примазок” льда длиной около 1300 м оказался высоко над левой береговой мореной и над тыловой частью ледника, как и на правом склоне ниже ледника Майли. После выброса массы ледника Колка левая ложбина оказалась частично заполненной льдом, который растаял за 5–6 лет.

Таким образом, в момент катастрофы из-под ледника по прямому направлению, следуя ориентировке нижней части языка, прошел мощный водный поток со льдом. Вода выплывала и через гребень левой морены ледника Колка в нижней ее части.

В то же время сход основной массы льда был направлен вниз по ущелью. Доказательством служит, безусловно, рельеф склонов ущелья, “выпаханного” льдом и камнями, но, кроме того, и записи ближайшей сейсмической станции Фиагдон (в 16 км от горы Джимарай-Хох). На сейсмограммах схода ледника Колка с момента начала его движения первое резкое выделение энергии с вектором, направленным на восток, отмечено

при ударе массы о правый борт долины у конца ледника Майли [6].

Оставался вопрос – каким образом могло накопиться под ледником такое большое количество воды. Однако следует подчеркнуть, что катастрофе предшествовало несколько лет аномального таяния ледников и большого количества осадков. Более подробно исследовали этот вопрос в [11].

По данным метеостанций Владикавказ, Казбег-высокогорной и Кармадон были восстановлены гляциометеорологическими методами значения летней температуры воздуха и годовой суммы общих и твердых осадков в районе ледника Колка за вековой период, и в том числе за последние 10 лет перед катастрофой, и сопоставлены с изменениями циркуляции атмосферы в Кавказском регионе. Оказалось, что с начала 1990-х годов произошло небывалое увеличение повторяемости макропроцессов меридиональной южной циркуляции, в 4 раза превышающей среднюю величину за предшествующие 70 лет. Поток южных средиземноморских циклонов принес устойчивое повышение летних температур, а также увеличение дождей в высокогорной зоне всего Кавказа.

Расчеты показали, что с середины 1990-х гг. в бассейне ледника Колка температуры лета впервые за 100 лет превышали норму семь лет подряд, иногда на 2 °С, вплоть до катастрофы осенью 2002 г. Особенно это было видно при известном аномальном таянии ледников на всем Кавказе 1998–2001 гг., когда рекордное повышение летних температур было вызвано продолжительными устойчивыми антициклонами.

В последнее десятилетие увеличились и осадки, причем доля жидких осадков на высоте 3400 м теперь достигла 40–50%. В сток включились и участки фирновых полей, и висячих ледников на высотах 4000 м и более. Даже здесь отрицательные средние летние температуры сменились на положительные, доля жидких осадков увеличилась от нескольких процентов до 10–15%, а таяние усилилось в 1.5–2 раза.

Был также рассчитан годовой баланс массы прежнего ледника Колка перед 2002 г. и водный баланс всего ледникового бассейна Колки для каждой его части. В сумме количество воды, образующейся ежегодно в бассейне с 1995 до 2002 г., составляло от 10 до 14 млн м³, что превышало в течение восьми лет подряд среднюю многолетнюю величину на 50–100%.

К сожалению, невозможно выяснить, какая часть этой воды в последние годы уходила в сток, а что оставалось в бассейне ледника. Согласно



Рис. 3. Участок гребня г. Джимарай-Хох с обвалом льда и горной породы, облако пара и газа в цирке ледника Колка 24 сентября 2002 г. (фрагмент фото НИЛ Геологоразведчик).

математическому моделированию, выполненному А.Н. Божинским [2], для движения ледово-водно-каменного потока, преодолевшего за 7 мин. расстояние 20 км (от тыла цирка Колки до Кармадонских ворот), в леднике перед катастрофой должно было накопиться как минимум 11 млн м³ воды. Поскольку полученные годовые суммы стока и задержки воды в бассейне близки к этой цифре, можно полагать, что задержка воды была намного меньше необходимого количества. Но совсем исключить этот фактор было бы неправильно.

Новые вулканогенные проявления. Увеличению таяния и накопления воды способствовала и активизация вулканической деятельности Казбека. Она проявилась сразу после катастрофы и затем была подтверждена геохимическими и геофизическими исследованиями.

В сентябре 2002 г. на холодной северной стене цирка в зоне обвалов на высоте 4300–4500 м были хорошо видны локальные очаги таяния с длинными черными шлейфами потеков воды. Вулканологи определили их как типичные фумаролы, выходы которых были вскрыты обвалами (рис. 3). Сразу после схода ледника в тыловой части пустого цирка был обнаружен резкий запах газа – сероводорода, здесь в течение почти месяца висело облако пара и газа. Подобных явлений за

девять лет работы экспедиции на Колке в 1970-е годы никогда не было.

Весной 2003 г. были собраны образцы снега и воды на днище цирка, которые исследовались в Институте вулканологии ДВО РАН [12]. Результаты химического анализа показали, что содержание сульфат-иона в остатках льда на днище 20 мг/л в 10–15 раз выше фоновой его концентрации в зимнем снеге на склоне, а в воде озера в цирке – 600–950 мг/л, то есть почти в 500 раз. Даже в пробах воды р. Колка концентрация сульфатов (до 600 мг/л) в 15–20 раз превышала величины, измеренные прежде, в 1968 г. [15], причем и общая минерализация воды 1004 мг/л была в 5–6 раз больше.

Другой показатель связи с вулканогенными процессами – отношение S/Cl – в воде озера оказался на три–четыре порядка выше его величин в водах верховьев р. Геналдон и минеральных источниках Верхнего Кармадона в 1968 г. Такие результаты определяются вулканологами как очевидное участие в процессе катастрофы глубинного гидротермального фактора.

Последние извержения вулкана Казбек были 6 тыс. лет назад, и он считается “спящим” вулканом, подземный аппарат которого не окончательно потерял свою силу [4, 5]. Недаром массив со

всех сторон оконтурен выходами минеральных вод, и в верховьях Геналдона недалеко от конца ледника Майли находятся Верхнекармадонские термальные источники на высоте 2250 м с температурой воды до 60 °С.

Летом 2003 г. геофизические исследования представили принципиально новые данные, освещающие причины катастрофы [5]. Гравиметрические профили вдоль долины р. Геналдон выявили интенсивную отрицательную аномалию силы тяжести, начинающуюся к югу от сел. Тменикау и резко возрастающую на расстоянии всего 4 км по направлению к вулкану. Установлено приближение к северному краю близповерхностной магматической камеры с кровлей на глубине 1–2 км ниже ур. моря, вещество которой должно быть насыщено водными флюидами и нагрето до температуры более 1000 °С. Другим независимым методом – электроразведкой МТЗ – в районе языка ледника Майли подтверждены северные структурные элементы периферической камеры с кровлей предположительно на глубине 4 км ниже ур. моря, а также на 20 км выявлен глубинный магматический очаг.

Кроме того, по 83 ночным тепловым космическим снимкам с американских спутников NOAA за ряд лет изучалась динамика теплового поля в районе Казбека. Сравнение пар снимков за летние сезоны 1990–2002 и 1990–2003 гг., показало резкую положительную тепловую аномалию с четкими контурами прямо под ледником Колка, которая проявилась именно в 2003 г. – после схода ледника, в то время как до катастрофы он служил экраном, задерживающим выход глубинного тепла [7].

Не оставалось сомнений, что одним из решающих факторов подготовки катастрофы было проявление активности Казбекского вулканического центра.

Активизация тектонических процессов. Версия удара по леднику гигантского обвала льда и горной породы, о которой говорилось выше, нередко связывалась с землетрясением. Детальное исследование сейсмической обстановки в Северной Осетии в 2002 г., выполненное В.Н. Дробышевым по данным Геофизической службы РАН, показало, что самым сейсмически активным месяцем в году был июль: за 18 сут. массив Джимарай-Хох испытал шесть сейсмических ударов [18]. 14 июля произошло самое крупное землетрясение: в эпицентре, всего в 8 км к западу от вершины, сила подземного толчка достигла 5.2 баллов. В этот же день было еще два удара, оказавших воздействие на гору силой 2–3.5 бал-

ла, а затем 22 августа – землетрясение 3.4 балла с эпицентром в 70 км от горы Джимарай-Хох. В сентябре в этом районе никаких заметных толчков не было.

Скорее всего, землетрясение 14 июля спровоцировало начало необычных обвалов в тылу ледника Колка. Это подтверждает и космический снимок Тегга ASTER от 18 июля 2002 г., где на заснеженной стене уже видны черные полосы свежих обвалов. В то же время сход самого ледника 20 сентября, как показало изучение сейсмограмм, сопровождавших этот процесс, не был вызван землетрясением [6].

По всей вероятности, сильные землетрясения, как и новые вулканогенные проявления, имеют общую причину и связаны с активизацией тектонических процессов в районе Казбека. Долина ледника Колка находится в зоне крупных разломов, где возможны смещения отдельных блоков и часты землетрясения. На это еще в 1930-е годы указывал Л.А. Варданянц, анализируя причины выбросов льда ряда казбекских ледников, в том числе и Геналдонской катастрофы 1902 г. [3]. Он считал, что постоянное поднятие Дарьяльского горста вызывает нарастание напряжения вдоль поверхностей разрывов и резкий “разряд” с сильным сотрясением, приводящим к расколам льда.

Неотектонические процессы в этом районе подтверждаются исследованиями геологов и в связи с последней катастрофой. А.Г. Гурбанов и др. [5, 7] по снимкам 2001–2002 гг. со спутника Тегга радиометром ASTER определили субширотный разлом в районе сел. Кани, по которому в 2003 г. произошло смещение каменно-ледовой массы в Кармадонской котловине, а также крупный разлом северо-восточного простирания вдоль массива Джимарай-Хох, провоцирующий обвалы на ледник. Тектоническая активность может способствовать также вертикальному теплопереносу по разломам и разрывным нарушениям, что приводит к температурным аномалиям вдоль разлома.

Ледник не был готов к пульсации. В первых публикациях после случившейся неожиданной катастрофы мы писали, что на этот раз пульсирующий ледник Колка ещё не был готов к подвигу, и отмечали множество явлений, никак не объяснимых с позиций “очередной” пульсации. В прежних случаях продвижение фронта ледника начиналось заранее, за несколько месяцев. Поверхность ледника повышалась, постепенно весь наступающий язык увеличивался в объеме, покрывался трещинами; фронт ледника ускорял продвижение и входил в узкое ущелье Колки сле-

ва от языка Майли. Катастрофа 2002 г. произошла без такой подготовки.

На фотоснимках В.Н. Дробышева в августе 2000 г. [18], С.С. Черноморца в сентябре 2001 г. [14], а также на космических снимках ASTER 18 июля 2002 г. и на снимках Landsat непосредственно перед катастрофой – от 4 и 20 сентября 2002 г. [17] признаков активизации ледника не видно, конец его плоский, не имеет трещин и скрыт под мореной.

При изучении подвижки 1970-х годов экспедицией Института географии был рассчитан необходимый постоянный прирост годового положительного баланса массы ледника Колка в 1–1.3 млн тонн для накопления критической избыточной массы, равной 40–50 млн т, при которой разгрузка неизбежна, и сделан прогноз – при постоянстве климатических условий и отсутствии аномальных внешних воздействий она должна накопиться через 60–70 лет [16]. Интервалы между прежними известными подвижками ледника составляли также около 70 лет. Со времени последней подвижки прошло только 32 года.

Начиная с 1990-х годов, специальных наблюдений за ледником не было. Измерения по аэрофотоснимкам 1972, 1981 и 1987 гг. показали, что процесс увеличения объема ледника шел примерно с той скоростью, что и в прогнозе. Это подтвердили и расчеты баланса массы ледника за последние 10 лет перед 2002 г. [11]. Ход климатических параметров за вековой период показал, что в десятилетия, предшествовавшие подвижкам 1902 и 1969 гг., масса ледника нарастала с ускорением. В противоположность этому, в период 1993–2002 гг., как было показано выше, метеорологические условия совсем не способствовали накоплению массы ледника Колка. Расчеты показали, что за десятилетие перед 2002 г. годовой приход вещества составлял в среднем 1.39 млн т; при этом в годы экстремального таяния 1998–2000 гг. шло даже не накопление, а потеря вещества. Полученная величина близка к расчетной ежегодной прибавке массы, необходимой для накопления ледником за 70 лет критической величины. Таким образом, по прошествии 30-летнего периода после разгрузки в 1969 г. для ее накопления потребовалось бы еще несколько десятилетий.

О причинах катастрофы. Сразу после Кармадонской катастрофы [8, 9 и др.] предполагалось главным ее виновником огромное количество воды, скопившейся в леднике и под ним, но отмечалось, что этого недостаточно для такой невероятной реакции ледника, и привлекалось факты вулканогенных проявлений и активизации текто-

нических процессов. В дальнейшем, при наблюдениях в верховьях Геналдона были получены доказательства очень большого участия воды в подвижке [10, 20]. Ее накопление было связано в определенной степени с климатическими причинами, но это не объясняло всей грандиозности катастрофы.

Наличие воды на ложе вообще придает большое значение при анализе причин подвижек ледников и высоких скоростей движения льда. Известны термины “водная постель”, “внутренние плотины”, “всплывание ледяной массы”. В связи с событием 2002 г. С. Huggel с соавторами [19] также рассматривал гипотезы, связанные с накоплением воды и гидравлическим эффектом, при этом источником подледного таяния предполагалось геотермическое тепло. Но по расчетам для Казбекской области оно может дать талой воды всего 1 см в год, а по сведениям для других вулканических районов с более высоким положением магматического очага – до 10 см. Авторы считали, что этого недостаточно для нарушения стабильности ледников типа ледника Колка с небольшим уклоном ложа, хотя этот эффект нельзя исключить.

Однако исследования геологов показали положительную тепловую аномалию прямо под ледником Колка, связанную с близповерхностной магматической камерой. По мере накопления геологических и геофизических данных на первом месте оказался эндогенный фактор, и катастрофа потеряла прежнюю гляциальную природу.

Камчатский гляциолог Я.Д. Муравьев предлагает гипотезу подледного газового извержения [12]. Он связывает подготовку катастрофы с перестройкой сложной гидротермальной системы под ледником, приуроченной к трещиноватой зоне глубинного разлома вдоль ущелья Колки и имеющей в качестве источника тепла неоинтрузию горы Джимарай-Хох или сам магматический очаг вулкана Казбек. При изменении гидростатического равновесия в такой системе, то есть температуры и давления на границе с гидротермальным резервуаром, в нем происходит преобразование химических элементов. Если ледяная “крышка” внезапно разрушается (например, обвалом), сброс давления и проникновение воздуха вызывают мгновенное освобождение из термальных вод растворенных под большим давлением углекислого газа и сероводорода в виде взрыва и газовой фонтанирования со скоростью до сотен м/с. Недаром после схода ледника в течение многих дней в цирке висело облако пара и газа, и спустя год после этого здесь продолжался вынос глубинных



Рис. 4. Правый склон долины р. Геналдон в средней ее части, октябрь 2002 г.

минеральных вод, состав которых резко отличался от всех природных вод этого района.

М.Г. Бергер [1] объясняет катастрофу внезапным газодинамическим выбросом самого ледника. Он отрицает участие воды не только в подготовке, но и в самом процессе катастрофы. Причиной события автор считает скопление под ледником огромного количества глубинных природных газов с аномально высоким давлением, источник которых – длительные процессы газогенерации, связанные с поствулканической деятельностью в Казбек-Джигарайском районе. По его мнению, сверхвысокое давление привело к динамическому удару и взрывоподобному выбросу ледника с гигантской зоной разлета обломков.

Поддерживая обе гипотезы о накоплении газов под ледником в результате вулканогенных проявлений, нельзя не согласиться с М.Г. Бергером в том, что начальное движение продуктов разрушения было направлено не вниз по уклону долины, а произошло метание обломков вверх и в стороны, на правый и левый борта. На самом деле, на пустом ложе ледника нет гигантской воронки выброса и никаких признаков разлета продуктов разрушения ледника, о чем говорит автор, но есть четкие следы потока воды, захлестнувшего на правый борт ледника Майли, а также направленного

схода вниз по ущелью Колки и долине Геналдона всей массы бывшего ледника. При движении она имела огромную эродирующую силу, оставив после себя долину, выпханную потоком льда, воды и камней до высоты более 100 м (рис. 4). Такой процесс не мог быть результатом вихреобразного флюидного дисперсного потока взвешенных в газовой среде продуктов разрушения ледника, достигшего Скалистого хребта, как пишет автор.

В то же время остается убеждение, что скопление больших объемов воды в леднике и под ледником сыграло огромную роль в подготовке его к дальнейшему сценарию катастрофического развития событий. Вода обеспечила отрыв ледника целиком от ложа и дальность его стремительного выброса на 16 км вниз по долине. Без этого масштаб катастрофы не был бы столь ярко выражен, что подтверждают и модельные расчеты А.Н. Божинского [2], о которых говорилось выше, и предполагаемые скорости движения ледово-каменной массы (180 и даже 320 км/ч) [6].

Однако по-прежнему в большинстве публикаций гляциологов обвал считается главной причиной катастрофы (например, [17, 19 и мн. др.]). Несостоятельны версии и тех исследователей, которые занимались расчетом силы прямого удара

всего фирново-ледяного поля о поверхность ледника. Необходимо учитывать, что правый склон цирка, который был подвержен обвалам, хотя и очень крут (в среднем 35°), но имеет резко расчлененный рельеф с множеством острых гребней, скальных ступеней и выступов. Глыбы фирново-ледовых обвалов не ударяют в ледник, а обрушиваются на этот склон, разбиваясь на множество всё более мелких обломков, и рассыпаются на поверхности ледника широким шлейфом.

Тем не менее длительные обвалы льда и горной породы в тыловой части ледника сыграли и свою роль в подготовке подвижки, перегрузив тыловую часть ледника примерно на 20 млн м³. Развитию обвалов способствовали тектонические подвижки вдоль линии разлома, землетрясения и даже аномальное таяние висячих ледников в последние годы до события. Обвалы считаются не причиной, а одним из следствий проявлений тектонических процессов, вызвавших катастрофу.

Процессы восстановления ледника Колка. В настоящее время наибольший интерес гляциологов вызывает вопрос о возможности восстановления ледника. В осенние сезоны 2006, 2009, 2010, 2011 и 2012 гг. отряды Института географии РАН обследовали долину р. Геналдон и ледниковый бассейн Колка–Майли; при этом основной

задачей были наблюдения за процессами формирования в цирке нового ледникового тела.

После катастрофического разрушения и выброса ледника из цирка вдоль правого борта в нижней части склона осталась полоса ледяного обрыва; бывшие крутопадающие притоки ледника Колка оказались “отрезанными” и лишенными своих языков. Они потеряли также и значительную часть своего питания, так как исчезла большая часть мощных наметенных карнизов и фирновых полей с висячими ледниками в верхней части склона. С начала 1970-х годов и вплоть до 2002 г. эти поля оставались практически без изменений и занимали в целом площадь около 1.3 км² [16] (см. рис. 1а).

Однако в настоящее время продолжают процессы постоянного метелевого переноса снега с юга и юго-запада, с Майлийского плато и ледника Суатиси через гребень правого борта цирка ледника Колка; в тыловой части цирка накапливается, как и прежде, лавинный снег – все это дает питание бывшим притокам ледника. Наиболее крупный из прежних притоков, потерявший надежную опору после “схода” ледника Колка, первым начал продвигаться вниз уже к осени 2003 г., что видно на рис. 4 и 1б. Вероятно, причиной его быстрой реакции было не столько поступающее питание, сколько сползание масс льда, накопленных в этой боковой мульде на склоне до подвижки.



Рис. 5. Продвижение нового ледника на днище цирка Колки, август 2006 г. (фото Д.А. Петракова).



Рис. 6. Язык нового ледника в сентябре 2009 г. На переднем плане термокарстовые воронки близ склона левой морены.

По наблюдениям в сентябре 2006 г., язык нового активно наступающего ледника выдвинулся поперек днища уже далее его середины, по направлению к левой боковой морене (рис. 5). Крутой выпуклый фронт его высотой более 20 м был разбит многочисленными трещинами; на поверхности языка – большое количество разнообломочного каменного материала, поступающего со склона.

Под тыловой стеной цирка начинал формироваться второй участок накопления льда, хотя здесь процесс имел меньший масштаб по сравнению с выдвиганием притока. Источник накопления снега и льда – огромный лавиносбор на склоне горы Джимарай-Хох. Здесь и во времена существования ледника Колка находился его узкий юго-западный исток с наиболее высокой верхней отметкой – 3850 м, на 400 м выше начала ледника в цирке. Лавины из года в год собирали снег со всей стены массива от вершины до подножия, и в верховье ледника постоянно находился многолетний мощный снежно-ледовый конус.

К середине сентября 2009 г. фронт нового выдвинувшегося ледника окончательно пересек ложе и достиг подножия левого моренного вала ледника Колка (рис. 6). Поверхность языка заметно выровнялась; значительная часть льда сместилась в его концевую часть, высота фронта дости-

жала 25–30 м при ширине около 200 м. На крутых его откосах наблюдались частые обрушения, сползания морены, вызванные летним таянием и движением льда.

Второй участок образования льда в тыловой части цирка значительно расширился, поверхность его повысилась в виде крупных бугров, засыпанных мореной и разбитых трещинами. Формирующиеся тыловые ледники уже почти сомкнулись своими краями на ложе, образовав ледовое тело с трехлопастным нижним краем неравномерной высоты и сложной конфигурации.

В средней и нижней частях бывшего ложа ледника Колка постоянно происходит и второй процесс – абляция мертвого льда под мореной. Термокарстовые процессы были заметны уже летом 2003 г., их развитию способствует сток талых вод в толще морены. Ручьи, обильно стекающие с правого склона, сразу исчезают под мореной. Наиболее крупные термокарстовые воронки образуются ближе к левому борту, вдоль линии стока вод от продвинувшегося молодого ледника. Здесь, судя по глубине провалов, толщина погребенного льда может достигать 10–15 м (см. рис. 6).

К осени 2010 г. в тыловой части цирка окончательно сформировался единый ледяной массив, левая граница его примкнула вплотную к подножию боковой морены ледника Колка. По резуль-

татам GPS-съемки, общая длина его достигла 1300 м, высота поверхности в среднем 3300 м. Передовой фронт принадлежал по-прежнему основному наступавшему в прошлые годы притоку, но за год он практически не продвинулся. Пологая часть языка полностью закрылась мореной и подверглась значительному абляционному выравниванию. Высота фронта составляла местами 30–35 м, весь язык шириной 300 м был окаймлен шлейфом осыпавшегося моренного материала. Абсолютная высота нижней точки 3170 м.

В тыловой части массива нового льда, под склоном горы Джимарай-Хох образовалась полоса фирнового поля, которое питается лавинным снегом. Ширина фирна составляет от нескольких десятков метров в правой его части до 400–500 м в левой, поверхность усыпана глыбами камней и щебнем, что подтверждает большую лавинную активность в этой части цирка Колки.

В сентябре 2011 г. поверхность тыловой части ледникового тела повысилась в целом на 10–15 м. В средней части левый его край расширился на несколько десятков метров и поднялся, продвинувшись на 25–30 м на подножие моренного вала. Нижняя фронтальная часть всего нового ледника осталась по-прежнему почти стабильной.

Таким образом, продвижение границ возрождающегося ледника в цирке за 10 лет после катастрофы происходило неравномерно. В первые четыре года доминировало выдвигание прежнего

правого притока ледника, затем оно сменилось накоплением льда под лавиносором на склоне массива Джимарай-Хох, за последние два года ледник почти не расширил свою площадь, продолжая увеличиваться в объеме в средней и верхней своих частях (рис. 7).

По космическим снимкам ASTER от 20 сентября 2011 г. с геометрическим разрешением 15 м было проведено дешифрирование границ формирующегося ледника и их векторизация с помощью программы GLIMSVIEW. Положение границ в 2006, 2009 и 2010 гг. восстановлено по данным наземных GPS-съемок и цифровых фотосъемок (рис. 8). Площадь ледника соответственно составила: в 2006 г. 0.17 км², в 2009 г. 0.4 км², в 2010 г. 0.57 км² и в 2011 г. 0.6 км². По всем измерениям толщину нового льда можно предварительно оценить в краевых частях 10–20 м, в центре ближе к тылу цирка до 50 м. При этом объем льда составляет не менее 14–15 млн м³, или порядка 11% прежнего объема ледника Колка, измеренного в 1988 г. [13]. По наблюдениям в 2012 г. границы нового ледника практически не изменились.

Дальнейшее развитие процессов восстановления ледника зависит от целого ряда факторов. Освобождение цирка от ледника 20 сентября 2002 г. вызвало резкое изменение температурных условий таяния. Исчезло охлаждающее влияние ледников, располагавшихся на дне и склонах цирка, открылась огромная пустая чаша, покрытая темным обломочным материалом. Общее сниже-



Рис. 7. Ледниковое тело под слоем морены в сентябре 2012 г.

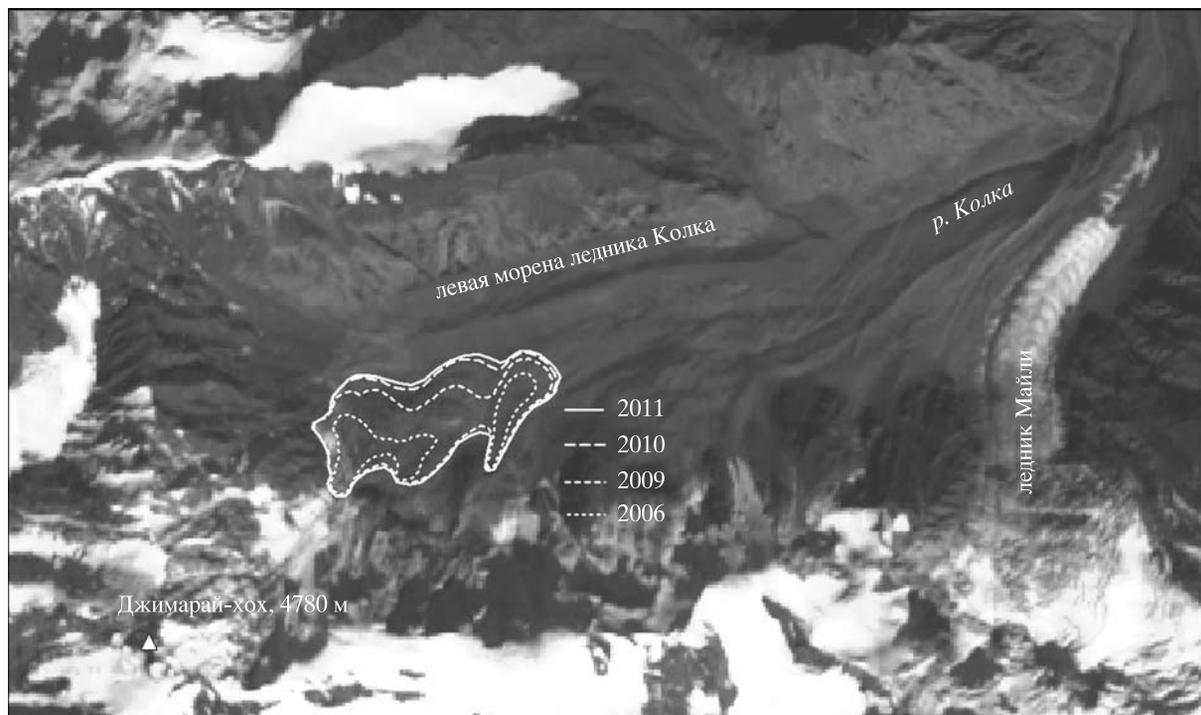


Рис. 8. Космический снимок ASTER от 20 сентября 2011 г.: изменение границ нового ледника в цирке Колки за годы наблюдений. * Примечание. В 2012 г. границы нового ледника практически не изменились.

ние высотного уровня поверхности до прежнего ложа ледника Колка, нагрев открытого пространства морены и скал, значительное уменьшение суммарного альбедо и, следовательно, общее изменение теплового баланса в цирке ледника Колка способствуют усилению таяния снега и льда на бывшем ложе.

В сентябре 2009 г. ниже фронта нового ледника (на высоте 3100 м) и на левой боковой морене (3135 м) установлены термометрические автоматические датчики. Они помещались на горизонтальных открытых участках среди камней и были защищены от прямой солнечной радиации. Срочные измерения температуры продолжались в течение года.

Наиболее холодный период с минимальными значениями средней суточной температуры до $-13.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на днище наблюдался с конца ноября до середины декабря (рис. 9). Средняя годовая температура составила $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя летняя $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем суточные значения неоднократно повышались до $20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Длительность теплого периода в 2010 г. составила не менее 113 дней. Но при этом надо учитывать рекордно высокие температуры воздуха именно летом 2010 г. на всей европейской части России, так же как и в высокогорье Кавказа.

Измерения на поверхности левой боковой морены на высоте 3135 м показали положительную среднюю годовую температуру. Период устойчивых средних суточных температур здесь начался на месяц раньше, чем на ложе. Днище цирка выхолаживается зимой значительно больше, это задерживает процесс таяния мертвых льдов. С другой стороны, таянию нового ледника препятствует неизбежное активное нарастание моренного чехла на его поверхности, так как с оголившейся стены правого борта после 2002 г. поступает значительно больше материала горной породы, чем прежде.

В целом языки ледников могут разрастаться лишь до тех пор, пока не будет достигнуто балансовое равновесие. Как видно, наступавший первым боковой ледник в средней части цирка, достигнув к осени 2010 г. левого края цирка, стабилизировался. Вероятно, он уже приблизился к своему современному равновесию. Однако в тылу цирка пока продолжается накопление масс льда, увеличивается их толщина, что в дальнейшем может снова привести к продвижению фронта ледника.

В конце июня на днище цирка стаивает весь зимний снег, не остаются даже крупные снежники. Таким образом, не следует ожидать здесь пополнения массы ледника. Это закономерно,

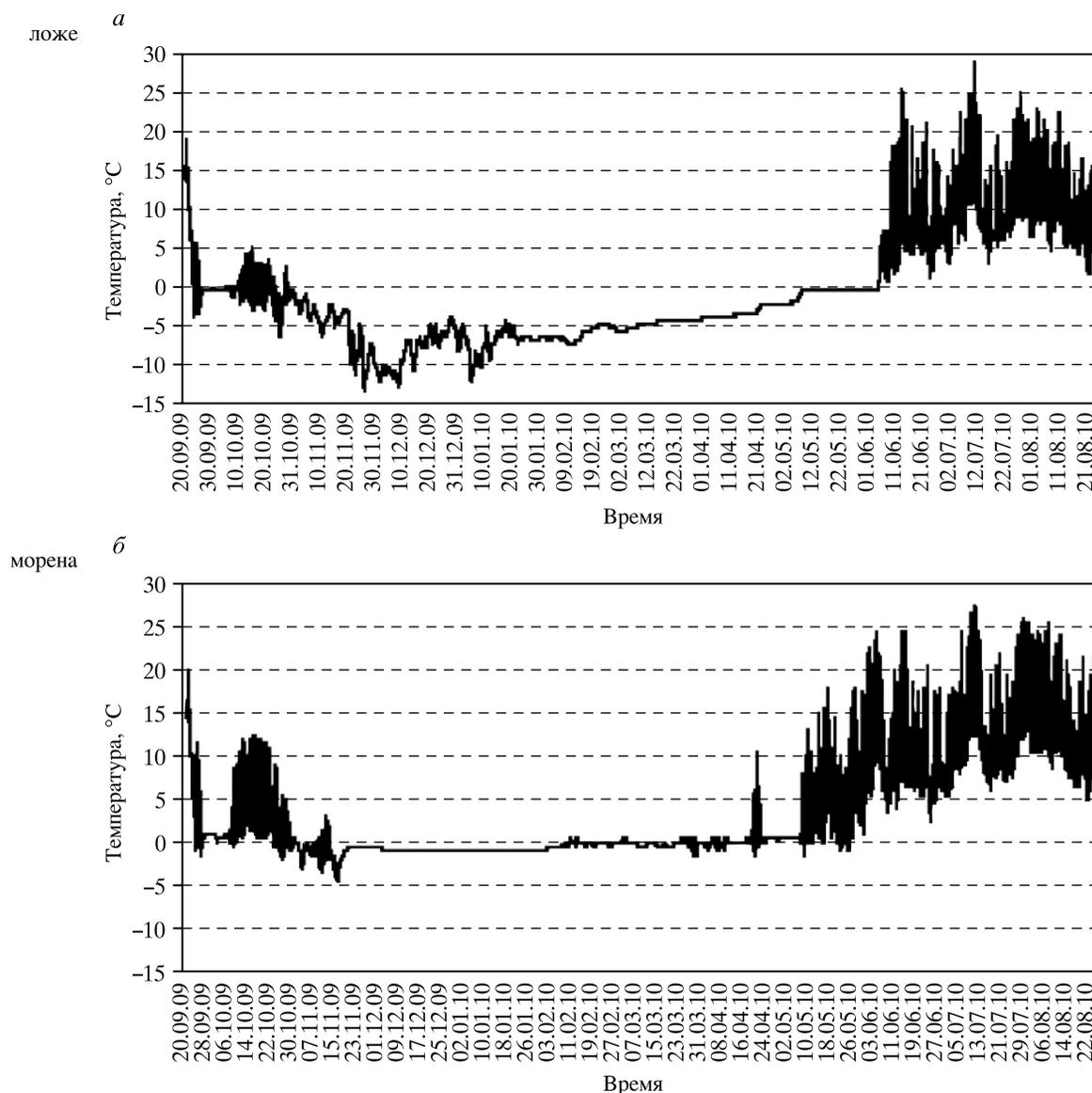


Рис. 9. Ход средних суточных температур воздуха по измерениям в 2009/2010 гг.: *а* – на днище цирка, 3100 м; *б* – на морене, 3135 м.

поскольку и в годы существования ледника Колка твердые осадки, выпадающие непосредственно на его поверхность, давали ничтожный вклад в аккумуляцию – около 15% [16]. Ледник питался за счет метелевого переноса, лавин и обвалов фирна и льда. Пока заметных изменений в количестве льда, занимающего “верхние этажи” цирка, не обнаружено, хотя образовались новые снежные карнизы. Но подобные процессы будут продолжаться и в дальнейшем, что приведет к восстановлению висячих ледников и активности обвалов и лавин. Это внушает оптимизм в отношении разрастания ледника в цирке, тем более в связи с тенденцией увеличения зимних осадков в высокогорье Центрального Кавказа в последнее десятилетие.

По данным наблюдениям, в разные годы после катастрофы обвалов льда со стены Джимарай-Хох или с правого гребня не было, но падение камней, иногда интенсивное, наблюдалось всегда. Важно отметить, что частые камнепады, а также локальные участки таяния с черными полосами потоков воды и мелкозема на заснеженных стенах горы Джимарай-Хох и под ледовыми обрывами правого гребня, наблюдаются постоянно вот уже в течение 10 лет именно на тех же местах, что и в сентябре 2002 г. (см. рис. 1б, 3, 7). Очевидно, вулканогенные процессы в этой зоне Казбекского массива, в значительной степени ответственные за Кармадонскую катастрофу, не прекратились и продолжают до сих пор.

Заключение. Кармадонская катастрофа – уникальное событие, не сравнимое с известными ранее подвижками и обвалами ледников. Анализ приведенных материалов позволяет сделать несколько основных выводов.

1. Катастрофа не была очередной закономерной подвижкой ледника Колка. Преждевременный срыв ледника и колоссальный масштаб катастрофы были определены рядом экстремальных факторов, в этом ее отличие от прежних гляциальных подвижек пульсирующего ледника. Подготовка катастрофы, длившаяся, вероятно, годы, ускорилась в последние два месяца и произошла за считанные минуты.

2. Активизация эндогенных процессов в районе Казбек-Джидарайского массива – “омоложение” тектонических разломов и развитие вулканогенных процессов – выразилась в локальных землетрясениях, разрушении стены правого борта Колки, длительных обвалах льда и горной породы и, главное, накоплении напряжений, повышении температур и давления газов в недрах под ледником, что и привело к ледниковой катастрофе небывалого масштаба.

3. Скопление огромных объемов воды под ледником и в леднике сыграло решающую роль в отрыве всей массы ледника целиком от ложа и ее выбросе вниз по долине на 16 км. Обилие воды в бассейне ледника обусловлено не столько климатическими причинами, но и вулканогенными процессами: усилением донного таяния, вызванного притоком геотермического тепла от близко расположенной магматической камеры, перестройкой сложной гидротермальной системы под ледником и, возможно, дополнительным извержением глубинных вод во время катастрофы.

4. В цирке ледника Колка за 10 лет после катастрофы сформировался новый массив льда, к 2012 г. его площадь составила 0.6 км². В настоящее время продолжается накопление льда в тыловой и средней частях нового ледника, но фронтальная его часть пока стабилизировалась.

5. Прогнозировать возрождение ледника Колка в его прежних размерах еще рано. Здесь много вопросов, ответы на которые даст только время. Трудно оценить как объем будущей аккумуляции снега от всех прежних источников питания ледника, так и величину таяния новых языков, покрывающихся моренным чехлом. Пространственное распределение температур в цирке, очевидно, тоже изменится. В целом процессы восстановления ледникового бассейна Колка вместе с висячими ледниками будут продолжаться десятки лет. При этом очевидна необходимость регулярного как наземного, так и дистанционного мониторинга этого слишком нестабильного и, как выяснилось, непредсказуемого природного объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бергер М.Г. Ледник Колка. Катастрофа 20 сентября 2002 года – внезапный газодинамический выброс ледника. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 246 с.
2. Божинский А.Н. Математическое моделирование крупномасштабных селевых и ледниковых катастроф // МГИ. 2005. Вып. 99. С. 13–17.
3. Варданянц Л.А. Геотектоника и геосейсмика Дарьяла как основная причина катастрофических обвалов Девдоракского и Геналдонского ледников Казбекского массива // Изв. ГГО. 1932. Т. 64. Вып. 1. С. 51–59.
4. Гурбанов А.Г., Богатиков О.А. Вулканоопасность Эльбрусского и Казбекского вулканических центров // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. IV науч.-практич. конф. М., 2004. С. 47–49.
5. Гурбанов А.Г., Кусраев А.Г., Чельдиев А.Х. Первые результаты исследования эндогенных процессов в Геналдонском и прилегающих ущельях // Вестн. Владикавк. науч. центра. 2004. Т. 4. Вып. 3. С. 2–8.
6. Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Харебов А.К. Анализ инструментальных записей схода ледника Колка по данным локальной сети сейсмических наблюдений // Вестн. Владикавк. науч. центра. 2004. Т. 4. Вып. 3. С. 58–64.
7. Корниенко С.Г., Ляшенко О.В., Гурбанов А.Г. Выявление признаков очагового магматизма в пределах Казбекского вулканического центра по данным тепловой космической съемки // Вестн. Владикавк. науч. центра. 2004. Т. 4. Вып. 3. С. 25–32.
8. Котляков В.М., Рототаева О.В. Ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Природа. 2003. № 8. С. 15–23.
9. Котляков В.М., Рототаева О.В., Десинов Л.В., Зотиков И.А., Осокин Н.И. Катастрофические последствия грандиозной подвижки ледника Колка на Северном Кавказе // Изв. РАН. Сер. геогр. 2003. № 1. С. 45–54.
10. Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Лебедева И.М. Ледник Колка и Кармадонская катастрофа 2002 г. // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. С. 224–240.
11. Лебедева И.М., Рототаева О.В. Климатический фактор подвижки ледника Колка на Кавказе в 2002 г. // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 155–161.
12. Муравьев Я.Д. Газовое извержение в цирке – возможная причина развития подвижек ледника Колка по катастрофическому сценарию // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 44–55.
13. Никитин С.А., Веснин А.В., Осипов А.В. Результаты радиолокационного зондирования пульсирующих ледников Кавказа и Памира // МГИ. 2005. Вып. 99. С. 151–153.

14. 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.
15. Пхалагова Д. М. Химическая география вод и гидрогеохимия Центрального Кавказа. Орджоникидзе: ИР, 1976. 359 с.
16. Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Исследование пульсирующего ледника Колка. М.: Наука, 1983. 169 с.
17. 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.
18. Drobyshev V. N. Glacial catastrophe of 20 September 2002 in North Osetia // Russ. J. Earth. Sciences. 2006. V. 8. ES4004, doi:10.2205/2006ES000207.
19. Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haerberli W., Käab A. 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 // Natur. Hazar. Earth Sys. Sci. 2005. V. 5. P. 173–187.
20. 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. Develop. 2004. V. 24. P. 78–83.

Ten years after the Karmadon catastrophe, North Ossetia: on the causes of event and the glacier recovery processes

V.M. Kotlyakov, O.V. Rototaeva, G.A. Nosenko, R.A. Chernov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences

On the base of various studies and calculations obtained over the last ten years after the enormous Karmadon disaster, we demonstrate that the event did not have a “pure glacial” nature as was previously expected. Its primary cause was the activation of tectonic and volcanic processes in the Kazbek massif. Rising temperature and gas pressure in the interior under the Kolka Glacier induced accumulation of ultimate stresses, and their relaxation led to glacier outburst from its bed and origin of the giant ice-water-rock flow.