

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ
HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE:
FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS

УДК 551.2+551.23+551.24:551.3+551.324

DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.8

**К ВОПРОСУ О ФАКТОРАХ СХОДА
ЛЕДНИКА КОЛКА
В 2002 ГОДУ**

**ON THE ISSUE OF THE FACTORS OF
THE COLLAPSE OF THE KOLKA
GLACIER IN 2002**

А. Ф. Барановский, Э.В. Запорожченко

Alexsandr F. Baranovsky,
Eduard V. Zaporozhchenko

Селевая ассоциация, г. Пятигорск, Россия
baranovskiy24@mail.ru
ednad17@mail.ru

Debris Flow Association, Pyatigorsk, Russia
baranovskiy24@mail.ru
ednad17@mail.ru

Аннотация. Выполнен анализ факторов, которые могли оказать влияние на катастрофическое развитие событий при сходе ледника Колка 20 сентября 2002 г. Основываясь на материалах многочисленных публикаций и приведенных в статье новых данных, авторы предлагают свою оценку и интерпретацию некоторых особенностей эндогенных и экзогенных процессов, происходивших в ущелье Колка. Выделены гравитационно-тектонические блоки в скальном массиве на правобережном склоне ледникового цирка Колка, к которым приурочены крупные обвалы льда и горных пород, наблюдавшиеся в 2002 г. Приведены доказательства эндогенной активности в долине р. Колка. Прослежены две системы разрывных нарушений, к пересечению которых приурочен участок проявления газовых извержений в днище ледникового цирка Колка. Установлено, что причиной формирования катастрофической ледово-каменной лавины в 2002 г. являются эндогенные факторы, а именно, взрыв газов и пара в тыловой части ледника Колка.

Ключевые слова: Геналдонская катастрофа; ледник Колка; ледово-каменная лавина; эндогенные и экзогенные процессы;

Abstract. The analysis of factors that could have influenced the catastrophic development of events during the descent of the Kolka glacier on September 20, 2002 was carried out. Based on numerous publications and the new data presented in the article, the authors offer their assessment and interpretation of some features of endogenous and exogenous processes occurring in the Kolka Gorge. Gravitational-tectonic blocks in the rock massif on the right-bank slope of the Kolka glacier cirque have been identified, which are associated with large collapses of ice and rocks observed in 2002. The evidence of endogenous activity in the Kolka River valley is presented. Two systems of discontinuous faults have been traced, the intersection of which is associated with the site of the manifestation of gas eruptions in the bottom of the Kolka glacier cirque. It has been established that the cause of the formation of a catastrophic ice-stone avalanche in 2002 is endogenous factors, namely, the explosion of gases and steam in the rear part of the Kolka glacier.

Keywords: Genaldon catastrophe; Kolka glacier; ice-stone avalanche; endogenous and exogenous processes; ice and rock collapses; gravitational-

Baranovsky A.F., Zaporozhchenko E.V. On the issue of the factors of the collapse of the Kolka glacier in 2002. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 1, pp. 8–33. (In Russian; abstract in English).

гравитационно-тектонические блоки; активные тектонические зоны; газовые извержения.

Введение

Анализ обширной информации о леднике Колка и Геналдонской катастрофе 2002 г., а также представленные в статье новые данные, позволяют предложить свою точку зрения на некоторые аспекты формирования ледово-каменных лавин в бассейне р. Колка, которая является одним из истоков р. Геналдон и расположена в нивальной зоне Большого Кавказа (Республика Северная Осетия-Алания, рисунок 1).

[Котляков и др., 2014] сообщают о четырех известных случаях схода ледника Колка с выходом ледяных масс за пределы ущелья Колка: 1834–35, 1902, 1969–70 и 2002 гг.

При этом, в 1834–35 и 1969–70 гг. разгрузка ледника носила спокойный характер [Черноморец, Адцеев, 2014; Котляков и др., 2014]; в 1902 г. наблюдался смешанный тип движения, который сочетал в себе, как медленные подвижки льда, так и два катастрофических выброса; и, наконец, в сентябре 2002 г. произошел единовременный катастрофический выброс ледника Колка.

[Заалишвили, Невская, Харебов, 2014] по сейсмическим записям оценили скорости движения образовавшейся ледово-каменной массы в ущелье Колка в 2002 г. «Ледник Колка, достигший критической массы, под воздействием очередного обвала <...>, был буквально сдвинут со своего ложа. Далее ледник двинулся (заскользил) под воздействием гравитационной силы вниз по не особенно крутой поверхности со скоростью 70 км/ч. После удара о горные породы, сделав поворот у ледника Майли <...>, ледово-каменная масса понеслась вниз со средней скоростью 360 км/ч на водной (может быть, воздушно-водной) подушке». Далее по р. Геналдон прошёл, как известно, также высокоскоростной поток селевого сложнокомпонентного характера (вода, лёд, мелкозём, обломки и глыбы скальных пород) с катастрофическими последствиями –

tectonic blocks; active tectonic zones; gas eruptions.

человеческими жертвами и инфраструктурными разрушениями в долинах рек Геналдон и Гизельдон.

Высокая скорость движения ледово-каменной массы стала предметом многочисленных дискуссий и гипотез. Большинство исследователей считают, что для развития такого рода события необходимо мощное внешнее воздействие на ледник.

Результаты

Основными факторами, которые могли в той или иной степени стать причинами Геналдонской катастрофы 2002 г. или повлиять на ее ход, являются климатический, эндогенный (сейсмический, тектонический, вулканогенный) и экзогенный (гравитационный, гляциальный).

Климатический фактор

Наиболее детально климатические условия рассмотрены в работе [Лебедева, Рототаева, 2005], основные выводы из которой приводятся ниже.

«Климатический фактор, а именно аномальное потепление климата в последнее десятилетие, вызванное появлением нового циркуляционного процесса – устойчивым выходом южных циклонов в Кавказский регион, играл значительную роль в преждевременной подвижке ледника Колка, так же, как и других известных природных катастроф на Кавказе – Герхожанском селе 2000 года, неожиданных наводнениях с разрушениями и жертвами в 2002 г., и т.д.».

«<...> баланс массы ледника имел очень небольшие положительные значения или даже был отрицательным. Но если критическая масса ледника не могла накопиться таким путем, то не исключено, что большую роль здесь сыграл другой процесс – необычный объем обрушений льда и горной породы в тыловой части ледника».

«В Казбек–Джимарайском районе <...> с середины 90-х годов происходило устойчивое повышение, как летних температур, так и годовой

суммы осадков. Впервые за 100 лет температура лета превышала норму 7 лет подряд, вплоть до геналдонской катастрофы осенью 2002 г. Одновременно увеличивалось количество атмосферных осадков».

«<...> за последние десятилетия обычно отрицательные средние летние температуры здесь, на высоте 4000 м сменились на положительные, доля жидких осадков увеличилась с нескольких процентов до 10–15% <...>. Таяние и сток усилились в 2–3 раза по сравнению с 1994 г., когда метеоусловия были близки к средней многолетней величине. Часть фирнового плато включилась в стокообразование.

Отсюда следует, что в связи с усиленным таянием в течение почти десяти лет подряд прочность фирновых толщ ослабевала. <...> По-видимому, значительное усиление таяния способствовало интенсивным обвалам фирна, льда и горной породы <...>».

«Примечательно, что в год подвижки количество воды, образовавшейся в бассейне ледника Колка, было на 62% больше среднего значения. <...> Доля жидких осадков на высоте 3400 м достигла 40% годового количества общих атмосферных осадков, которые были самыми большими за более, чем 100 предшествующих лет».

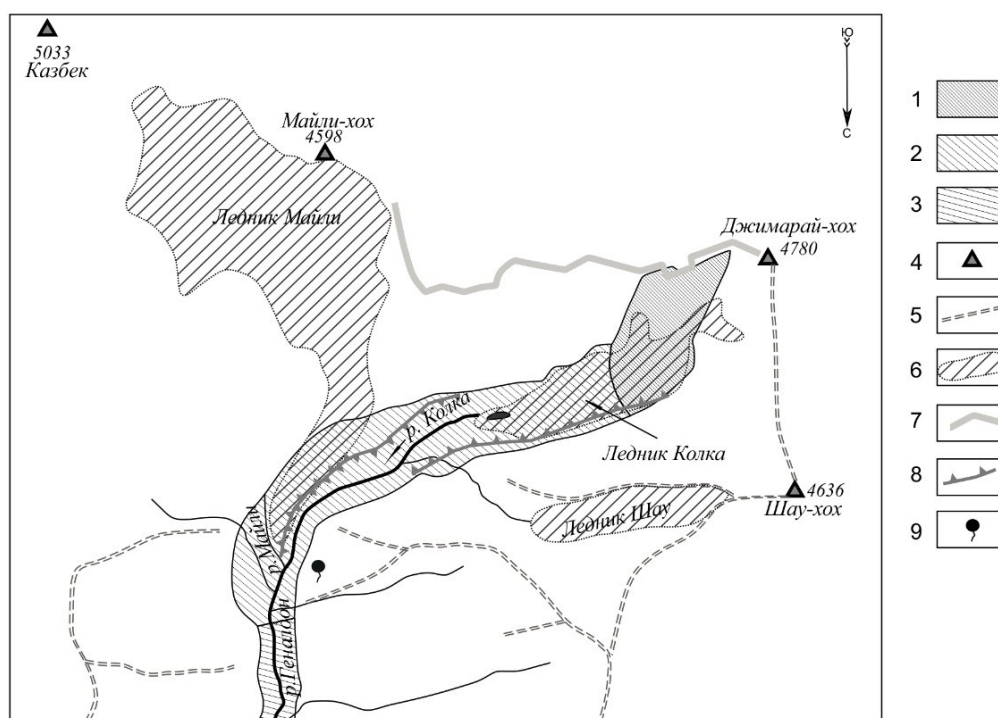


Рисунок 1. Обзорная схема бассейна р. Колка:

- 1 – зона фирново-каменно-ледовых обвалов; 2 – зона начального движения ледово-каменной массы; 3 – зона транзита ледово-каменного селя по р. Геналдон; 4 – горные вершины; 5 – горные хребты; 6 – ледники (в границах 2001 г.); 7 – участок висячих ледников; 8 – береговые морены ледников Колка и Майли; 9 – Верхне-Кармадонские минеральные источники.

(Схема составлена по материалам [Поповнин и др., 2003]).

Figure 1. Overview scheme of the Kolka River basin:

- 1 – zone of firn-stone-ice collapses; 2 – zone of initial movement of ice-stone mass; 3 – zone of transit of ice-rock mudflow along the Genaldon River; 4 – mountain peaks; 5 – mountain ranges; 6 – glaciers (within the boundaries of 2001); 7 – section of hanging glaciers; 8 – coastal moraines of the Kolka and Maili glaciers; 9 – Upper Karmadon mineral springs.

(The scheme is based on the materials [Popovnin et al., 2003]).

По мнению [Осокин, 2014], климатические условия способствовали накоплению воды в

бассейне ледника, повышению температуры льда и грунта и понижению их устойчивости.

Добавим, что начало всех известных случаев схода ледника Колка приурочено к жарким летним месяцам либо сменяющему их сентябрю: в 1834/35 гг. – к августу [Черноморец, Адцеев, 2014, с. 341;], в 1902 г. – к июлю, в 1969/70 гг. и 2002 г. – к сентябрю. Кроме того, погодные условия в 1902, и 2002 гг., когда случались катастрофические выбросы лавин из ущелья Колка, характеризовались небывало большим количеством атмосферных осадков и аномально высокими температурами воздуха.

Как отмечают [Болов, Мочалов, Муратов, 2014а], в 1969 г. обвалы льда произошли уже после перехода средней суточной температуры воздуха через 0°C в сторону отрицательных значений в ледниковом бассейне. Это явилось основной причиной небольших скоростей вовлеченного в движение ледника и относительно ограниченной дальности выброса.

В отношении 1902 г. [Штебер, 1904] утверждает, что причиной обвалов стало не чрезмерное накопление льдов, а сильное таяние. В то же время инженер Попов в докладе от 23.10.1902 г. делает вывод, что катастрофические события 3 и 6 июля 1902 г. произошли «единственно по причине исключительно обильного в течение июня месяца выпадения снега» [Черноморец, Адцеев, 2014].

Сейсмический фактор

Данные о сейсмичности за 2002 г. приводятся в материалах [Поповнин и др., 2003; Котляков и др., 2014; Осокин, 2014; Заалишвили, Невская, Харебов, 2014].

По [Котляков и др., 2014], «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 этом году был июль: за 18 суток массив Джимарай-Хох испытал шесть сейсмических ударов. 14 июля произошло самое большое землетрясение: в эпицентре, который находился всего в 8 км к западу от вершины, сила подземного толчка достигала 5,2 баллов. В этот же день было еще два удара, оказавших воздействие на гору силой 2–3,5 балла. <...> По мнению В.Н. Дробышева, влияние землетрясений такой интенсивности на висячие фирновые поля над ледником Колка может вызвать их

значительные механические повреждения, снизить устойчивость блоков горных пород на горе Джимарай-Хох на 9%. <...> В то же время выброс самого ледника, как показало изучение сейсмограмм, сопровождающих этот процесс, не был вызван землетрясением в данном районе».

«В 20 час. 08 мин. 30 сек. <...> включились сразу все окружающие станции, что <...> (Заалишвили и др., 2004, 2014) связали с предшествующим сходу ледника событием <...>».

По [Осокин, 2014] «Предварительный анализ записей окружающих сейсмостанций показал, что удаленные и местные землетрясения могли вызывать многочисленные обвалы вплоть до 20 сентября 2002 г. Но изучение сейсмограмм самого схода ледника показало, что этот процесс был вызван не землетрясением (Заалишвили и др., 2004, 2005). При этом на графиках, отражающих моменты наибольшего выделения энергии, начальный импульс включения станций почти не выражен, в отличие от следующего, который интерпретируется как удар ледника в правый борт на повороте долины ниже языка Майли. Но максимальный пик энергии с серией последующих волн совпадает с ударом ледовой массы о стену Скалистого хребта».

По [Поповнин и др., 2003] «Расшифровка сейсмограмм от 20 сентября свидетельствует о том, что фокус начального сигнала, зарегистрированного в 20 ч 08 мин, располагался вблизи дневной поверхности. Тогда логично заключить, что толчок в 20 ч 08 мин был не причиной обвала льда, а его следствием, возможно, результатом удара низвергнутого ледяного массива о долинную часть ледника Колка и левобережную морену. Это является аргументом в пользу гипотезы о единовременном обрушении значительного по объему ледяного тела».

Вместе с тем, [Заалишвили, Невская, Харебов, 2014] считают, что «очередное событие за 12 минут до начала процесса схода (взрыв/землетрясение) было зарегистрировано двумя станциями Геофизического центра экспериментальной диагностики (ГФЦЭД) и одной АО «Институт Гидропроект» и, очевидно, могло раскачать тело висячего ледника. Произошел обвал висячего ледника. Ледник Колка, достигший критической массы, под

воздействием очередного обвала (именно он обусловил включение сейсмических станций локальной сети ГФЦЭД, но не был записан), был буквально сдвинут со своего ложа за несколько секунд до метки 1», соответствующей началу отсчета времени движения каменно-ледовой массы».

Здесь также уместно упомянуть авторитетное мнение этих же авторов [Заалишвили, Невская, Харебов, 2014] о работе сеймостанций. «Особо необходимо отметить неудовлетворительно организованную службу времени на всех станциях локальной сети на период схода ледника. Это значительно усложнило обработку данных и повысило величину погрешности. Кроме того, сеть характеризовалась на период схода ледника неудовлетворительной подборкой параметров срабатывания триггеров, нередко приводящей к отсутствию на записях землетрясений первых вступлений и т.д.».

Приведенные данные говорят о возможном влиянии сейсмических событий на активизацию обвального процесса, но не дают однозначного ответа, был ли сейсмический фактор триггером крупных обвалов на ледник Колка.

Тектонический фактор

Многие авторы считают, что неотектонические движения являлись составной частью суммы факторов, инициировавших сход ледника Колка в 2002 г.

В частности, [Котляков и др., 2014] отмечают: «Развитию обвалов способствовали новые тектонические подвижки вдоль линий омоложенных разломов в теле вулканического массива, а также землетрясения», «Ледник Колка находится на пересечении двух разломов – крупного субширотного, на котором расположена долина Колки, и субмеридионального, проходящего в тыловой части ледника».

На фотографии И.М. Васькова [Васьков, 2016], снятой в августе 2003 года при максимальном освобождении северного склона ледникового цирка от снега и льда, в пределах пачки сильно трещиноватых вулканогенно-осадочных пород, отчетливо фиксируется система крутопадающих трещин отседания,

ориентированных вдоль правобережного гребня долины Колка (рисунок 2). Угол падения трещин, судя по рисунку 2, составляет около 60-70°. По этим трещинам происходит отделение от коренного массива крупных плитообразных блоков протяженностью до нескольких сотен метров, образование которых должно быть связано как с гравитационным отседанием склона, так и с тектоникой. Плоскости таких же трещин в виде крутых скальных уступов прослеживаются и далее на восток на северном склоне долины Колка.

Наблюдавшаяся в 2001 г. и особенно в 2002 г. высокая активность обвалов свидетельствует о быстрой деградации и разрушении гравитационно-тектонических блоков пород, что в свою очередь могло стать одной из основных причин падения висячих ледников, начавшегося за 2 месяца до катастрофы. Именно к такому блоку, в его западной части, приурочен участок развития наиболее масштабного многофазного обвала горных пород и льда, расположенный над тыловой частью ледника Колка.

В зоне интенсивных обвалов также выделяются и другие системы крутопадающих трещин, которые являются секущими по отношению к трещинам отседания и, вероятно, связаны с тектоникой. Плоскость одной из таких трещин ограничивает с запада участок интенсивных обвалов и заложена вдоль контакта между сильно трещиноватыми породами вулканогенно-осадочной толщи, развитыми на северном склоне ледникового цирка, и массивными породами, слагающими северо-восточный склон Джимарай-хоха (рисунок 2). На геологической карте листа К-38-IX масштаба 1:200 000 (ПГО «Севкавгеология», А.Н. Губкин, В.А. Ермаков, 1984г.) на правобережье ущелья, в тыловой части ледника Колка фрагментарно показаны выходы вулканогенно-осадочных пород нижней подсвиты кистинской свиты нижней юры (J₁ks). На левом борту ущелья Колка, в верховьях долины, обнажаются породы карбонатной толщи гизельдонской свиты нижней-верхней перми (известняки, мраморы) (P₁-2gz).

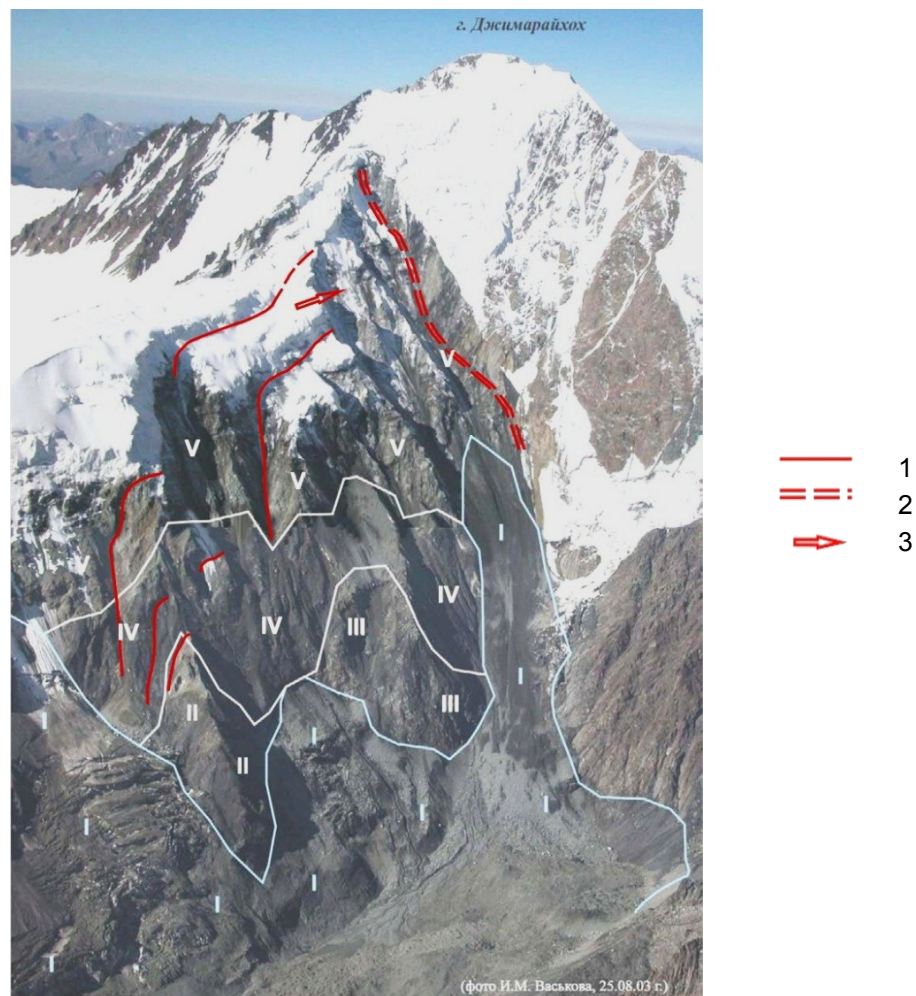


Рисунок 2. Зона обвала с восточного гребня горы Джимарай-хох в августе 2003 г.:

1 – трещины оседания, 2 – линия контакта, ограничивающего с запада толщу сильно трещиноватых вулканогенно-осадочных пород, 3 – участок формирования многофазного обвала в 2002 г. В основании склона лежат ледники, закрытые с поверхности чехлом обломочного материала (I), лавы и силлы долеритов (II), прорванные штоками гранодиринов (III), которые перекрываются пачкой графитизированных сланцев (IV), выше залегают вулканогенно-осадочные породы (V), которые венчаются ледово-фирновыми полями (По данным [Васьков, 2016]. Фото И.М. Васькова, 25.08.2003).

Figure 2. The collapse zone from the eastern ridge of Jimarai-khoh in August 2003:

1 – settlement cracks, 2 – the contact line limiting the thickness of highly fissured volcano-sedimentary rocks to the west, 3 - the area of the formation of a multiphase landslide in 2002.

At the base of the slope are glaciers closed from the surface by a cover of detrital material (I), lava and sills of dolerites (II), broken by granodyrite rods (III), which are overlapped by a pack of graphitized shales (IV), volcanogenic sedimentary rocks (V) lie above, which are crowned by ice-firn fields (According to [Vaskov, 2016]. Photo by I.M. Vaskov, August 25, 2003).

Развитие в пределах площади обвалов тектонически нарушенных пород подтверждается в работе [Лохов, Полквой, 2010].

По данным [Гурбанов, 2014] одним из критериев оценки современного состояния Казбекского вулканического центра является «<...> интенсивное таяние ледников и снежников

только в пределах контуров, выявленных дистанционными методами устойчивых положительных тепловых аномалий «<...>». В связи с этим отметим, что тепловые потоки, как правило, приурочены к разрывным тектоническим нарушениям с повышенной проницаемостью (трещиноватостью) горных

пород, что характерно для участка активизации обвалов на правобережном склоне ледникового цирка Колка.

Наличие тектонических и гравитационно-тектонических трещин, интенсивное разрушение блоков отседания с резкой активизацией обвальных процессов свидетельствуют о возможном проявлении неотектонических движений, с которыми связана и сейсмическая активность в районе Джимарай-хоха. Вполне вероятно, что максимальное развитие обвалов приурочено к участку пересечения оперяющих трещин субширотного разлома, проходящего вдоль долины Колка, с поперечной меридиональной тектонической зоной. Во всяком случае, формирование гравитационно-тектонических блоков, а также быстрое их разрушение в 2001–2002 гг. на относительно небольшом интервале невозможно объяснить только физическим выветриванием горных пород и оттаиванием многолетнемерзлых пород в криогенной зоне.

Вулканогенный фактор

Версия о том, что сход ледника Колка в 2002 г. связан с активностью магматического очага Казбекского вулканического центра и постмагматическими процессами имеет немало сторонников, среди которых в первую очередь следует назвать М.Г. Бергера, В.М. Котлякова, Я.Д. Муравьева.

По [Муравьев, 2014] «<...> выходы углекислых вод вокруг подножья горы являются косвенным доказательством деятельности магматического очага Казбекского вулканического массива».

«<...> предполагается, что на тыльном участке Колкинского цирка, который «сидит» на трещиноватой зоне глубинного разлома широтного простирания благодаря огромной глубине эрозионного вреза, по-видимому, зона трещиноватости вскрыла кровлю гидротермальной системы, имеющей в качестве источника тепла одну из неинтрузий г. Джимарай-хох или магматическую камеру (очаг) вулкана Казбек».

[Гурбанов, 2014], рассматривая критерии оценки современного состояния Казбекского вулканического центра, указывает на «наличие современных приповерхностных магматических камер и питающего их глубинного очага с расплавом, выявленных дистанционными и геофизическими методами исследований».

Основным аргументом, высказанным многими авторами в обоснование проявления постмагматических процессов в ущелье Колка в 2002 г., является формирование газопылевого или парогазового облака, которое наблюдалось в ледниковом цирке после схода ледника.

В пользу этой версии могут свидетельствовать расположенные всего в 5 км ниже тыловой части ледника Колка Верхне-Кармадонские геотермальные минеральные источники с температурой на выходе на дневную поверхность до 55⁰С [Котляков и др., 2014].

Как отмечает Р.А. Тавасиев, на всех фотографиях, в том числе и на снимке, сделанном в начале сентября 2002 г., видны клубящиеся облака, возникающие при обвалах с висячих ледников. Там же говорится и о грязевых подтеках, которые видны на всех аэрофотографиях сентября 2002 г. [Тавасиев, 2014]. Аналогичные сведения приводят В.М. Котляков и соавторы [Котляков и др., 2014]. Об устойчивых султанах фумарол, плотном парогазовом облаке, стелившемся над ложем ушедшего ледника и стекавшем вниз по долине, как и о следах талых вод из-под висячих ледников, пишет и Я.Д. Муравьев [Муравьев, 2014].

На видеоматериалах, снятых на следующий день после катастрофы, утром 21 сентября 2002 г. (Дробышев В.Н.)¹, в верховьях долины Колка видны два облака.

Одно облако невысокой плотности просматривается над зоной транзита обвалов и, как считает [Тавасиев, 2014], вероятно, связано с обвалами, формирующимися в верхней части правобережного склона ледникового цирка Колка. При этом, непосредственно в зоне зарождения обвалов облака отсутствуют.

Второе плотное белое облако, о котором упоминает [Муравьев, 2014], узкой длинной

¹ Гляциальная катастрофа в Северной Осетии 20 сентября 2002 г. / Видеофильм. Владикавказ: «Севосэко», 2003.

полосой протягивается практически на одной и той же высоте над ложем ледника Колка вдоль левой боковой морены. Наибольшая плотность облака отмечается в тыловой части ледника, где оно заполняет всю котловину ледникового цирка.

На фотографиях Г.А. Долгова, снятых днем 21.09.2002 [Васьков, 2016], и И.В. Галушкина от 25.09.2002 [Котляков и др., 2014] в ледниковом цирке, у подножия правобережного склона, с которого происходили интенсивные обвалы, фиксируется то же облако, но гораздо меньших размеров. Именно это обстоятельство позволило многим исследователям предположить, что облако состоит из пыли и связано с масштабными обвалами льда и горных пород.

В отношении грязевых подтеков или следов талых вод, надо сказать, что они больше соответствуют обвально-осыпным шлейфам, приуроченных к участкам развития сильно трещиноватых горных пород. В том числе, активизации обвально-осыпных процессов и образованию подтеков способствовало оттаивание льда, цементирующего дезинтегрированные породы в криогенной зоне.

Также в некоторых материалах есть упоминания о большом углублении, обнажившемся в днище ледникового цирка Колка после схода ледника 20 сентября 2002 г.

В работе [Котляков и др., 2014] отмечено следующее. «По мнению М.Г. Бергера, при газодинамическом выбросе ледника произошел «высокоскоростной разлет продуктов его разрушения», «метание обломков» «вверх и в стороны от эпицентра выброса» <...>. Кроме того, в цирке образовалась «гигантская воронка выброса», на выходе газоподводящего канала возникло «воронкообразное (мульдообразное) расширение с диаметром в сотни метров».

Однако на пустом ложе ледника не было ничего похожего на «гигантскую воронку выброса», это видно на всех снимках и подтверждено при наземных обследованиях цирка. Нет также никаких признаков «разлета обломочного материала».

По сведениям [Носов, Сейнова, Запорожченко, 2007] «Обвалы начались за два месяца до катастрофы. <...> Заключительный

удар оставил после себя яму выбивания глубиной в 60 м и ледово-каменные заплески».

К сожалению, более подробной информации о таинственной огромной воронке нам найти не удалось.

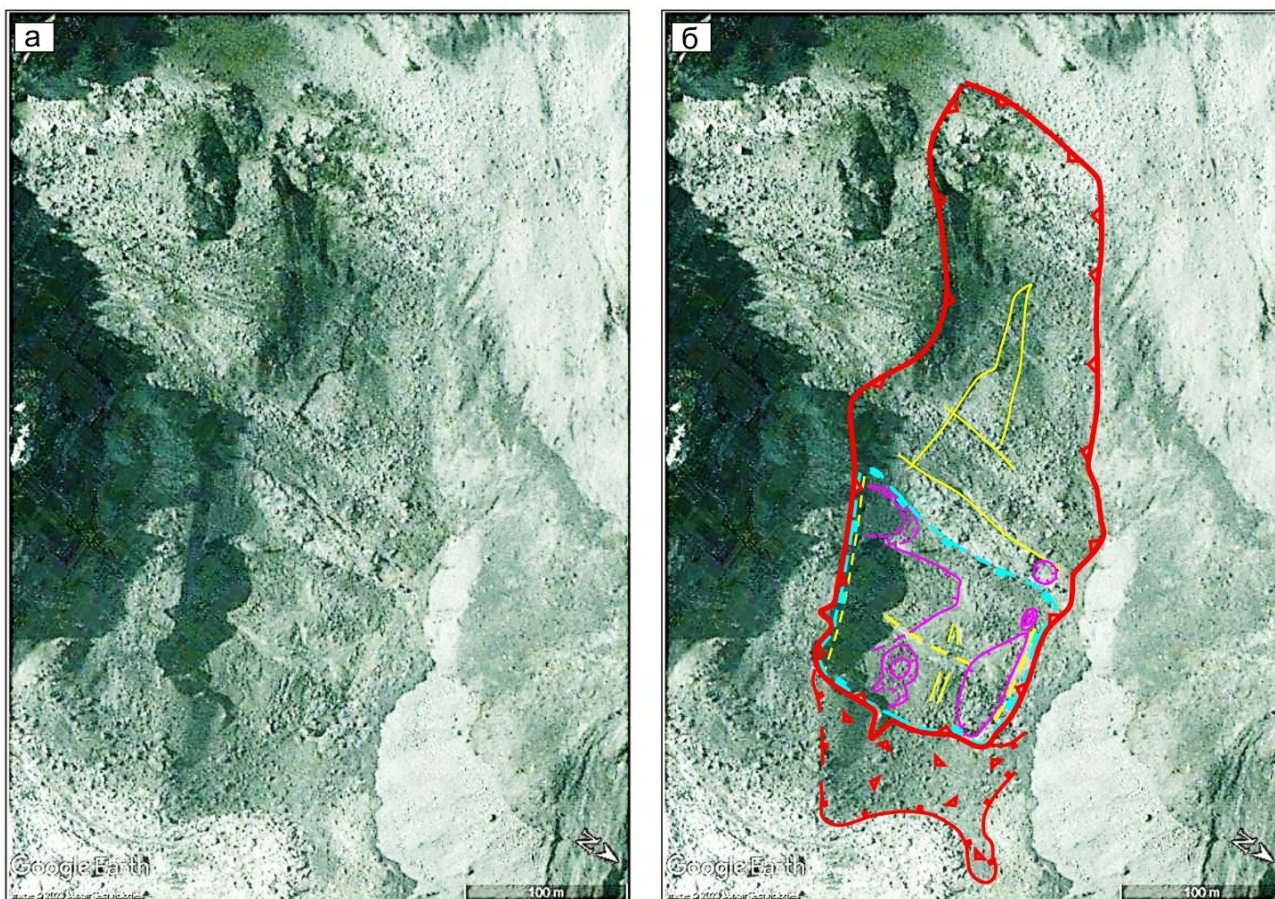
На фотографии Г.А. Носенко, сделанной в сентябре 2003 г. [Котляков и др., 2014, рисунок 65] в районе наблюдавшегося парагазового облака, на днище долины, где находилась тыловая часть ледника Колка, действительно просматривается довольно большое воронкообразное углубление, частично засыпанное коллювиальными отложениями. Еще на одной фотографии, снятой И.В. Галушкиным 25 сентября 2002 г. [Котляков и др., 2014, рисунок 51] виден нижний край этого углубления с крутыми, почти отвесными бортами, высота которых, по нашему мнению, составляет не менее 10 м.

В итоге, авторами настоящей статьи на космическом снимке Google от 25.09.2002 (по счастливой случайности, сделанном в солнечную погоду и не закрытом парагазовым облаком), в ложе ледника, было установлено вытянутое вдоль долины р. Колка углубление (ниша) с четко очерченными границами. Более того, на дне углубления удалось распознать признаки газовых извержений с воронками взрыва (рисунок 3).

Новообразованное углубление (ниша) находится в днище ледникового цирка Колка, под тыловой частью сорванного со своего ложа ледника Колка. Оно имеет форму не овальной воронки, а изогнутого прямоугольника, стороны которого вероятно повторяют направление двух пересекающихся крутопадающих тектонических нарушений, ориентированных в субширотном (восток-северо-восточном) и меридиональном направлении.

По космическому снимку нам не удалось точно определить, чем сложено дно углубления. Предполагается, что его верхняя и средняя части представлены погребенными льдами, а нижний участок – коренными породами.

С использованием масштабной линейки космоснимка определены ориентировочные размеры ниши. Ее средняя длина составила 370 м, ширина – 130 м. Приняв среднюю глубину равной 10 м, получим объем 480000 м³.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ






-  - общий контур углубления, образованного в ложе ледника Колка в результате взрывных выбросов газов
 -  - граница структуры проседания
 -  - сплошной шлейф обломочных отложений в зоне выброса газовых извержений
 -  - взрывные воронки с насыпными валами
 -  - трещины и нарушения
- (установленные границы проведены сплошной линией, предполагаемые - пунктирной линией)

Рисунок 3. Участок проявления эндогенных процессов в днище долины р. Колка: а) фрагмент космического снимка Google от 25.09.2002; б) фрагмент того же космического снимка с данными интерпретации форм рельефа, сформировавшихся в результате деятельности неотектоники и газовых извержений.

Выбранная ориентировка космического снимка на рисунке 3 по отношению к сторонам света и горизонту продиктована необходимостью получения максимально отчетливого изображения рельефа.

Местоположение этого участка показано на рисунках 4б и 5б.

Figure 3. The site of the manifestation of endogenous processes in the bottom of the valley of the Kolka River: a) a fragment of a Google satellite image from September 25, 2002; b) a fragment of the same satellite image with data on the interpretation of landforms formed as a result of neotectonics and gas eruptions. The chosen orientation of the satellite image in Figure 3 in relation to the cardinal directions and the horizon is dictated by the need to obtain the most distinct image of the relief. The location of this section is shown in Figures 4b and 5b.

Наибольшая глубина фиксируется в нижней (восточной) части ниши, где был проявлен процесс газовых извержений, с которым, вероятно, связано формирование структуры

проседания за счет выброса при взрывах раздробленных горных пород. Не исключено, что газовые извержения происходили в несколько стадий.

Диаметр взрывных воронок достигает 75 м. Воронки имеют форму кольца, полукольца, вытянутого овала и нередко обрамляются насыпными валами из обломков горных пород.

Кроме того, установлены трещины субширотного и субмеридионального простирания, которые могут представлять собой как трещины ледника, так и проявление неотектоники.

К восточной границе ниши примыкает хорошо видимый на поверхности земли шлейф шириной 50–75 м, состоящий из отложений выброшенного при взрывах обломочного материала. Как известно, вулканические извержения состоят из нескольких последовательно развивающихся фаз и начинаются с подземного гула и подземных толчков, сотрясения почвы в окрестностях, которые могут быть вызваны движением магмы в очаге, взрывными выбросами газов и паров, образованием разрывов в верхних горизонтах земной коры. Далее следует серия мощных взрывов, освобождающихся из магмы газов с одновременным выбросом в атмосферу распыленных частиц лавы и раздробленных взрывом горных пород, после которых начинается излияние лавы.

В материалах [Котляков и др., 2014] приводятся следующие сведения: «Л.В. Десинов отмечает интересное событие в 2 часа ночи 20 сентября. В это время за гребнем хребта, ограничивающего ледник Колка слева, в 2 км к северу от него, трое ночевавших охотников были разбужены сильным толчком и содроганием земли, что сопровождалось мощным гулом».

Основываясь на этих данных, можно предположить, что взрывы газов, в том числе вечером 20 сентября 2002 г., были связаны не с постмагматическими процессами, а с проявлением тектономагматической активности. То есть, в долине Колка установлены две из трех фаз вулканического цикла – подземный толчок и извержение газов, с выбросом раздробленных горных пород. Надо полагать, что более

детальную оценку этих событий выскажут специалисты в области вулканологии. Например, не исключено, что «накопления значительного количества природных газов под ледником», взрыв которых привел к «внезапному газодинамическому выбросу ледника Колка 20 сентября 2002 г.» [Бергер, 2006], могло и не быть. То есть, вечером 20 сентября 2002 г., по видимому, произошел не подледный, а подземный взрыв, результатом которого стало образование огромной ниши в днище долины Колка.

Таким образом, вероятнее всего, начальный этап газовых извержений ознаменовался сильнейшим взрывом, сорвавшим с ложа и выбросившим вниз по долине ледник Колка и вызвавшим землетрясение, зарегистрированное в 20 час. 08 мин. 30 сек. всеми окружающими станциями, эпицентр которого располагался вблизи земной поверхности.

Фактор гравитационных процессов

Деятельность гравитационных процессов, а именно, обвалов льда, фирна и горных пород в ледниковом цирке Колка, рассмотрим с двух позиций.

Первое – это формирование в результате обвалов огромного конуса выноса на поверхности ледника Колка, что привело к набору ледником критической массы.

Как отмечают Х.О. Чотчаев и И.М. Малиев, «за период с 1985 по 2000 г. ледник потерял 15 м своей мощности, а через два года к моменту схода лед перевалил через левую морену, т.е. увеличил свою мощность более чем в 2,5–3 раза за счет обвальных масс висячих ледников» [Чотчаев, Малиев, 2014].

В.М. Котляков и соавторы также говорят о том, что «В результате необычно активных обвалов на поверхности ледника сформировался мощный конус выноса» [Котляков и др., 2014].

Р.А. Тавасиев считает, что «из-за обвалов висячих ледников № 8, 9 и 10 всего за три-четыре недели ледник Колка набрал критическую массу» и делает следующий вывод: «повышение поверхности этого ледника до уровня гребня левой береговой морены и заброс обломочного материала за нее является важным индикатором

набора ледником критической массы и приближающейся подвижки» [Тавасиев, 2014].

Второе – это влияние обвалов непосредственно на сход ледника Колка 20 сентября 2002 г., где обвалы могли сыграть роль триггера. Мнения по этому поводу разделились.

Большинство авторов публикаций (А.П. Полквой, Э.В. Запорожченко, И.М. Васьков, О.В. Тутубалина, В.Б. Заалишвили, В.Р. Болов и многие другие) относили обвалы к одной из главных причин схода ледника Колка 20 сентября 2002 г.

И.М. Васьков после проведения аэровизуальных наблюдений сообщает: «21 сентября в 8 часов утра с вертолета были обследованы долины рек Гизельдон и Геналдон <...>. При этом было зафиксировано продолжение обрушения льда и горных пород со склона восточного гребня вершины Джимарай-хох, а также изменения его (склона) морфологии в сторону выполаживания. Этот факт позволил сделать обоснованное предположение об обвальном происхождении Геналдонской катастрофы» [Васьков и др., 2022].

В первом после схода ледника научном описании [Запорожченко, 2003а] утверждается что: «Отмеченный сейсмический толчок в 20 часов 08 мин. 20.09.02 явился следствием единовременного обрушения значительного по объему ледового тела с большой высоты. Можно считать вполне достоверно установленным, что произошло это с участка примыкания фирново-ледовой перемычки (хребта) Майли-Джимарай-хох к северным склонам Джимарай-хоха».

По данным [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005] «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».

«На снимке 20 сентября фиксируется крупный обвал, лежащий поверх свежего снега, площадью 0,17 км²».

«Один из таких обвалов вечером 20 сентября 2002 г. мог послужить импульсом к началу катастрофы».

По оценке В.Р. Болова и соавторов, в 20 ч 09 мин. 20.09.2002 г. единовременный обвал фирново-ледовых толщ и скальных грунтов массой примерно $10,5 \times 10^6$ т, средней плотностью $1,3 \text{ т/м}^3$, рухнувших с высоты примерно 1000 м, выбил почти $\frac{3}{4}$ объема ледника Колка [Болов, Мочалов, Муратов, 2014б].

В то же время, В.М. Котляков и соавторы отмечают: «<...> правый склон цирка, который был подвержен обвалам, хотя и очень крут (в среднем 35°), но имеет резко расчлененный рельеф <...>. Глыбы фирново-ледовых обвалов (как и куски горной породы) падают не на ледник, а на этот склон, разбиваясь на множество все более мелких обломков, и рассыпаются по поверхности ледника широким шлейфом» [Котляков и др., 2014].

С мнением В.М. Котлякова нельзя не согласиться, но при этом необходимо учитывать, что обвалы могли достигать массы в сотни тысяч и миллионы тонн и, как установлено [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005], перехлестывали через весь ледник и его левую береговую морену. Таким образом, во время обвалов огромная масса льда и горных пород в любом случае оказывала сильное механическое воздействие на ледник. Кроме того, по данным И.М. Васькова [Васьков, 2016], уклон поверхности в зоне обвала достигал 59° , при среднем значении 41° .

Я.Д. Муравьев приводит следующие данные: «При перепаде высоты на этом участке склона $\sim 900\text{--}1000$ м и угле падения – 40° скорость фирново-ледовой лавины на выходе к леднику Колка, на дне ущелья, может превышать $75\text{--}80$ м/с. <...> Предполагается, что лавина прокатилась по леднику, вызвав многочисленные сотрясения в его теле, которые способствовали резкому уменьшению фрикционных сил на большой площади ложа («отлипанию»)» [Муравьев, 2014].

По сведениям И.М. Васькова, общая длина обвального участка на момент схода ледника составила около 1 км: «20 сентября произошла основная фаза обвала, а в период после 20.09.02 г. до августа 2004 г. его зона в верхней части расширилась на восток до 2,5 км» [Васьков, 2016].

Протяженность зоны наиболее интенсивных обвалов горных пород и льда на

правом борту ледникового цирка Колка в августе–сентябре 2002 г. составила по гребню порядка 500 – 600 м. Именно на этом участке произошло обрушение в августе–сентябре 2002 г.

ледников, которые по данным [Тавасиев, 2014] учтены под номерами 8, 9, 10.

Для оценки масштабов обвального процесса сравним две пары космических снимков, представленных рисунками 4 и 5.

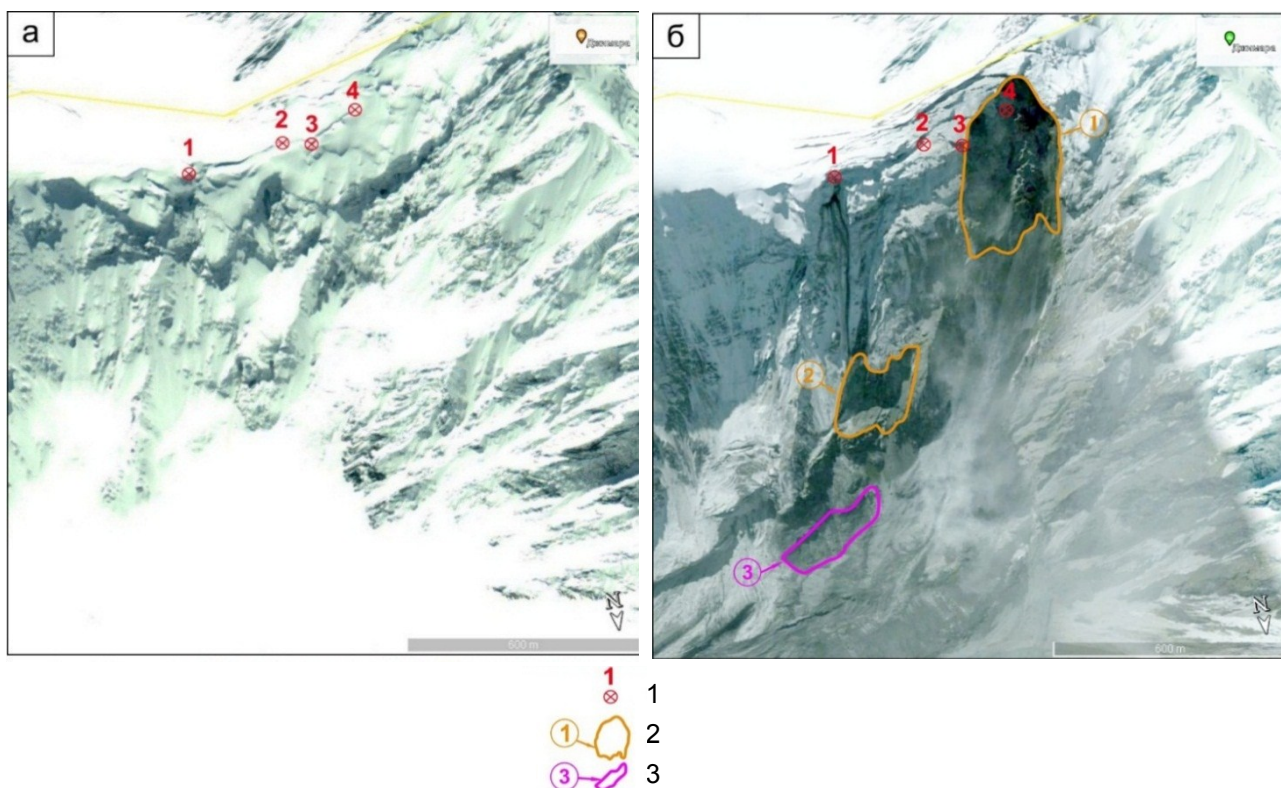


Рисунок 4. Правый борт ледникового цирка Колка с максимальным развитием гравитационных процессов в августе–сентябре 2002 г.: а) по состоянию на 29.04.2002; б) по состоянию на 25.09.2002 (перспективное изображение космических снимков Google):

1 – точки, фиксирующие линию отрыва льда, 2 – границы и номера участков активных обвалов, 3 – граница углубления, образовавшегося в результате газовых извержений в ложе ледника Колка

Figure 4. The starboard side of the Kolka glacier cirque with the maximum development of gravitational processes in August–September 2002: a) as of April 29, 2002; b) as of September 25, 2002 (perspective image of Google satellite images):

1 – points that mark the line of ice detachment, 2 – boundaries and numbers of active landslide sections, 3 – the boundary of the depression formed as a result of gas eruptions in the bed of the Kolka glacier.

На рисунке 4 с перспективным изображением космической съемки показан участок максимального развития обвалов в августе–сентябре 2002 г. на правобережном склоне ледникового цирка Колка по состоянию на 29.04.2002 г. (рисунок 4а) и 25.09.2002 г. (рисунок 4б).

На рисунке 4а видно, что уже в апреле 2002 г. на гребне существовала линия отрыва льда, которая фиксируется отчетливым непрерывным уступом протяженностью около 500 м. Ниже по склону также четко

просматривается нижняя граница ледника, мощность которого могла достигать 80 м [Поповнин и др., 2003].

При сравнении точек 1, 2, 3, 4 на рисунках 4а и 4б, становится очевидным, что к 25 сентября обрушилась практически вся масса льда и фирна, находящаяся ниже линии отрыва и нависавшая сплошным массивом над тыловой частью ледника Колка. Кроме того, зона обрушения льда расширилась на запад от точки 4 приблизительно на 150 м.

Образование ледового уступа, так же, как и гравитационно-тектонических блоков горных пород, вероятнее всего, связано с геологическими процессами.

На рисунке 4б по темному фототону выделяются две крупные обвальные ниши, приуроченные к участку гравитационного отседания склона. Первая из них, овальной формы, отражает зону формирования (зарождения) наиболее масштабного многофазного обвала и находится в верхней пригребневой части правого борта ледникового цирка, а вторая, меньших размеров, расположена ниже и имеет угловатые контуры.

Сравним далее два плановых космических снимка (рисунок 5), один из которых был сделан за 8,5 часов до схода ледника – 20.09.2002 г. [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005] (рисунок 5а), а второй через 5 дней – 25.09.2002 г. (рисунок 5б). В момент съемки, Солнце в обоих случаях находилось на юго-востоке.

Нижняя обвальная ниша на рисунках 5а и 5б имеет практически одинаковые очертания, следовательно, основной обвальный процесс здесь произошел до схода ледника Колка. В то же время, верхний обвальный участок на снимке от 25.09.2002 г. (рисунок 5б) значительно изменил и расширил свои контуры. При этом, по рисунку 4б видно, что западная сторона верхнего обвала освещена солнцем, границы обвала по всему периметру четкие и не вызывают сомнений.

Таким образом, в интервале времени от момента съемки, сделанной днем 20 сентября 2002 г., незадолго до катастрофы, и до 25 сентября 2002 г. на верхнем обвальном участке произошла достаточно сильная активизация гравитационных процессов.

Используя масштабную линейку космоснимка, рассчитаем ориентировочный объем и массу возможного единовременного обвала горных пород и льда. Для расчета приняты следующие параметры всей верхней обвальной ниши: средняя ширина – 250 м, протяженность вниз по склону – 430 м, ориентировочная мощность – 30 м, объем – 3225000 м³. Условимся, что в обвалах участвовало равное количество горной породы и льда, тогда при средней объемной массе вулканогенно-осадочных пород

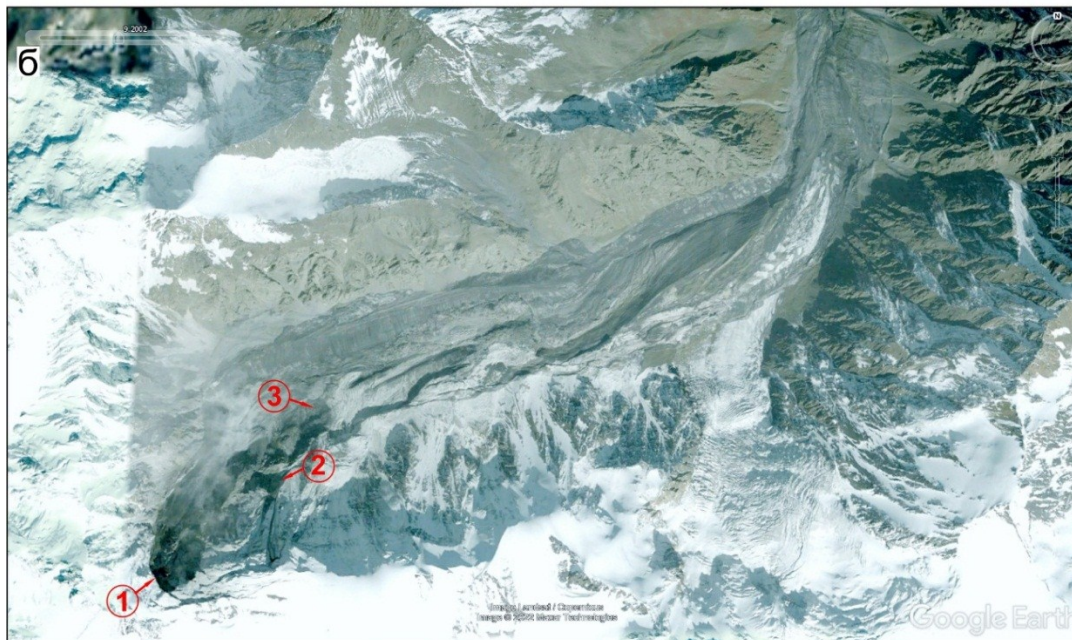
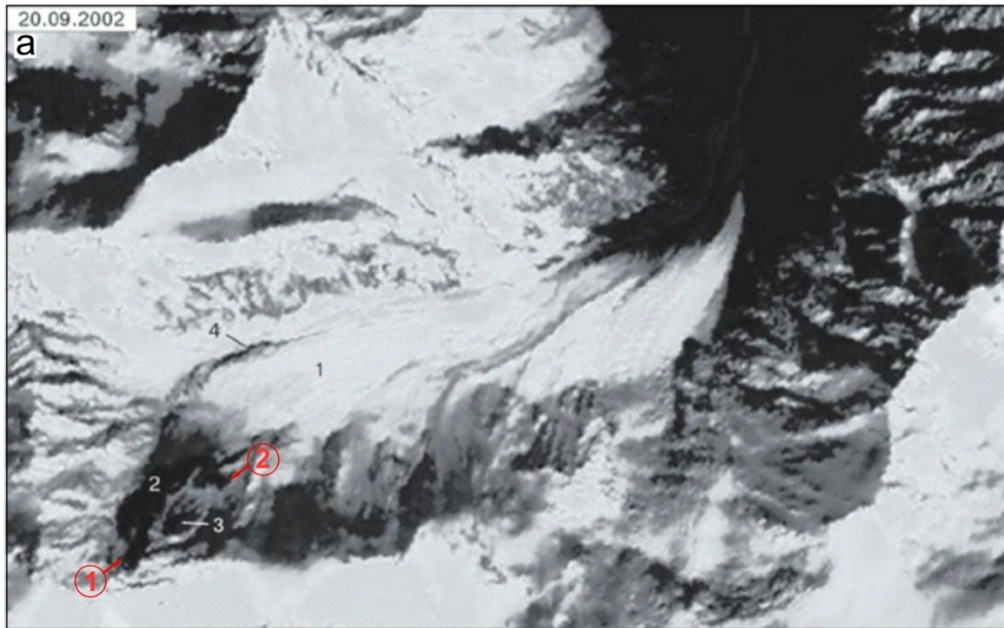
2,5 т/м³ и льда 1 т/м³, и небольшом округлении объема до 3,2 млн. м³, масса всего обвального участка составит: 1600000 м³ × 2,5 т/м³ + 1600000 м³ × 1 т/м³ = 4000000 т + 1600000 т = 5600000 т. Учитывая, что обвалы на этом участке происходили и ранее, максимальный объем единовременного обвала, вероятно, не мог превысить третьей части всего объема обвальной ниши, тогда его масса составит около 1,9 млн. т.

О.В. Тутубалина и соавторы установили, что накануне катастрофы произошел крупный обвал, отложения которого покрыли площадь в 0,17 км² [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005]. При вполне допустимой средней мощности обвальных отложений 1 м, объем обвала составит 170000 м³, а масса – порядка 300 тыс. т.

Таким образом, крупные обвалы в сотни тысяч и миллионы тонн могли сыграть роль триггера при разгрузке набравшего критическую массу ледника Колка в 2002 г., но такой ход событий был нарушен внезапно произошедшим мощным газовым взрывом.

В.Р. Болов, В.П. Мочалов и Ш.С. Муратов считают, что обвалы с обрамляющих склонов стали главной причиной схода ледника Колка в 1902 и 1969 гг. [Болов, Мочалов, Муратов, 2014а].

Что касается событий 1902 года, то доказательством сильной активности обвалов служат слова Э.А. Штебера: «3-го июля <...> сорвался весь, накопившийся в течение многих лет, фирновый лед, накопившийся в виде пяти ледяных потоков на северном склоне хребта Майли. Вся эта масса льда покатила на ледник Колка, затем, ударившись о заграждавший выход из ущелья ледник Майли, повернула в ущелье Геналдон. <...> первым упал, как это видно по полосам на обвале в ущелье Колка, ближайший к выходу, спускающийся ниже всех фирнглечер <...>, а за ним, может быть, от одного сотрясения почвы и воздуха стали постепенно падать подготовленные уже к падению четыре следующие ледника. Последними упали 6-го июля фирнглечеры Гимарай-хоха и хребта Колка, имевшие самую высокую точку опоры» [Штебер, 1904].



- ① ② - местоположение и номер обвальных участков (показаны на рисунке 4б)
 ③ - углубление, образовавшееся в результате газовых извержений (показано на рисунках 3б, 4б)

Рисунок 5. Ледниковый цирк Колка:

а) за 8,5 часов до катастрофы 20 сентября 2002 г. на космическом снимке Landsat 7ETM+:
 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 [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005]; б) по состоянию на 25.09.2002 г. (космоснимок Google).

Figure 5. Kolka Glacier Cirque:

а) 8.5 hours before the disaster on September 20, 2002 on the Landsat 7ETM+ satellite image:
 1 – Kolka Glacier; 2 – the zone of removal of collapsed rocks; 3 – the place of the hanging glacier that collapsed in the period from August 19 to September 20, 2002; 4 – shadow of the ledge of the glacier surface [Tutubalina, Chernomorets, Petrakov, 2005]; б) as of September 25, 2002 (Google satellite image).

Н.В. Поггенполь в подтверждение слов Э.А. Штебера приходил к следующему выводу: «Не может быть никакого сомнения, что семь всяких фирн-глетчеров, четыре из которых доходили до поверхности Колки, соскользнули со склона один за другим, что послужило к образованию тех двух колоссальных лавин, которые проникли далеко в долину Генал-Дона» [цит. по: Котляков и др. 2014].

По материалам Д.Д. Пагирева «3 июля около 3 ч. дня в верховьях ледника послышался грохот, напоминавший пушечную пальбу». «После 4 ч. вода становилась все мутнее и мутнее и приток ее значительно увеличился. <...> Наконец из-под льда, откуда вытекал источник, с водой стали вырываться куски льда и камни. <...> Было около 7 часов вечера. Вдруг все ущелье огласилось необыкновенным гулом, шумом, грохотом! <...> Тут мы заметили, что со стороны горы по ущелью движется какая-то масса! <...> Смесь изо льда, камней, воды и песку с быстротою молнии пронеслась по ущелью, поглощая и стирая с лица земли все, что попадалось на пути» [Пагирев, 1902].

Эти данные позволяют предположить, что 3 июля 1902 г. около 3-х часов дня началась активная фаза обвалов, а вечером, в районе 18–19 часов, произошел массовый сход обвалов и склоновых лавин, сформировавших гигантскую ледово-снежно-каменную лавину, ринувшуюся в долину р. Геналдон. Вместе с тем, такие явления как «необыкновенный гул, шум, грохот» могут свидетельствовать и о проявлении эндогенных геологических процессов в ущелье Колка.

В.М. Котляков и соавторы на основании рисунка Н.В. Поггенполя, увидевшего место события 17 августа 1902 г., отмечают: «Однако мы видим, что рисунок, напротив, показывает обычную картину размещения ледников, фирна и скальных участков на склоне. Постоянство их положения видно и на старых снимках, и после подвижки ледника в 1970-е годы, вплоть до лета 2002 года. <...> Мы считаем наиболее вероятным, что событие 1902 г. началось с подвижки пульсирующего ледника, затем произошел резкий переход к катастрофическому выбросу льда, который был вызван другими причинами» [Котляков и др., 2014].

По данным Э.А. Штебера, свидетельства обвалов были запечатлены даже на фотографии: «Искренне завидую редактору «Терских Ведомостей» Г.А. Вертепову и студенту Касперовичу, которым хоть на короткое время представился случай осмотреть ущелье Колка и успеть сделать единственный в своем роде фотографический снимок обвалов, упавших в ущелье Колка. <...> 3-го августа выпал в горах снег, затем он выпадал еще несколько раз, и теперь уже не получить фотографии, на которой бы так ясно обрисовались места обрыва льда» [Штебер, 1904, с. 248].

Еще одно доказательство обвалов, произошедших 3 и 6 июля 1902 г. с правого борта ущелья Колка, приводится в записке межевого инженера Попова от 23 октября 1902 г.: «Событие 3-го июля сего года, выразившееся в необычайном падении фирна и льда с ледника «Колка», затем такое же событие, повторившееся 6-го июля, могли совершиться только при условии одновременного падения на ледник «Колка» значительных масс снега и льда не только с большого числа описанных ледопадов, но и с расположенных выше этих ледопадов, ледяных полей главного Кавказского хребта. Только что высказанное положение подтверждается тем состоянием означенных ледопадов и расположенных над ними ледяных полей в котором они находились во время измерения их землемером Заводным 15–25 августа сего года» [Черноморец, Адцеев, 2014].

Следовательно в 1902 г. обвалы все-таки были и они могли стать одним из факторов катастрофических сходов ледово-каменных лавин из ущелья Колка.

Вместе с тем, приведенные в настоящей статье данные о газовых извержениях 2002 г. не исключают возможности проявления эндогенной деятельности и в 1902 г.

Например, [Бергер, 2006] утверждает: «Судя по известным признакам проявления, именно такой характер газодинамического (газопородного) выброса имели и другие известные пароксизмальные катастрофические пульсации ледника Колка <...>, но так и оставшиеся неразгаданными в генетическом плане».

В то же время, рассматривая эндогенную (взрывную) версию геналдонских катастроф 1902 года, необходимо ответить на ряд вопросов, а именно: почему еще до 3 июля, когда произошел первый выброс лавины, наблюдались медленные подвижки нижней части ледника; почему процесс схода ледника завершился опять же медленным движением огромной массы льда, остановленной стеной ледника Майли; почему 3 июля 1902 г. сразу же не был выброшен весь ледник, как это произошло 20 сентября 2002 г.? Наконец, нет никаких свидетельств о выходах фумарольных газов, которые в 2002 г. по сведениям [Котляков и др., 2014] наблюдались в колкинском цирке в течение месяца после схода ледника.

Гляциальный фактор

В материалах [Котляков и др., 2014] отмечается, что предпосылки к катастрофическим сходам ледника Колка заложены в строении ледника и морфологии долины Колка: «Причины такого строения ледника – интенсивное питание лавинами и обвалами льда; малые уклоны ложа; упор стекающего льда в сдерживающий левый борт и следующий крутой разворот линий тока льда вправо, массивный полого залегающий язык с нарастающим во времени моренным чехлом, затрудняющим таяние; широкая чаша цирка с относительно узким выходом. Все это вызывает постоянное подпруживание льда, накопление избыточных масс и нарастающее напряжение сдвигающих сил, приводящих к быстрой разгрузке льда».

О.В. Тутубалина и соавторы приводят очень важные сведения о состоянии ледника накануне катастрофы 2002 г.:

«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».

«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 ледника не было».

«Приближение к морене <...> могло вызвать вспучивание поверхности из-за резкого падения скоростей движения и роста напряжений сжатия».

«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. <...>

Выброс тыловой части ледника Колка привел к нарушению устойчивости его языка» [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005].

Данные, приведенные в статье [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005] о том, что на снимке 20 сентября накануне катастрофы в тыловой части ледника наблюдались признаки активизации, позволяют предположить, что набравший критическую массу ледник был подготовлен к разгрузке, но его сдерживала языковая часть, которая находилась в это время в стабильном состоянии. Это вполне объясняется данными [Котляков и др., 2014] – «подъем ложа ледника, сужение и поворот долины в районе «ригеля»². Аналогичные сведения были получены К.П. Рототаевым перед разгрузкой ледника в 1969/70 гг.: «<...> к весне и лету 1969 г. <...> за головной частью появилось крупное вздутие поверхности, обозначающее зону высоких внутренних напряжений в толще ледника» [Рототаев и др., 2014].

Материалы [Котляков и др., 2014] свидетельствуют о том, что в ледниковом цирке Колка днище долины выстилают мертвые (погребенные) льды, мощность которых может достигать нескольких десятков метров. На погребенных льдах залегают собственно ледник Колка, который формируется за счет ледников-притоков и лавинного снега (в материалах [Болов, Мочалов, Муратов, 2014а] он

² В.М. Котляков и соавторы [Котляков и др., 2014] условно называют «ригелем» подковообразную поперечную гряду, образовавшуюся после схода ледника, состоящую из нагромождения глыб льда и обломочного материала, круто спускающуюся тремя ступенями вниз по долине.

называется долинным ледником, в монографии [Котляков и др., 2014] – донным льдом, в статье [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005] – ледниковым льдом). В свою очередь долинный ледник перед катастрофой 2002 г. был перекрыт мощным обвальным конусом выноса, состоящим из обломков льда, фирна, горных пород и лавинного снега.

Рассмотрим три фотоснимка долины Колка, представленные рисунками 6а, 6б и 7. Фото на рисунках 6а и 6б сделаны приблизительно с одного ракурса, первое – 22.09.2001, второе – в первых числах сентября 2002 г., незадолго до схода ледника Колка. На рисунке 6а ниже языка ледника в днище долины С.С Черноморцем обозначены массивы мертвых льдов покрытые мореной. На рисунке 6б на поверхности ледника Колка, в том числе и в нижней его части, видны отложения обвального конуса выноса.

Обратимся далее к фотографии Г.А. Носенко [Котляков и др., 2014] (рисунок 7), которая была сделана в июле 2003 г., когда днище долины Колка еще сохранило свой практически неизменный облик после схода ледника в 2002 г.

На фото отчетливо просматриваются два участка с поперечными уступами, на крутых откосах которых обнажается массивный лед.³

Верхний двоянный уступ расположен в тыловой части ледника Колка. Нижний тройной уступ проходит вдоль линии поперечной ступени, отмеченной на фотографии краснодарской группы туристов (рисунок 6б), в районе «ригеля» [Тавасиев, 2014].⁴

В.М. Котляков и соавторы считают, что верхние уступы сложены массивом льда, оставшимся в тылу цирка. По поводу «ригеля», где расположены нижние уступы, сказано следующее: «Мы полагаем, что причиной образования гряды служил не только подъем ложа, но сужение и поворот долины на этом

участке. Все это вместе затруднило уход наиболее крупных и тяжелых остатков разрушившегося ледника, и произошел, отрыв «хвоста» – крупного массива льда и камней – от основной массы движущегося потока» [Котляков и др., 2014].

Приведенные рисунки 6 и 7 позволяют предположить, что ступенчатые уступы – это не что иное, как формы рельефа, образовавшиеся в результате отрыва льда на разных гипсометрических уровнях при сходе ледника Колка. В том числе, в первом случае двоянный уступ в тыловой части ледникового цирка отражает линию отрыва долинного льда, во втором случае, тройной уступ в районе погребенных льдов, проходящую по ранее заложеной поперечной по отношению к долине Колка трещине, четко проявившейся в днище и на бортах ложа после схода ледника. Причины образования в погребенных льдах в районе «ригеля» поперечной трещины неясны и возможно связаны с неотектоникой.

Доказательством вовлечения в ледово-каменный поток погребенных льдов служит рисунок 6а, где полого залегающая поверхность «ригеля», – линию отрыва массива долинного льда и мертвых льдов прослеживается непосредственно на продолжении фронтальной части языка долинного ледника. При обследовании ледника 22 сентября 2001 г. также было установлено, что «перед Колкой отчетливо просматривались большие массивы мертвых льдов» [Поповнин и др., 2003].

В то же время, на фотографии Г.А. Носенко (рисунок 7) можно наблюдать на участке, где ранее залегал массив мертвых льдов, резкое понижение рельефа, с образованием крутых уступов.

Таким образом, при сходе ледника Колка, в ледово-каменном потоке, наряду с долинным льдом и материалом конуса выноса, также участвовал и погребенный лед.

³ Аналогичная фотография с ледовыми уступами есть и у И.М. Васькова [Васьков, 2016]. Надо сказать, что после схода ледника Колка в 2002 г. мы имеем весьма редкую и даже уникальную возможность рассмотреть днище ледникового цирка практически полностью освобожденным от пришедшего в движение льда.

⁴ Наличие ступеней на поверхности ледника позволило Р.А. Тавасиеву [Тавасиев, 2014] по этой фотографии сделать вывод, что «<...> подвижка ледника Колка происходила уже в первых числах сентября 2002 г.!»

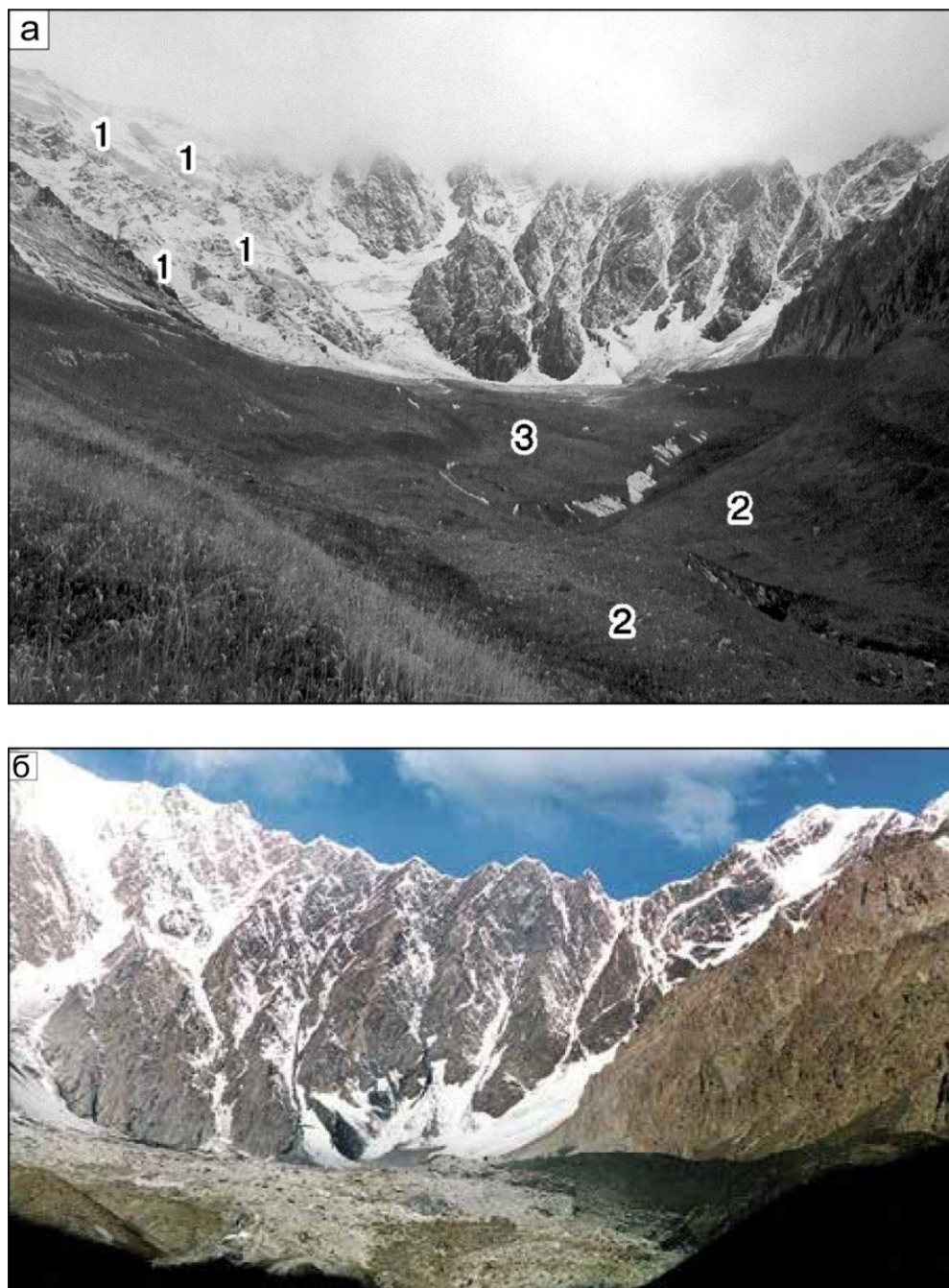


Рисунок 6. Вид на ледник Колка:

а) за год до катастрофы – 22.09.2001 г.: 1 – висячие ледники на склонах Джимарай-хоха; 2 – массивы мертвых льдов, покрытые мореной; 3 – замороженный язык ледника Колка (фото С.С. Черноморца);

б) обломочный материал на поверхности ледника Колка в первых числах сентября 2002 г. (фото краснодарской группы туристов под руководством О.В. Неподобы).

Figure 6. View of the Kolka glacier:

a) a year before the disaster – September 22, 2001: 1 – hanging glaciers on the slopes of Jimaray-khokh; 2 – stagnant ice massifs covered with moraine; 3 – frozen tongue of the Kolka glacier (photo by S.S. Chernomoretz);

b) detrital material on the surface of the Kolka Glacier in the first days of September 2002 (photo of the Krasnodar group of tourists led by O.V. Nepodoba).

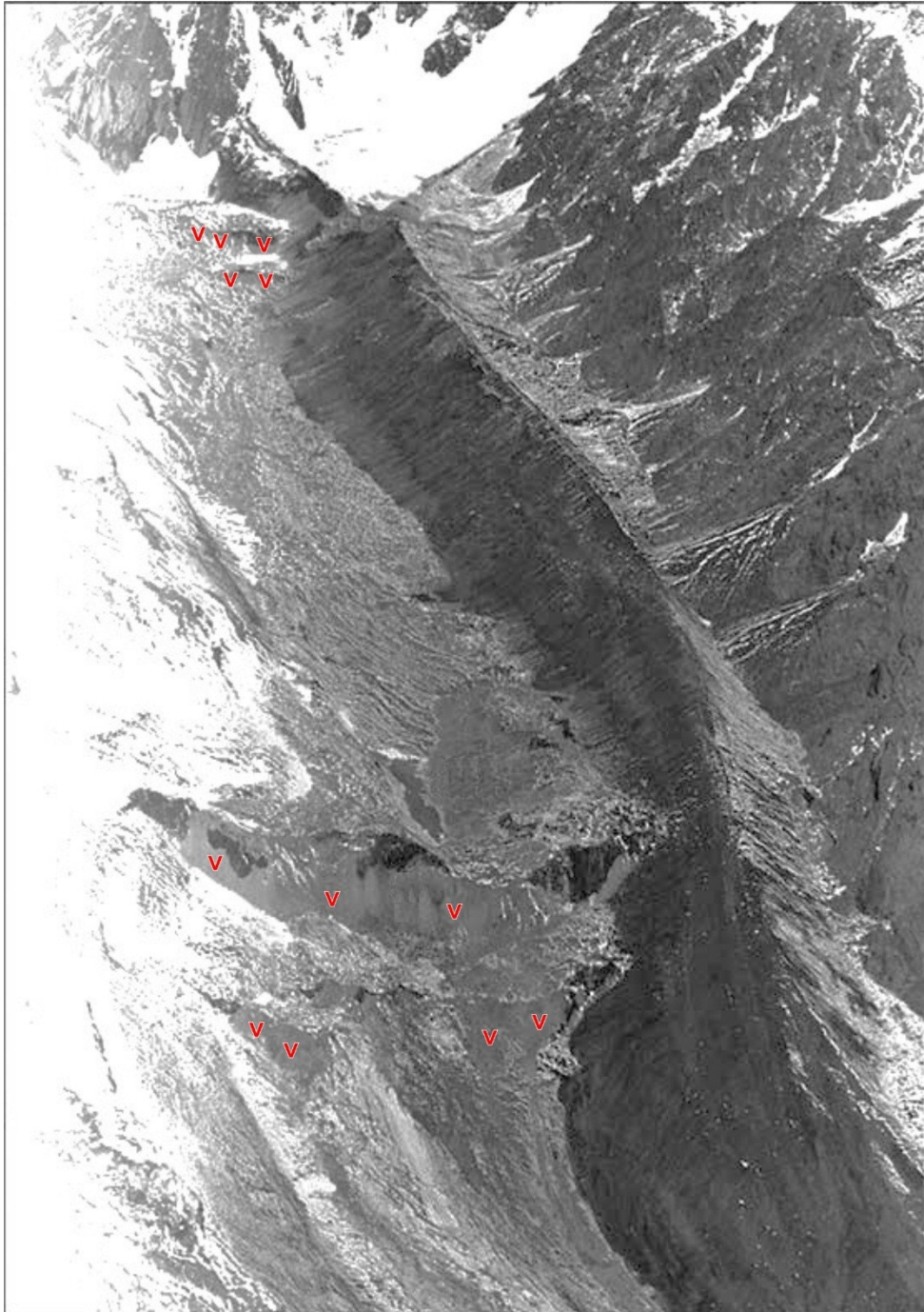


Рисунок 7. Поперечные уступы (V V), образовавшиеся после схода ледника Колка (фото Г.А. Носенко, 27.06.2003 г.).

Figure 7. Transverse ledges (V V) formed after the collapse of the Kolka glacier (photo by G.A. Nosenko, June 27, 2003).

Верхняя часть крутых уступов, состоящая из нагромождения глыб льда и обломочного материала горных пород, как отмечают [Котляков и др., 2014], представляет собой оставшуюся часть («хвост») от основной массы движущегося потока.

Относительно 1969 г. В.Р. Болов и соавторы считают, что «Объем льда, вынесенный более чем

на 4 км за пределы бассейна ледника Колка, <...> состоял примерно из равных частей масс льда обвалов и собственно долинного ледника» [Болов, Мочалов, Муратов, 2014a]. Что касается событий 1902 г., то в материалах [Черноморец, Адцеев, 2014], наряду с информацией о катастрофических выбросах ледника Колка в долину р. Геналдон 3 и 6 июля, приводятся

сведения и о медленных подвижках льда: «Обнаруженные документы свидетельствуют также о третьем продвижении ледника» «<...> 16 июля со стороны Майлинского ледника и ущелья Колка были слышны треск и сильный шум после чего из ущелья Колка показался Ледник громадных размеров и частью ледник уперся в Майлинский ледник».

В материалах [Запорожченко, 2003а; Котляков и др., 2014] также говорится о медленном продвижении ледника Колка еще до катастрофы 3 июля 1902 г.

Следовательно, подвижки долинного ледника Колка происходили как до 3 июля, так и после 6 июля.

Приведенные сведения указывают, что 3 и 6 июля 1902 г. катастрофические лавины, прошедшие по р. Геналдон, главным образом, включали склоновые обвальные и лавинные массы, обрушившиеся с правого борта ущелья и захватившие нижнюю часть ледника Колка, а 16 июля в движение пришла основная масса долинного ледника.

В материалах [Пагирев, 1902] сообщается, что в русле р. Геналдон «поверхность ледника, доступная взору, представляет из себя грязную массу, состоящую из песка, камней, льда и снега».

Таким образом, катастрофические лавины, формирующиеся в ущелье Колка, в зависимости от конкретных условий могут включать в различных комбинациях долинный лед, склоновый лавинный и обвальный материал, отложения конуса выноса, погребенные льды и даже выброшенные при газовых извержениях раздробленные горные породы.

В этой связи обратимся к работе [Запорожченко, 2003б], где проводится аналогия формирования ледово-каменных лавин в ущелье Колка с Уаскаранскими лавинами, сошедшими в 1962 и 1970 гг. в горах Кордильера Бланка (Перу) и также имевшими катастрофические последствия. Достоверно установлено, что образование лавины в 1962 г. было связано со сверхобильными снегопадами зимой 1961 г. и последующим необычайно влажным и дождливым летом, «что привело <...> к отрыву тяжелого слоя снега и льда. Фронтальная часть откололась и обрушилась вниз». А в 1970 г.

причиной лавины стал оторвавшийся в результате сильного землетрясения с той же горы Уаскаран «<...> гигантский блок горных пород и льда объемом в несколько миллионов кубических метров. Вся эта масса с километровой высоты обрушилась на ледник».

К сожалению, участие высокой энергетики приземной атмосферы в переносе промчавшихся по долине р. Геналдон масс – подъёмно-вихревой характер воздушных потоков, кратковременное существование «воздушной подушки», отмечаемые, к примеру, во время Уаскаранской трагедии 1970 г. в Перуанских Альпах – прошло мимо внимания отечественных исследователей «схода Колки» 2002 г. [Запорожченко, 2003б]. Между тем на формирование «воздушно-водокаменно-ледовой лавины» указывают все непосредственные свидетели аналогичных исторических событий.

Выводы

Большинство авторов публикаций о Геналдонской катастрофе сходятся во мнении, что «сход ледника Колка» 20 сентября 2002 г. обусловлен сочетанием нескольких природных факторов.

Анализ происходивших в ущелье Колка климатических, эндогенных и экзогенных процессов говорит о том, что это событие связано «прежде всего с глубинными эндогенными геологическими факторами – тектонической активизацией и раскрытием зон повышенной проницаемости земной коры (глубинных разломов)». [Бергер, 2006].

Максимальная деятельность эндогенных процессов проявилась в августе – сентябре 2002 г., когда на начальном этапе произошло подновление трещин в разломных зонах, вызвавшее резкую активизацию обвалов, а на заключительном – раскрытие тектонических трещин, сопровождавшееся газовыми извержениями.

В ледниковом цирке Колка установлены две активные тектонические зоны – субширотного (ВСВ) и меридионального простирания. Подвижки вдоль субширотного нарушения привели к формированию системы кулисообразно расположенных гравитационно-

тектонических трещин и блоков, обвалам горных пород и льда на правом борту долины на пересечении с меридиональным разломом. Обвалам также способствовали тепловые потоки в ослабленных тектонических зонах, приводящие к усиленному оттаиванию многолетнемерзлых пород.

К пересечению субширотного и меридионального разломов приурочен участок проявления газовых извержений, в результате которых произошел выброс раздробленного обломочного материала и образование ниши в днище долины Колка протяженностью 370 м и объемом порядка 0,5 млн. м³.

Причиной схода ледника Колка вечером 20 сентября 2002 г. скорее всего стал сильнейший взрыв в начальной стадии газовых извержений, который сорвал ледник с его ложа и выбросил вниз по долине с огромной скоростью. Этот взрыв также вызвал землетрясение, зарегистрированное в 20 час. 08 мин. 30 сек. всеми окружающими станциями и, вероятно, сильную обвальную активизацию на крутых склонах ледового цирка.

Место проявления газовых извержений находится под тыловой частью ледника Колка, набравшего перед катастрофой массу до 100 млн. т., что в совокупности и привело к одномоментному выбросу ледника, а в итоге, к

Литература

Бергер М.Г. Природная катастрофа на леднике Колка 20 сентября 2002 года – внезапный газодинамический выброс ледника // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах. Доклады международной конференции Владикавказ – Москва, 23 – 26 июня 2004 г. Владикавказ: Олимп, 2006. С. 41–49.

Болов В.Б., Мочалов В.П., Муратов Ш.С. Гляциальные катастрофы и их предвестники в бассейне р. Геналдон Республики Северная Осетия–Алания // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и СО-А, 2014а. С. 291–295.

небывалому масштабу бедствия с трагическими последствиями.

Рассматривая геналдонские катастрофы 1902 и 2002 гг., нельзя сбрасывать со счетов возможное влияние на происходящие в ущелье Колка процессы одиннадцатилетних и вековых периодов климатических колебаний, обусловленных изменениями интенсивности солнечной активности.

В том числе, на 2002 г. приходится второй пик двойного максимума одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. Первый пик наблюдался в 2000 г., когда по р. Герхожан-су в Кабардино-Балкарской Республике прошла серия катастрофических селей гляциального генезиса, причинивших огромный ущерб г. Тырнауз.

В этом же 2002 г., наряду с Геналдонской катастрофой, произошло экстраординарное наводнение на Северном Кавказе, которое было вызвано совпавшими во времени максимальными, по данным наблюдений за 70 предшествующих лет, уровнями грунтовых вод и атмосферными осадками.

Таким образом, аномальные проявления климатических факторов, эндогенных и экзогенных процессов в 1902 и 2002 гг. в долине р. Колка, скорее всего, носят планетарный характер и могут быть приурочены к вековым циклам солнечной активности.

References

Berger M.G. Prirodnaya katastrofa na lednike Kolka 20 sentyabrya 2002 goda – vnezapnyj gazodinamicheskij vybros lednika [Natural disaster on the Kolka glacier on September 20, 2002 – sudden gas-dynamic release of the glacier] *Preduprezhdenie opasnyh situacij v vysokogornyh rajonah. Doklady mezhdunarodnoj konferencii Vladikavkaz [Prevention of dangerous situations in high-altitude areas]. [Reports of the international conference Vladikavkaz] (June 23–26, 2004, Moscow)].* Vladikavkaz: Olympus, 2006. pp. 41–49. (In Russian).

Bolov V.B., Mochalov V.P., Muratov S.S. Glyacial'nye katastrofy i ih predvestniki v bassejne r. Genaldon Respubliki Severnaya Osetiya–Alaniya [Glacial catastrophes and their precursors in the Genaldon River basin of the Republic of North Ossetia–Alania]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili

- Болов В.Б., Мочалов В.П., Муратов Ш.С. Природные катастрофы, обусловленные обвалами и пути их предупреждения. // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014б. С. 296–301.
- Васьков И.М. Геналдонская катастрофа 2002 г. Основные факты и этапы развития // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография. / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014б. С. 252–263.
- Васьков И.М. Катастрофические обвалы: происхождение и прогноз / Владикавказ: ООО НПКП «МАВР», 2016. 369 с.
- Васьков И.М., Караев Ю.И., Маковозова З.С., Хубулов А.И. 20 лет событию в долине р. Геналдон – геологической катастрофе мирового масштаба (Центральный Кавказ, Северная Осетия) // Результаты 20 лет изучения катастрофы мирового масштаба в Геналдонском ущелье (сход ледника Колка): Владикавказ, 20–21 сентября 2022 г. Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2022. С. 8–39.
- Гурбанов А.Г. Результаты проведенных геологических, геофизических, геодезических и дистанционных исследований как основа разработки Программы комплексного мониторинга с отслеживанием и анализом признаков вулканической опасности в пределах Казбекского вулканического центра в Геналдонском ущелье // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 113–114.
- Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Харебов К.С. Анализ инструментальных записей схода ледника Колка (по данным локальной сети сейсмических наблюдений) // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014a. pp. 291–295. (In Russian).
- Bolov V.B., Mochalov V.P., Muratov S.S. Prirodnye katastrofy, obuslovlennye obvalami i puti ih preduprezhdeniya [Natural disasters caused by landslides and ways to prevent them]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014a. pp. 296–301. (In Russian).
- Vaskov I.M. Genaldonskaya katastrofa 2002 g. Osnovnye fakty i etapy razvitiya [The Genaldon catastrophe of 2002 Basic facts and stages of development]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014b. pp. 252–263. (In Russian).
- Vaskov I.M. *Katastroficheskie obvaly: proiskhozhdenie i prognoz [Catastrophic collapses: origin and forecast]*. Vladikavkaz, Publ. LLC NPKP MAVR, 2016. 369 p. (In Russian).
- Vaskov I.M., Karaev Yu.I., Makovozova Z.S., Khubulov A.I. 20 let sobytiyu v doline r. Genaldon – geologicheskoy katastrofe mirovogo masshtaba (Central'nyj Kavkaz, Severnaya Osetiya) [20 years of the event in the valley of the Genaldon River – a geological catastrophe on a global scale (Central Caucasus, North Ossetia)]. *Rezultaty 20 let izucheniya katastrofy mirovogo masshtaba v Genaldonskom ushchel'e (skhod lednika Kolka) [Results of 20 years of studying a global catastrophe in the Genaldon gorge (Kolka glacier descent)]*. Vladikavkaz, Publ. North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), 2022. pp. 8–39. (In Russian).

- Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 141–149.
- Запорожченко Э.В.* Сход ледника Колка 20 сентября 2002 года и его последствия // *Наследие, Вестник № 4. Пятигорск, 2003а, С. 44–48.*
- Запорожченко Э.В.* Ледник Колка и долина р. Геналдон: вчера, сегодня, завтра // *Сборник научных трудов ОАО «Севкавгипроводхоз». № 16. Пятигорск, 2003б. С. 15–35.*
- Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Десинов Л.В., Осокин Н.И., Чернов Р.А.* Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше / Русское географическое общество. Москва: ООО «Издательский дом «Кодекс», 2014. 184 с.
- Лебедева И.М., Рототаева О.В.* Климатический фактор катастрофической подвижки ледника Колка в 2002 году // *Материалы гляциологических исследований. 2005. № 97. С. 155–161.*
- Лохов Э.Г., Полквой А.П.* Происхождение «муравьиных куч» // *Рекреация и горы. Тезисы докладов 8-го научно-практического семинара по рекреационной географии. Владикавказ: Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, 2010, С. 35–37.*
- Муравьев Я.Д.* Газовое извержение в Колкинском цирке – возможная причина развития подвижек ледника по катастрофическому сценарию // *Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 104–112.*
- Носов К.Н., Сейнова И.Б., Запорожченко Э.В.* Изменение условий пропуска паводков на реках Геналдон и Гизельдон после быстрого продвижения ледника Колка (Северный Кавказ, Россия) // *Сборник научных трудов ОАО «Севкавгипроводхоз». № 17. Пятигорск, 2007. С. 45–68.*
- Осокин Н.И.* Ледник Колка сегодня. Какой ледник будет опасен завтра // *Ледник Колка: вчера,*
- Gurbanov A.G.* Rezul'taty provedennyh geologicheskikh, geofizicheskikh, geodezicheskikh i distancionnyh issledovanij kak osnova razrabotki Programmy kompleksnogo monitoringa s otslezhivaniem i analizom priznakov vulkanicheskoy opasnosti v predelakh Kazbekskogo vulkanicheskogo centra v Genaldonskom ushel'e [The results of geological, geophysical, geodetic and remote studies as the basis for the development of a comprehensive monitoring program with tracking and analysis of signs of volcanic danger within the Kazbek volcanic center in the Genaldon gorge]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 113–114. (In Russian).
- Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Kharebov K.S. Analiz instrumental'nyh zapisej skhoda lednika Kolka (po dannym lokal'noj seti seismicheskikh nablyudenij) [Analysis of instrumental records of the Kolka glacier descent (according to the local network of seismic observations)]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 141–149. (In Russian).
- Zaporozhchenko E.V. Skhod lednika Kolka 20 sentyabrya 2002 goda i ego posledstviya [The descent of the Kolka glacier on September 20, 2002 and its consequences] *Nasledie, Vestnik Pyatigorsk [Heritage, Bulletin Pyatigorsk]*, 2003a, no. 4, pp. 44–48. (In Russian)/
- Zaporozhchenko E.V. Lednik Kolka i dolina r. Genaldon: vchera, segodnya, zavtra [Lednik Kolka and the valley of the Genaldon River: yesterday, today, tomorrow] *Sbornik nauchnyh trudov OAO «Sevkavgiprovodhoz» [Collection of scientific papers of JSC Sevkavgiprovodkhoz]*, Pyatigorsk, 2003b, no. 16, pp. 15–35 (In Russian).
- Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Desinov L.V., Osokin N.I., Chernov R.A. *Karmadonskaya katastrofa: chto sluchilos' i chego zhdet' dal'she [Karmadon catastrophe: what*

сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 307–313.

Пагурев Д.Д., Падение ледников с Гимарай-хоха // Известия Кавказского отдела Императорского Русского географического общества. Тифлис, 1902. Том XV. № 3. С. 205–210.

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. 56–77.

Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н., Подвижка ледника Колка в 1969-1970 годах // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 23–29.

Тавасиев Р.А. О некоторых дискуссионных вопросах, связанных с катастрофическим сходом ледника Колка // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография. / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 272–283.

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.

Черноморец С.С., Адцеев В.Г. Ледниковые катастрофы в Геналдонском ущелье: взгляд в прошлое // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография. / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 329–426.

Чотчаев Х.О., Малиев И.Н. О гидродинамической и газодинамической гипотезах причин схода ледника Колка 20 сентября 2002 г. // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических

happened and what to expect next] Moscow, Publ. Russian Geographical Society: LLC Publishing house Codex, 2014. 184 p. (In Russian).

Lebedeva I.M., Rototaeva O.V. Klimaticheskij faktor katastroficheskoj podvizhki lednika Kolka v 2002 godu [Climatic factor of catastrophic movement of the Kolka glacier in 2002] *Materialy glyaciologicheskikh issledovanij [Materials of glaciological studies]*, 2005, no. 97. pp. 155–161. (In Russian).

Lokhov E.G., Polkvoy A.P. Proiskhozhdenie «murav'inyh kuch» [The origin of "ant heaps"] *Rekreaciya i gory. Tezisy dokladov 8-go nauchno-prakticheskogo seminaru po rekreacionnoj geografii. [Recreation and mountains. Abstracts of the 8th scientific and practical seminar on recreational geography]*. Vladikavkaz, Publ. K.L. Khetagurov North Ossetian State University, 2010, pp. 35–37. (In Russian).

Muraviev Ya.D. Gazovoe izverzhenie v Kolkinskom cirke – vozmozhnaya prichina razvitiya podvizhek lednika po katastroficheskomu scenariyu [Gas eruption in the Kolka Cirque – a possible reason for the development of glacier movements in a catastrophic scenario]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 104–112. (In Russian).

Nosov K.N., Seinova I.B., Zaporozhchenko E.V. Izmenenie uslovij propuska pavodkov na rekah Genaldon i Gizel'don posle bystrogo prodvizheniya lednika Kolka (Severnyj Kavkaz, Rossiya) [Changing flood conditions on the Genaldon and Gizeldon rivers after the rapid advance of the Kolka glacier (North Caucasus, Russia)] *Sbornik nauchnyh trudov OAO «Sevkavgiprovdhoz» [Collection of scientific papers of JSC Sevkavgiprovdhoz]*, Pyatigorsk, 2007, no. 17, pp. 45–68 (In Russian).

Osokin N.I. Kolka Glacier today. Lednik Kolka segodnya. Kakoj lednik budet opasen zavtra [Which glacier will be dangerous tomorrow]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*, Vladikavkaz, Publ. Center for

исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 265–270.

Штебер. Э.А. Ледовые обвалы в истоках Геналдона // Терский сборник: Литературно-научное приложение к «Терскому календарю» 1903 г. 1904. Вып. 6. С 233–248.

Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 307–313. (In Russian).

Pagirev D.D. Padenie lednikov s Gimaraj-hoha [The fall of glaciers from Guimaraj-hoha] *Izvestiya Kavkazskogo otdela Imperatorskogo Russkogo geograficheskogo obshchestva* [*Izvestiya Kavkazskogo dept. of the Imperial Russian Geographical Society*], Tiflis, 1902, vol. XV, no. 3, pp. 205–210. (In Russian).

Popovnin V.V., Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Chernomorets S.S. Glyacial'naya katastrofa 2002 goda v Severnoj Osetii [Glacial catastrophe of 2002 in North Ossetia] *Kriosfera Zemli* [*Cryosphere of the Earth*], 2003, vol. VII, no. 1, pp. 56–77. (In Russian).

Rototaev K.P., Khodakov V.G., Krenke A.N. Podvizhka lednika Kolka v 1969–1970 godah [The movement of the Kolka glacier in 1969–1970]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra* [*Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow*], Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 23–29. (In Russian).

Tavasiev R.A. O nekotoryh diskussionnyh voprosah, svyazannyh s katastroficheskim skhodom lednika Kolka [On some controversial issues related to the catastrophic descent of the Kolka glacier]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra* [*Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow*], Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 272–283. (In Russian).

Tutubalina O.V., Chernomorets S.S., Petrakov D.A. Lednik Kolka pered katastrofoj 2002 goda: novye dannye [Kolka glacier before the catastrophe of 2002: new data]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra* [*Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow*], Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 62–71. (In Russian).

Chernomorets S.S., Adtseev V.G. Lednikovye katastrofy v Genaldonskom ushel'e: vzglyad v

proshloe [Glacial catastrophes in the Genaldon Gorge: a look into the past]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra* [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow], Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 329–426. (In Russian).

Chotchaev Kh.O., Maliev I.N. O gidrodinamicheskoy i gazodinamicheskoy gipotezah prichin skhoda lednika Kolka 20 sentyabrya 2002 g. [On hydrodynamic and gas-dynamic hypotheses of the causes of the collapse of the Kolka glacier on September 20, 2002]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra* [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow], Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 265–270. (In Russian).

Steber. E.A. Ledovye obvaly v istokah Genal-dona [Ice collapses in the sources of the Genal-don] *Terskij sbornik: Literaturno-nauchnoe prilozhenie k Terskomu kalendaryu 1903 g* [Tersk collection: A literary and scientific appendix to the Tersk calendar 1903], 1904, iss. 6, pp. 233–248. (In Russian).