



В.Н. Дробышев

КОРОТКО О ГЛАВНОМ

2002 год оказался для Северной Осетии – небольшой северокавказской республики – бедственным годом. 21 июня территорию республики пересек катастрофический ливень. Тысячи больших, огромных и маленьких селевых потоков произвели опустошительные разрушения дорог, ЛЭП, мостов, жилых и производственных построек в горах. Северная часть территории горной Осетии надолго была парализована. Через три месяца весть о новой трагедии – в Геналдонском ущелье облетела весь мир.

Мрачная известность небольшого ледника Колка [16], расположенного на северном склоне Бокового хребта Центрального Кавказа, недалеко от Казбека, была подкреплена очередным его катастрофическим обрушением, происшедшим 20 сентября 2002 года (рис. 1).

Катастрофа произошла под покровом глубоких сумерек и необычайно стремительно. Скорость продвижения ледникового обвала вниз по Геналдонскому ущелью, по оценкам очевидцев, составляла 200–300 км/час. Немногим более 6 минут понадобилось ледовой лавине, чтобы преодолеть путь длиной 19 километров, оставив за собой гигантский след, шириной более 500 метров (рис. 2). Наплески передовой волны на борта ущелья поднимались до 200–250 метров. Естественной преградой для дальнейшего продвижения гигантской лавины послужил эскарп Скалистого хребта, при пересечении которого Геналдонское ущелье теряет свой

Гляциальная катастрофа Северной Осетии 20 сентября 2002 года

В.Н. Дробышев*

классический торговый вид и превращается в глубокий и узкий каньон. Однако каньон не послужил препятствием для грязе-ледовой волны, образованной перед фронтом лавины. Селевой вал высотой до 30–40 метров преодолел 5,5 километра теснины шириной 30–80 м на скорости, превышающей 100 км/час. И только после выхода из зоны Скалистого хребта, где ущелье опять существенно расширяется, волна начала замедлять свой ход, пройдя еще почти 12 километров. До крупного равнинного селения Гизель осталось 2 км. Таким образом, общая протяженность зоны поражения катастрофическим процессом достигла почти 37 километров, покрыв площадь 15,7 км² [8;15] (рис. 3).

Немногочисленные очевидцы движения лавины – коренные жители Кармадонской котловины моментально догадались, что падает ледник Колка (рис. 4). Старинные осетинские села в этом ущелье расположены высоко над рекой – вне досягаемости лавины. Издревле горцы знали о периодических обвалах этого ледника. Обрывочные сведения о катастрофическом обвале

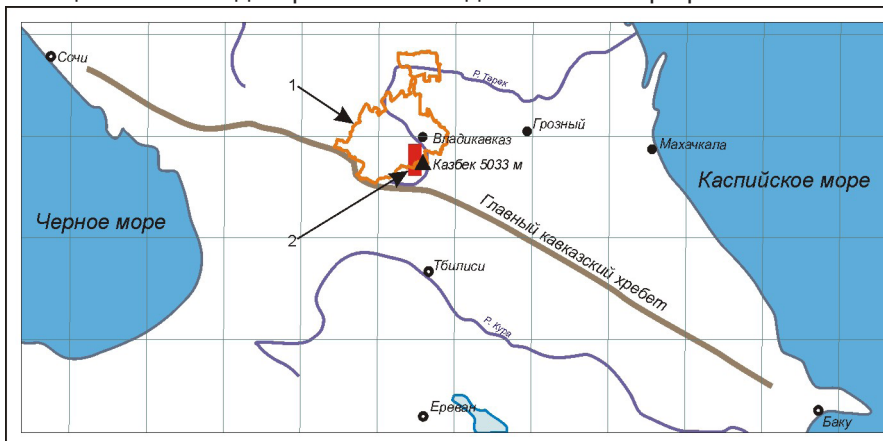


Рис. 1. Географическая экспликация области гляциологической катастрофы 20 сентября 2002 года в Геналдонском ущелье Северной Осетии (РСО-А): 1 – граница РСО-А, 2 – область гляциальной катастрофы

* Дробышев В.Н. – инженер ВНИЦ РАН и РСО-А.

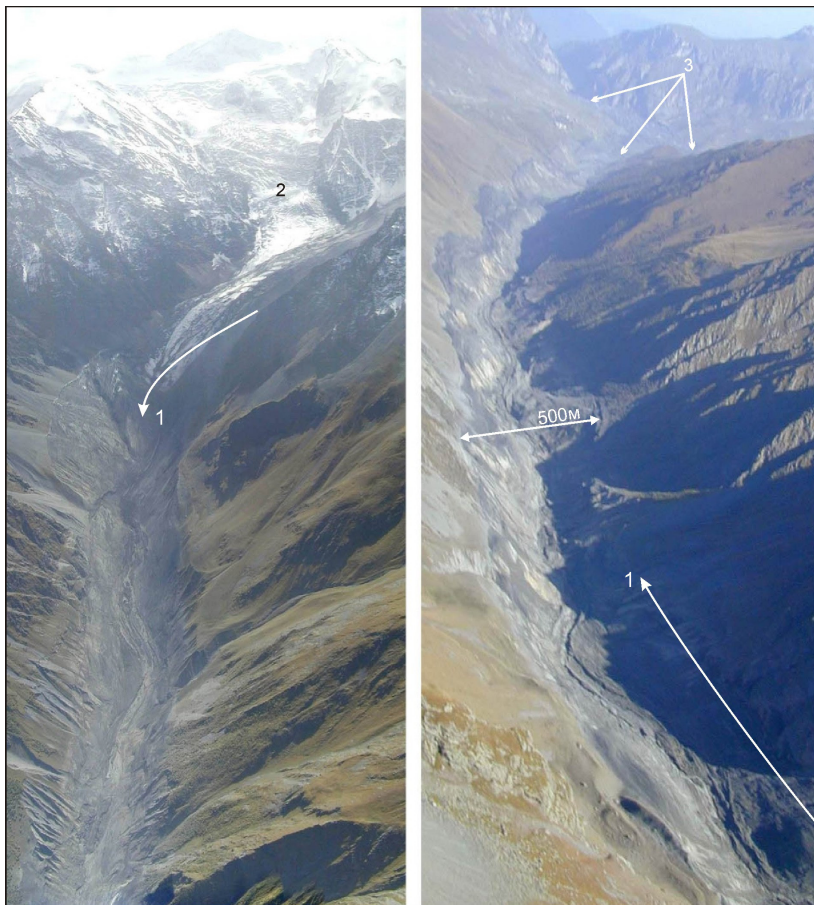


Рис. 2. Геналдонское ущелье. След, оставленный ледниковой лавиной 20 сентября 2002 года: 1 – траектория движения обвала, 2 – ледник Майли, 3 – Кармадонская котловина, зона остановки ледово-каменной составляющей обвала

1835 года сменяются гораздо более детальным описанием катастрофы 3 июля 1902 года, выполненным Р.Р. Лейцингером. По его свидетельству, в обвале погибло 32 человека и более 1700 голов скота. На третьи сутки после катастрофы по ущелью пронесся еще один обвал, в который попало 4 человека, занимавшихся поиском пропавших. Тогда ледовая масса остановилась в 6 км от эскарпа Скалистого хребта. В подвижке, начавшейся осенью 1969 года, Колка проявил себя по всем канонам пульсирующего ледника. Его поверхность растрескалась, и ледовый язык выдвигался с переменной скоростью вниз по долине в течение пяти месяцев, преодолев, в общей сложности, путь длиной 4,6 километра. Тогда ледник не

покидал своего ложа. Погибших не было (рис. 5). Заметим, что упомянутые катастрофы происходили ровно через 67 лет [12; 13; 22].

Новая катастрофа оказалась полной неожиданностью. Исторически сформированное мнение о периодичности геналдонских катастроф позволяло надеяться еще на лет 30 спокойных, однако природа ледника оказалась гораздо сложнее. «График» был нарушен.

По официальным данным, на 10 ноября 2002 года обнаружены останки 18 погибших, пропавшими без вести считаются 108 человек. В зоне поражения оказался 24-километровый участок дороги местного значения. Небольшой, относительно новый поселок, построенный на берегу р. Геналдон в

Рис. 3. Космические снимки области поражения катастрофическим обвалом ледника Колка 20 сентября 2002 г. Монтаж из двух снимков: нижний, спектрзональный – 6 октября 2002, верхний, в натуральных цветах, – 25 сентября 2002. 1 – сел. Гизель; 2 – зона поражения грязе-ледовым селевым выбросом; 3 – каньон в Скалистом хребте; 4 – зона остановки ледового обвала в Кармадонской котловине; 5 – р. Гизельдон; 6 – озеро Саниба; 7 – зона транзита и ее протяженность; 8 – ледник Майли; 9 – ледник Колка

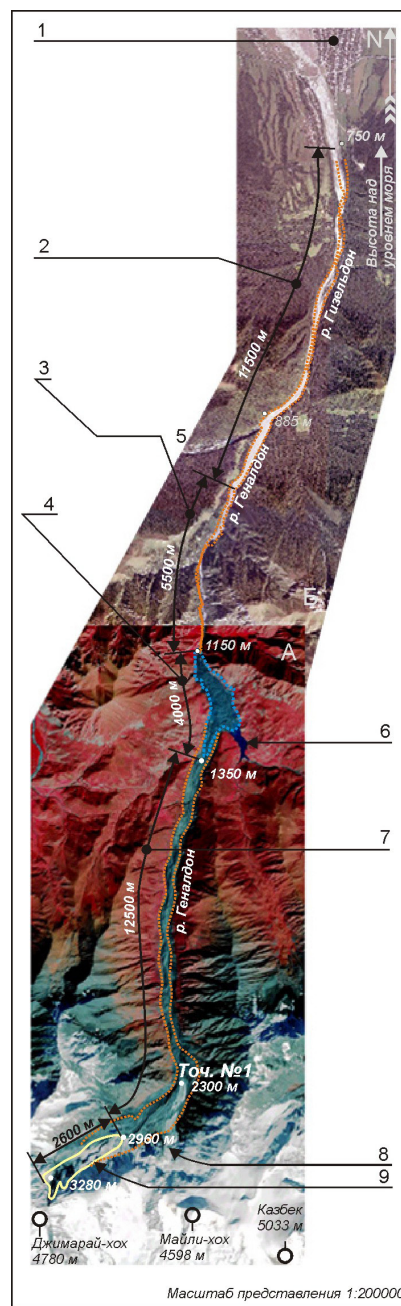




Рис. 4. Кармадонская котловина. Остановка ледникового обвала в створе эскарпа Скалистого хребта. 1 – сел. Верхнее Кани; 2 – сел. Нижнее Кани; 3 – подпрудное озеро Саниба; 4 – сел. Горная Саниба; 5 – Геналдонское ущелье; 6 – каньон в Скалистом хребте

Кармадонской котловине, был стерт с лица земли. Две базы отдыха, расположенные у выхода из каньона, были сметены селевой волной. Значительные повреждения получили еще более отдаленные строения. Следует отметить также, что в течение первых недель после катастрофы площадь поражения прирастала за счет наполнения подпрудного озера, образованного правым притоком р. Геналдон, выход которого был перекрыт ледовым завалом.

Ледник Колка уже давно вызывает повышенный интерес у специалистов, как нестабильное природное образование, представляющее угрозу. Оперативное обследование зоны катастрофы позволило уже в первые дни конкретизировать в цифрах ее масштабы, сделать первые предположения о причинах ее возникновения и возможных последствиях [2].

ОЧАГ КАТАСТРОФЫ

Верховья Геналдонского ущелья замыкаются с юга цепью трех величественных вершин: Казбек (5 033 м), Майли-хох (4 598 м), Джимарай-хох (4 780 м), входящих в состав Бокового хребта Центрального Кавказа. Северный отрог Джимарай-хох, содержащий не менее значительную вершину Шау-хох (4 636 м), запирает ущелье с запада и северо-запада, образуя чашу, которую и занимает небольшой ледник Колка длиной 3,1 км (2,6 км + 0,5 км). Систему перечисленных вершин условно объединяют в отдельный высокогорный массив, известный под названием Казбеко-Джимарайский. К массиву приурочен мощный узел оледенения, площадь которого достигает 13 км². Крупнейшим его ледником является Май-



Рис. 5. Язык ледника Колка (темный лед) после пульсации. 1970 г. 1 – ледник Майли; 2 – вершина Майли-хох (4 598 м)

лийский, покрывающий около 7 км². Зона питания этого ледника, охватывая северо-западные склоны Казбека и северные склоны в. Майли-хох, дренируется в Геналдонское ущелье грандиозным ледопадом. Язык ледника спускается до высоты 2 300 м (рис. 6) [15].

В отличие от классического долинного ледника Майли, ледник Колка классифицируется как карово-долинный, лавинного питания. Зону питания этого ледника составляют фирновые поля северо-восточных склонов Джимарай-хох, не имеющие смыкания с самим ледником. Их мощность варьирует от 40 до 70 метров. Перемещение фирновой массы на язык ледника осуществляется лавинным путем на расстояние около одного километра по крутому (около 40°) склону с вовлечением значительного количества литогенного материала. Этот фактор определяет образование плотного чехла поверхностной морены, покрывающей практически весь ледник. Толщина моренного покрова возрастает с приближением к фронтальной части языка (отм. 2 960 м) и достигает 80 см. Ложе ледника имеет в продольном направлении весьма небольшой уклон, порядка 6° ÷ 7°, что определяло относительно низкую динамику пластических деформа-



Рис. 6. Район очага гляциальной катастрофы 20 сентября 2002 года
1 – верш. Казбек (5 033 м); 2 – верш. Майли-хох (4 598 м); 3 – верш. Джимарай-хох (4 778 м); 4 – верш. Шау-хох (4 636 м); 5 – ложе ледника Колка; 6 – ледник Майли; 7 – Геналдонское ущелье

ций в его теле. Отдельные трещины наблюдались только в тыловой области ледника (рис. 7) [8; 9].

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА КАТАСТРОФЫ

Геологическое строение верховьев Геналдонского ущелья весьма сложное. Пачки осадочных и вулканогенных пород тектонически составляют юго-восточный склон Шаухохской антиклинали, в ядре которой вскрывается диоритовое тело. В районе ледника Колка обнажения позднепалеоценовых диоритов расположены в нижней части левого борта майлийского ледопада и в нижней (обнаженной в результате схода ледника) части восточной стены Джимарай-хох.

Широко развиты дайки Казбекского диабазового пояса. Казбек не относится к категории потухших вулканов. В новейшее время пик его магматической активности приходится на 280–180 тыс. лет назад. Следующий всплеск произошел около 50 тыс. лет назад, а последние проявления активности датируются около 10 000 и 6 000 лет тому назад [3; 17].

Неотектоническая активность района в настоящее время определяется как весьма существенная. ВДЗК (вертикальные движения земной коры) достигают 7–9 мм/год (максимальные

для Кавказа). Следует особо отметить, что значение ВДЗК резко падает в направлении от хребта казбек-джимарайского массива на север. Через 2–4 км этот показатель снижается до 4 мм/год. Возможно, что столь значительное изменение показателя ВДЗК в меридиональном направлении и предопределяет очень высокую активность осыпного процесса по склонам в. Джимарай-хох – основного архитектурного компонента гляциальной области ледника Колка.

Геологическое строение района свидетельствует об интенсивном тектоническом режиме в рассматриваемом блоке земной коры. Многочисленные разломы различных рангов пересекают территорию, как в широтном, так и в меридиональном направлениях, определяя взбросовые и надвиговые деформации составляющей толщи горных пород.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Гляциальная зона ледника Колка полностью входит в состав нивальной зоны. Средние годовые температуры воздуха положительны до высоты 2 000–2 300 м, а выше – отрицательны и на высоте 4 000 м достигают -10°C . Распределение осадков по территории бассейна весьма неравномерно как во времени, так и в пространстве. По данным К.П. Рототаева, характерен летний максимум, связанный с активизацией холодных фронтов атлантических циклонов. При антициклональных условиях в летний период большая доля осадков обеспечивается местной вертикальной конвекцией. Максимум дней с твердыми осадками приходится на январь. Распределение



Рис. 7. Ледник Колка в 2000 году

количества осадков по временам года следующее: летом – 500 мм и более, осенью – 100–150 мм, зимой – 150–200, весной – 200 мм и более [11].

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ КАТАСТРОФЫ

Сведения об аномальной активизации обвалов фирновых полей Джимарай-хох начали поступать в конце июля 2002 года. Редкие туристы, посетившие этот отдаленный высокогорный район, фотографировали разрушающиеся фирновые поля, собственно обвалы и конус выноса обвального материала на поверхности ледника Колка (рис. 8.1).

На фотографии 8.1, сделанной в конце августа 2002 года, запечатлен покров обвального материала на леднике Колка. На фотографии 8.2 (рис. 7), сделанной в августе 2000 г., изображена поверхность ледника Колка без обвального покрова. Фотографии сделаны с разных точек, расстояние между которыми относительно невелико (30–50 метров). В поле фотографии 8.1 построена фигура а-с-в (ломаная линия), соединяющая легко опознаваемые на обеих фотографиях приметные точки-ориентиры. В этой же плоскости добавлена линия проекции видимого уровня поверхности ледника с-d (пунктир). Затем, под жесткую копию полученной векторной фигуры, подведена фотография 8.2 и совмещена (путем прямоугольного трансформирования и вращения) по обозначенным точкам-ориентирам. Этот прием позволяет нам перенести на фотографию 2000 года положение линии, характеризующей уровень дневной поверхности ледника в августе 2002 года. Фактическое расстояние между пунктами с и в составляет более 800 метров. Остается заметить, что подъем уровня дневной поверхности ледника Колка (в области покрова обвалившимся материалом) относительно августа 2000 года (пунктирная линия C_{2000} – D_{2000}) составляет на август 2002 года 30–50 метров.

Эти места известны своими частыми и впечатляющими лавинами в любое время года, и поэтому никто не мог предвидеть такого трагического финала в этом зрелище. Следует отметить, что полоса прохождения катастрофического ливня, о котором упоминалось вначале, легла на 2–3 км севернее и не задела гляциальную область ледника Колка.

Чем же было вызвано столь грозное явление природы?

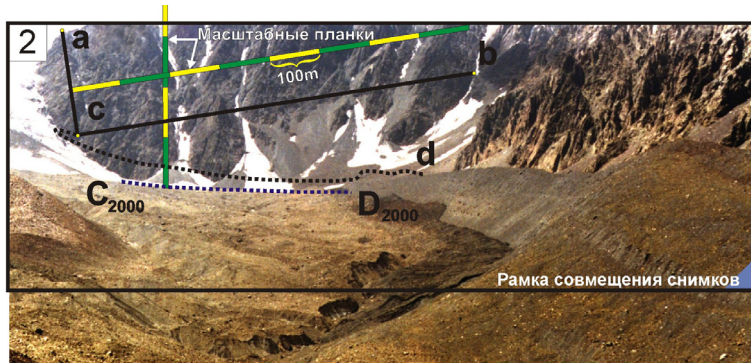
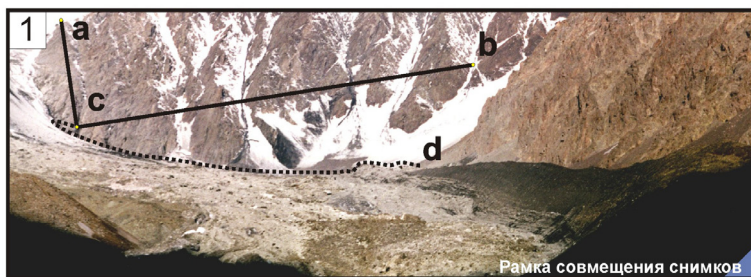


Рис. 8.

Одной из попыток поиска ответа на этот вопрос стала работа по реконструкции фактора сейсмического воздействия на территории Северной Осетии аналитическим (расчетным) методом. Расчеты проводились по уравнению:

$$B = b_1 M_{LH} - b_2 \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + b_3$$

где B – балл сотрясения по шкале MSK-64

M_{LH} – локальная магнитуда

Δ – эпицентральный расстояние (км)

h – глубина очага землетрясения (км)

($b_1=1,6$; $b_2=3,1$; $b_3=2,2$) – коэффициенты уравнения для территории Северного Кавказа [14].

В результате в 2002 году для каждого месяца были получены макросейсмические поля, «балл максимального сейсмического воздействия», по которым стало возможным оценивать рассматриваемый фактор в любой, даже самой труднодоступной точке [4]. Оказалось, что 14 июля 2002 года массив вершины Джимарай-хох был подвержен сотрясению в 5,2 балла по шкале MSK-64. Эпицентр этого землетрясения находился в 8 км к западу от вершины Джимарай-хох. В исходной выборке KMV-2002 это мелкофокусное землетрясение значится под № 244. Его главные параметры:

№ 244 ($M_d = 3,88$; $K = 9,8$; $DEPTH = 5,4$ км).

В этот же день произошли еще два землетрясения:

№ 245 ($M_d = 3,11$; $K = 8,3$)

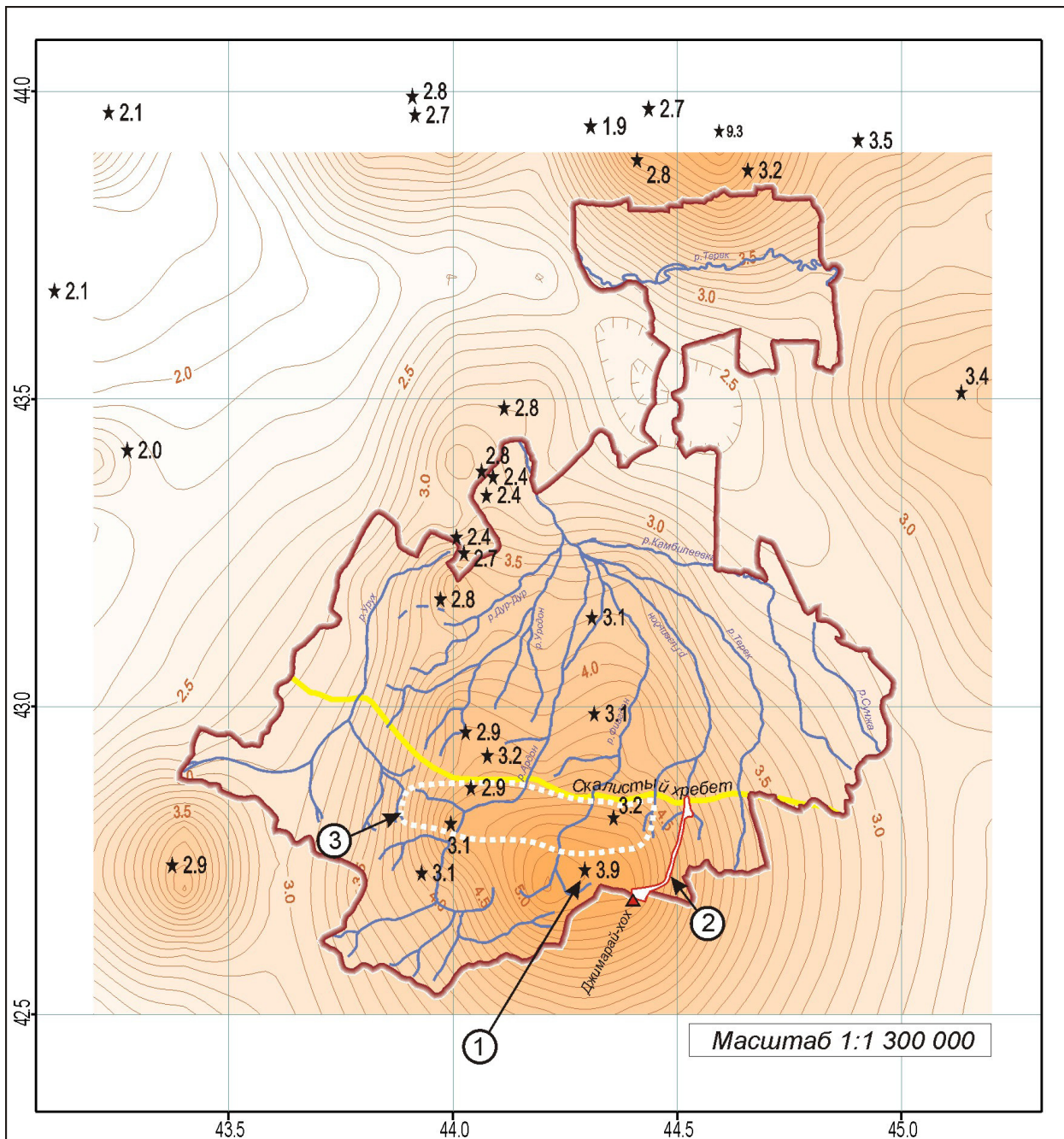


Рис. 9. Расчетное макросейсмическое поле на июль 2002 года для территории РСО-А. Исходный каталог: KMV-2002

1. Эпицентр землетрясения № 244 (14 июля 2002 года; $M_d = 3.88$; $K = 9.8$; $DEPTH = 5.4 \text{ km}$).
2. Область гляциальной катастрофы. 3. Зона оползневой активизации в июле 2002 года.

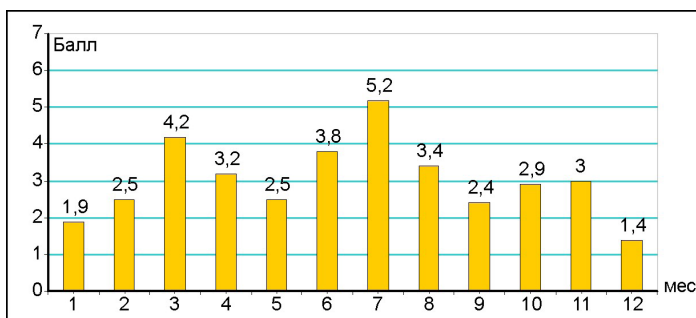


Рис. 10. Диаграмма распределения по месяцам максимального сейсмического воздействия на массив Джимарай-хох в 2002 году (N42,72; E44,42)
 Расчет выполнен по выборке: KMV-2002;
 N 41,00° – 45,00°; E 42,00° – 46,00°.

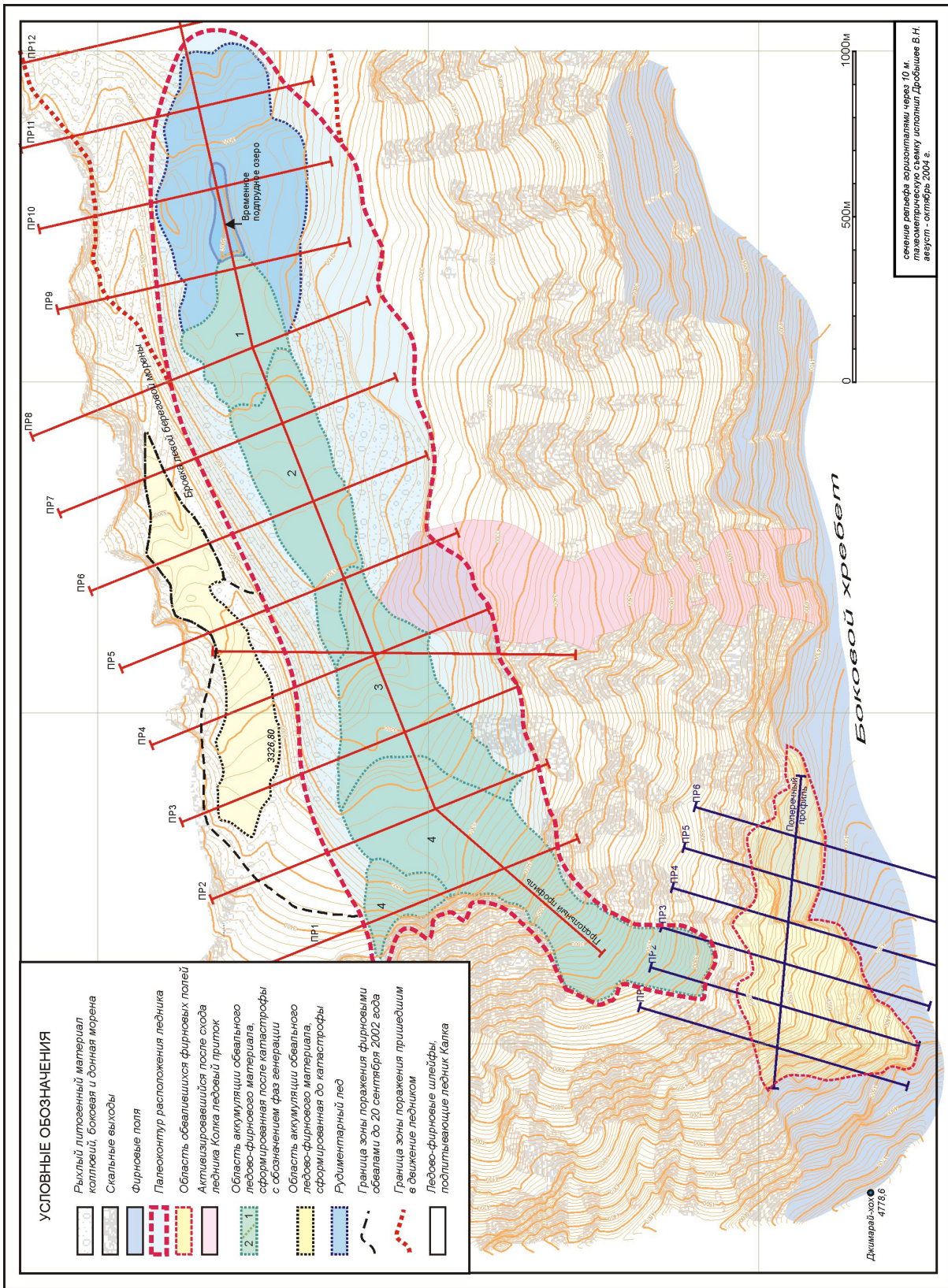


Рис. 11. Гляциальная область ледника Колка. Топографический план

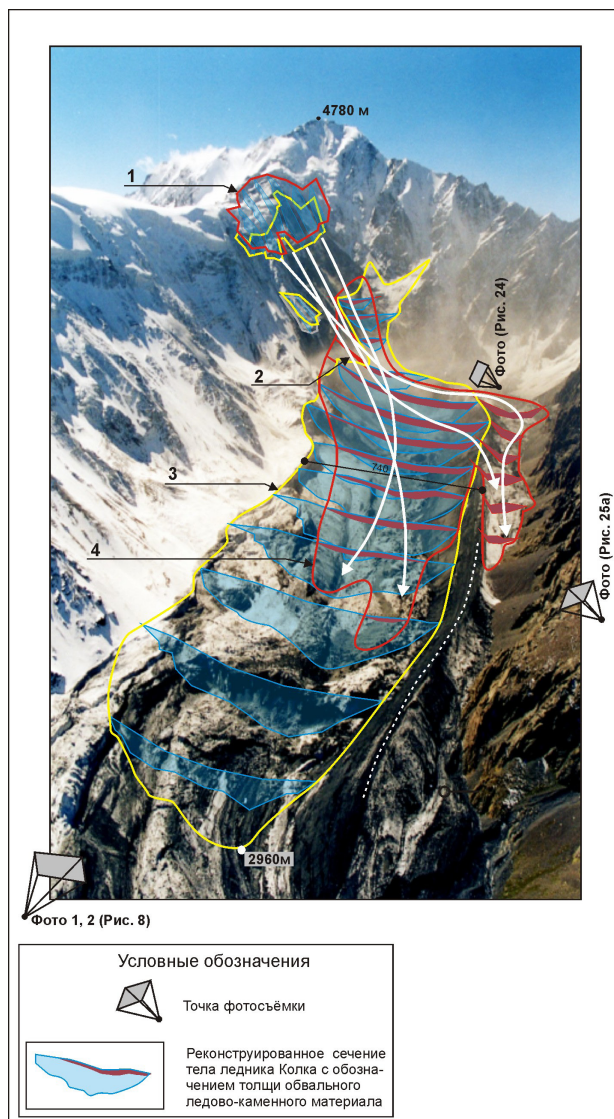


Рис. 12. Гляциальная область ледника Колка после обрушения

На снимке показана идеология реконструкции облика ледникового тела и обрушенных фирновых полей по состоянию на 2000 год: 1 – реконструкция геометрии обрушенного фирнового поля; 2 – траектории обвалов; 3 – палеограница ледника Колка; 4 – граница зоны аккумуляции фирновых обвалов на поверхности ледника

№ 246 ($M_d = 3,20$; $K = 8,4$).

Землетрясение № 246 зарегистрировано на расстоянии 10 км к северо-западу от верш. Джимарай-хох. Хронологически с этими землетрясениями связывается начало оползневой активизации на локальном участке зоны Северной сланцевой депрессии, которая примыкает с юга к Скалистому хребту и отличается большим количеством оползневых деформаций. Ширина зоны колеблется от 5 до 7 км (рис. 9). Диаграмма, представленная на рис. 10, четко выявляет ано-

мальность уровня сейсмического воздействия на массив Джимарай-хох в июле 2002 года.

В качестве дополнительной информации, конкретизирующей интенсивность сейсмического воздействия на область очага гляциальной катастрофы, необходимо отметить, что колебательное движение (соответствующее 5 баллам), сообщенное пирамиде Джимарай-хох от землетрясения № 244, имело параметры:

ускорение (a) $\sim 0,28$ м/сек²

скорость смещения (v) $\sim 0,056$ м/сек

абсолютная величина смещения (L) $\sim 0,04$ м [19].

Испытывал ли массив Джимарай-хох за предшествующие 10–15 лет более мощные сейсмические воздействия? Ответить на этот вопрос нам помогает исследование сейсмологического плана, проведенное под руководством А.И. Савича, которым рекомендовано рассчитывать балл сотрясения от землетрясений, происходящих в зоне Южного крыла Кавказского поднятия, для областей Центрального поднятия по уравнению:

$$J_{\Delta} = 1.42M - 2.53 \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 1.0$$

или

$$J_{\Delta} = 1.42M - 2.21 \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 1.0$$

Согласно этим уравнениям, расчетное сотрясение для Джимарай-хох от Рачинского (MPSP = 6,6; 29.04.91 г.) и Борисахского (MPSP = 6,6; 23.10.92 г.) землетрясений достигало 5,65 балла. Более сильное сейсмическое воздействие не констатировалось [18].

РЕКОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНЫХ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ОБРУШЕНИЯ ЛЕДНИКОВОГО КОМПЛЕКСА КОЛКА

Процедура реконструкции геометрии поверхности исчезнувших объектов – ледника и фирнового поля – была основана на выполнении тахеометрической съемки гляциальной области ледника Колка с подробностью, соответствующей масштабу 1:5 000 (рис. 11). Затем, после изготовления топографического плана, через ложе ледника было построено 12 поперечных профилей, параллельных друг другу и расположенных через 250 м, и один продольный профиль по тальвегу долины. Реконструкция профиля дневной поверхности ледника на момент перед началом движения проводилась в каждом створе с применением метода распространения признака: достаточно четкий след на внутреннем скате левой береговой морены, отображающий уровень поверхности ледника, сопрягался с кромкой отрыва, протянувшейся вдоль всего правого борта ледника. Поиск наиболее вероятного облика искомой линии на поперечных профилях сопровождался построением продольного про-

филя, вносящего некоторые коррективы на уровне детализации. На этом же уровне проводилась доработка профилей с целью достижения максимального соответствия формы реконструируемой поверхности с морфологией поверхности ледника, изображенной на рис. 8.1. Аналогичные действия были проведены и для зоны обрушения фирновых полей. Идеология примененного метода продемонстрирована на рис. 12. Затем все поверхности были построены в формате 3D (рис. 13) для получения доступа к автоматизированному расчету объемов обвалившихся частей висячих ледников. Результаты расчета следующие:

1. Объем обрушенного на ледник фирна: $V_{\text{фирн}} = 22 \text{ млн м}^3$.

2. Объем льда, вовлеченного в катастрофическую подвижку 20 сентября 2002 года (включая обвалившийся материал): $V_{\text{лед}_1} = 137 \text{ млн м}^3$.

Грандиозное по своим масштабам обрушение ледника Колка было зафиксировано многими сейсмостанциями Кавказа. Наиболее полная запись (продолжительностью около 16 минут) проведена региональной сейсмической станцией «Цей», расположенной в 44 км к западу от очага катастрофы. Подробное описание сейсмограммы с указанием времени вступления и прекращения работы сейсмографов изложено в статье А.А. Годзиковской [1]. Главным результатом исследования можно считать выявление высокой изменчивости по времени всех характеристик записи, причем – скачкообразной изменчивости. Такая специфичность позволяет рассмотреть сейсмограмму рассмотреть поинтервально:

1. 16:05:13,0 – вступление записи (время по Гринвичу: час-мин-сек).

2. 16:05:13,0–16:09:05,0 – шумы на уровне чувствительности с/приемников.

3. 16:09:05,0–16:10:21,0 – интервал заметного увеличения амплитуд.

4. 16:10:21,0–16:15:30,0 – интервал существенного увеличения амплитуд.

5. 16:15:30,0–16:21:10,0 – интервал заметного уменьшения амплитуд.

6. 16:21:10,0 – окончание записи.

На рис. 14 детально отображены только 3-й и 4-й интервалы, для которых был произведен расчет уровня излучения сейсмической

энергии движущимся ледником [5] по сейсмограмме с/с «FIG» локальной сети «Альфа-геон».

Учитывая то, что описание процесса опирается в основном на косвенные факты, его следует воспринимать как гипотезу.

Исходя из обозначенных данных, опыта и опираясь на фундаментальные законы физики, можно заметить, что начальная скорость активного тела была равна нулю.

1. Никакого крупномасштабного удара, способного сообщить телу ледника массой 137 000 000 т значительное (дополнительное) ускорение, сейсмографами не зафиксировано.

2. Процесс аккумуляции обвалившегося материала в тыловой части ледника продолжался более двух месяцев. Рассмотрение фотографий 1 и 2 (рис. 8) позволяет убедиться в том, что обвалы с фирновых полей образовали обширный и достаточно мощный покровный конус выноса на поверхности ледника Колка уже в конце августа 2002 года. Сдвиговые напряжения в теле ледника возрастали, пока не достигли критических величин. Интервал № 2 на сейсмограмме с/с «Цей» (16:05:13,0 – 16:09:05,0) можно рассматривать как стадию стремительного развития системы разрывных нарушений в активном теле

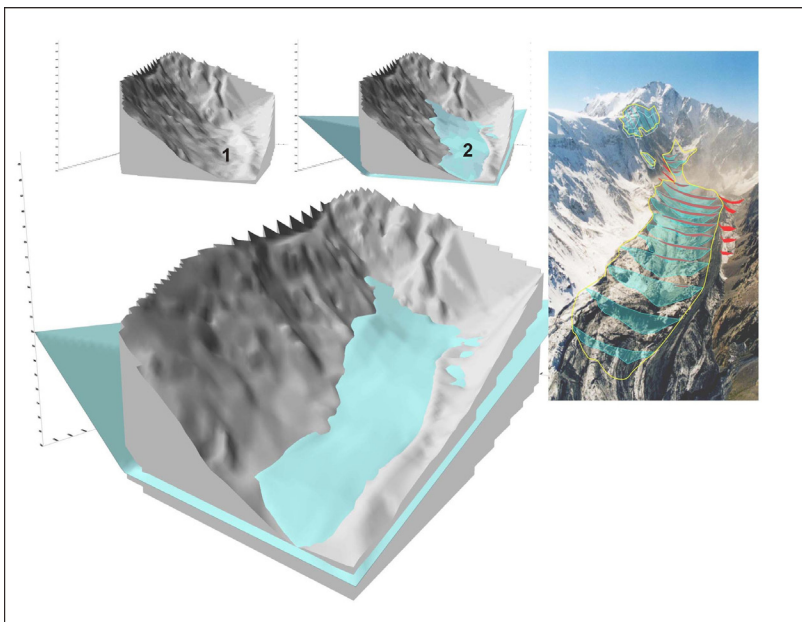


Рис. 13. Реконструкция поверхности обрушенного ледника по материалам топографической съемки гляциальной области ледника Колка

В программе Surfer была построена модель физической поверхности (1) и палеоповерхности ушедшего ледника (2). Реконструкция проведена с использованием «принципа распространения признака», т. е. проведена процедура сопряжения бровок отрыва (правый борт) и следов уровня поверхности на левой береговой морене с учетом фотоинформации (рис. 9а). Все это выполнено в численном варианте. После совмещения поверхностей в едином координатном поле была использована опция программы, вычисляющая объем отсеченного пространства

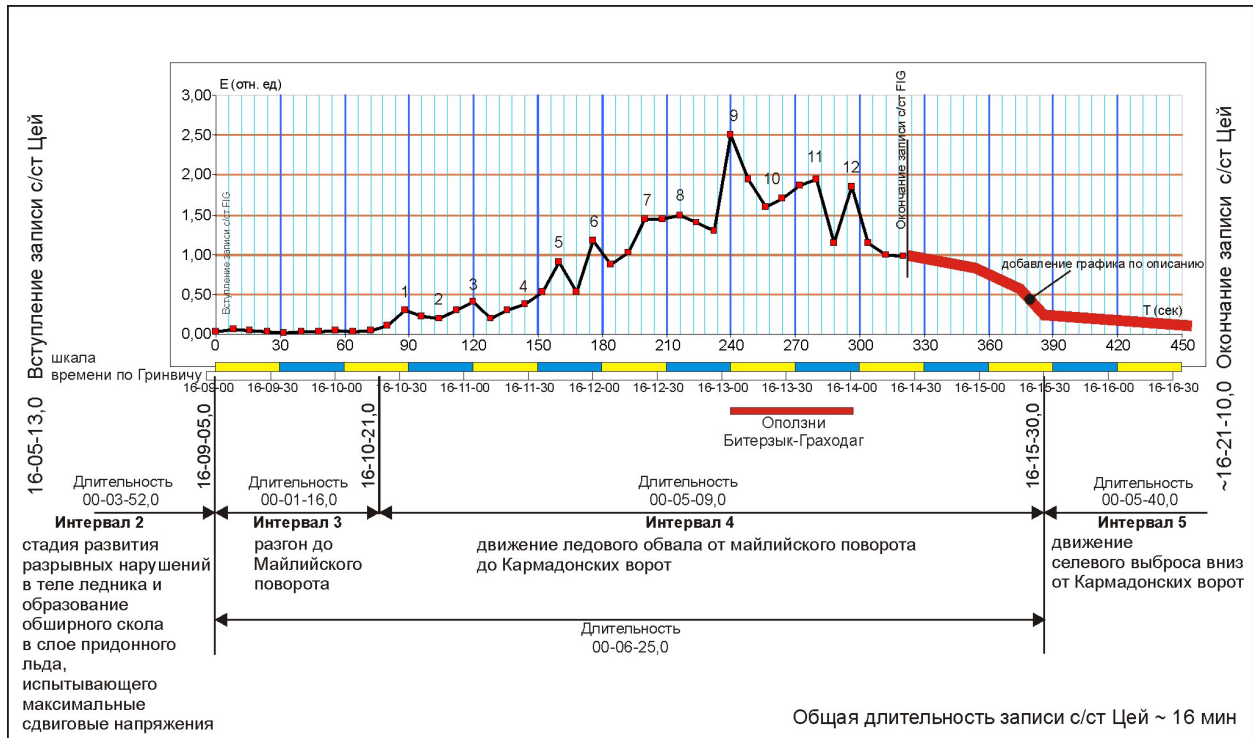


Рис. 14. Синхронное размещение графика суммарного вектора энергии (В.Б. Заалишвили, Н.И. Невская, А.К. Харебов), рассчитанного по сейсмограмме с/ст FIG (прерванной на 320-й сек. после вступления) в интервалах времени, обозначенных А.А. Годзиковской по записи Цейской сейсмостанции. Фазы развития ледникового обвала в Геналдонском ущелье Северной Осетии 20 сентября 2002 года выделены по совокупному анализу сейсмологической информации, морфометрии пути транзита и особенностей кинематики движения ледовой массы

ледника, приведших к образованию обширного скола в слое донного льда (рис. 12), испытывающего наибольшие сдвиговые напряжения. Ледниковое тело теряет устойчивость. Амплитудные характеристики сейсмических волн в границах этого временного интервала в 10–40 раз меньше, чем в границах интервала № 3.

3. Величина сейсмического эффекта, установившаяся после 16:09:05, стала достаточной для вступления сейсмографов локальной сети «Альфа-геон» (в том числе и с/с «FIG»). Это можно трактовать, как начало «равноускоренного» движения активного тела ледника под действием силы тяжести.

Потерявшее устойчивость ледниковое тело начало движение по ледниковому ложу в продольном направлении с уклоном 6° – 7° , получая ускорение, примерно 1 м/сек^2 . При таком ускорении скорость 220 км/час достигается через 60 секунд при длине разгона 1800 м . Примерная длина пути разгона центра массы для тыловой половины ледника: $L \sim 2000 \text{ м}$. В границах собственного ложа движение ледовых масс может быть рассмотрено (с большой долей достоверности) как поступательное. В момент образования скола площадью около 2 км^2 была преодолена сила сцепления: $C = 7+8 \text{ т/м}^2$. Коэффициент

трения – лед по льду – очень мал. Для полуколичественных вычислений его вариациями можно пренебречь. Этот предельно упрощенный расчет позволяет воспринимать свидетельства о чрезвычайно высоких скоростях катастрофического обвала как не противоречащие закономерностям движения физического тела в данных условиях (рис. 15).

Разгон активного тела фиксируется сейсмографами на протяжении 1 мин 16 сек (интервал № 3 на сейсмограмме с/с «Цей»). За такое время активное тело разгоняется до скорости 220 – 240 км/час на дистанции около 2 км . На 80 – 90 -й секунде фронт лавины достигает Майлийской морены и, отражаясь от нее, начинает «плавный» поворот влево на значительный угол (до 500). В этом повороте наплеск лавины по правому борту поднялся до высоты 250 м над тальвегом (в поперечном створе). Левый фланг, пройдя вдоль тальвега р. Колка-дон, оставил след по левому борту ущелья, в этом же створе, на высоте 30 – 40 м . Такая разница высот, при общей ширине следа $\sim 700 \text{ м}$, очевидно, объясняется значительностью центробежной силы, возникшей при осуществлении поворота на большой скорости. Сейсмографы фиксируют первое сильное собитие. На космическом снимке (рис. 3) это место

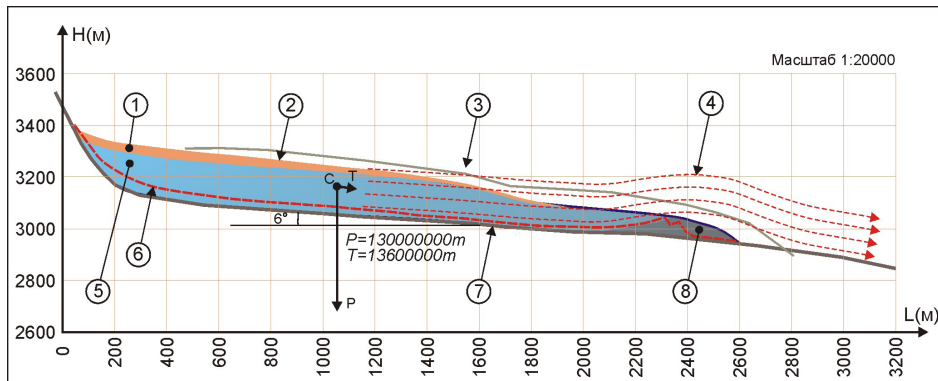


Рис. 15. Реконструкция продольного вертикального сечения тела ледника Колка по топооснове М 1:10 000 и фотографиям, сделанным после его катастрофического обрушения. Полученное сечение позволяет определить угол наклона тальвега ложа – 6° , величину скатывающей силы $T = 13\ 600\ 000\ \text{т}$, схематично интерпретировать слой обвального материала на поверхности ледника по состоянию на конец августа 2002 года и положение ледово-каменной брекчия, играющей роль сдерживающей дамбы

1. Толща обвального ледово-каменного материала в момент катастрофы
2. Поверхность ледника
3. Бровка левой боковой морены
4. Траектория движения ледовой массы
5. Тело ледника Колка
6. Поверхность срыва ледника
7. Ложе ледника (тальвег долины)
8. Ледово-каменная брекчия

обозначено точкой № 1. На диаграмме «Распределение во времени суммарного вектора энергии» (рис.14) точка № 1 отмечена по временной шкале. Момент вступления с/с «FIG» привязан к шкале времени с/с «Цей» и определен как 16:09:05 по Гринвичу. Далее движение лавины следовало по довольно прямолинейному тропу, ширина поймы в котором колеблется в пределах $100 \div 150\ \text{м}$, а склоны сложены рыхлыми отложениями с крутизной поверхности $30^\circ \div 40^\circ$. Нерезкие выходы скальных останцев расположены, в основном, по правому борту долины. Протяженность этого участка – $9,5\ \text{км}$. В его границах след лавины напминает след слаломиста. Максимальная высота наплесков – $180\ \text{м}$, минимальная – $10 \div 20\ \text{м}$, длина дуги каждого поворота – не менее $1\ 000\ \text{м}$. Особое внимание обращает на себя точка № 9, соответствующая абсолютному максимуму излучения сейсмической энергии движущимся ледником. Здесь наплеск по правому борту ущелья поднялся на $248\ \text{метров}$ над тальвегом долины.

В таблице 1 показаны результаты вычислений, лежащие в основе графика скоростей движения ледникового обвала по Геналдонскому ущелью (рис. 16, линия 2).

Структура расчетной таблицы следующая:

1. Название объекта или номер точки траектории
2. Расстояние между соседними пунктами
3. Расстояние от стены Джимарай-хох
4. Величина ускорения активного тела на начальном этапе движения
5. Время, затраченное на преодоление дистанции от предыдущего пункта
6. Время от момента начала движения
7. Время по сейсмограмме
8. Расчетная скорость (м/сек)
9. Расчетная скорость (км/час).

Цель расчета: получение графика распределения скорости для движения ледникового обвала на пути от стены Джимарай-хох до ство-

Таблица 1
Расчет длительности времени прохождения ледового обвала по Геналдонскому ущелью

Точки	DL (м)	сумм L (м)	ускор(м/сек ²)	T (сек)	T (сек) сумм	T (сек) СЕЙ	V (м/сек)	V (км/час)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
стена Дж	500	500		0	0	0	0	0
Центр тыл	2200	2700	0,8	74,16	74,16		59,33	213,59
отм. 2960	2150	4850		34,90	109,06	87,00	63,89	230,00
1	1500	6350		23,74	132,80	103,00	62,50	225,00
2	900	7250		14,43	147,23	120,00	62,22	224,00
3	850	8100		13,69	160,92	142,00	61,94	223,00
4	950	9050		15,41	176,32	160,00	61,39	221,00
5	1050	10100		17,18	193,51	176,00	60,83	219,00
6	950	11050		15,69	209,19	200,00	60,28	217,00
7	700	11750		11,67	220,86	217,00	59,72	215,00
8	800	12550		13,55	234,41	240,00	58,33	210,00
9	900	13450		15,80	250,22	257,00	55,56	200,00
10	550	14000		10,29	260,50	280,00	51,39	185,00
11	500	14500		10,00	270,50	297,00	48,61	175,00
12	2300	16800		50,18	320,69	320,00	43,06	155,00
рубеж	1200	18000		28,33	349,01		41,67	150,00
с. Генал	1500	19500		36,61	385,62		40,28	145,00
туннель								
сумма	19500			385,62				

ра эскарпа Скалистого хребта.

Момент 16–15–30 по Гринвичу, завершающий интервал № 4 на сейсмограмме с/с «Цей», не отмечается амплитудным всплеском, то есть значительного удара ледника о скалы Кармадонских ворот не произошло. Об этом косвенно свидетельствуют топография дневной поверхности новообразованного завала: характерного контруклона (наплеска на преградившие дальнейший путь скалы) не было образовано (рис. 17). Торможение лавины на дистанции с. Генал – туннель «Кармадонские ворота» было достаточно энергичным, но удара не было. В дополнение к вышеизложенному, был проведен кинематический расчет скорости продвижения обвала по Геналдонскому ущелью. Двенадцать основанных на инструментальных топографических измерениях определений радиусов поворотов движения лавины и наклонов урвневой поверхности ее фронта в поперечном сечении позволили оценивать центробежные эффекты и скорость, которой они соответствуют. Результаты расчетов интерпретированы линией 1 на рис. 16.

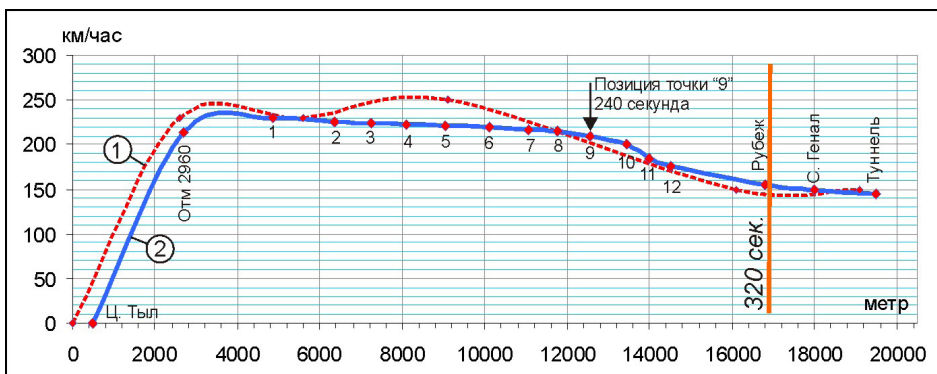


Рис. 16. Графики распределения величины скорости продвижения ледникового обвала на дистанции (19 500 м) от стены Джимарай-хох до Скалистого хребта:

1 – график распределения скоростей обвала по пути транзита, рассчитанных на основе геометрии оставленного обвалом следа; 2 – линия графика распределения скоростей, удолетворяющая хронометражу по сейсмограмметрическим записям.

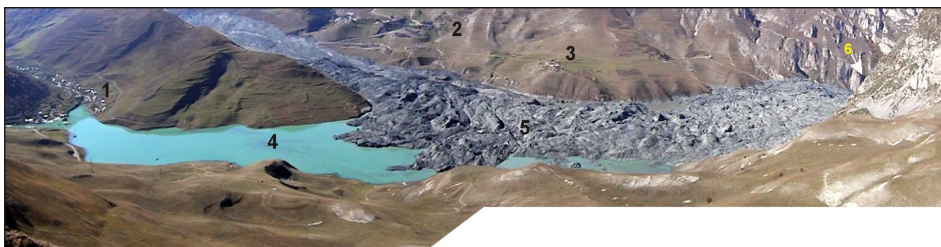


Рис. 17. Кармадонская котловина. Здесь остановилась ледовая лавина 1 – сел. Горная Саниба; 2 – сел. Верхнее Кани; 3 – сел. Нижнее Кани; 4 – подпрудное озеро «Саниба»; 5 – ледовый завал; 6 – вход в каньон Геналдонского ущелья

течение первых двух месяцев лед уплотнился и смерзся. Поверхность заметно осела, выгладилась и стала проходимой. Начал образовываться чехол поверхностной морены. По данным топографической съемки поверхности ледникового завала (сентябрь 2002 г.) были вычислен его объем – 115 млн м³ и площадь поверхности – 2,1 км². Завал, в силу вынужденной остановки, приобрел форму лежащего клина длиной около 3,8 км с максимальной толщиной около 160 м в передовой части завала и шириной от 600 м до 900 м в

ЛЕДНИКОВОЕ ТЕЛО В КАРМАДОНСКОЙ КОТЛОВИНЕ

Лед, заполнивший Кармадонскую котловину, придал ей некий инопланетный вид. Абсолютно безжизненная территория представляла собой нагромождение крупных глыб грязного льда, окутанных мелкой ледовой крошкой пепельного цвета. В котловине стало заметно холоднее. В

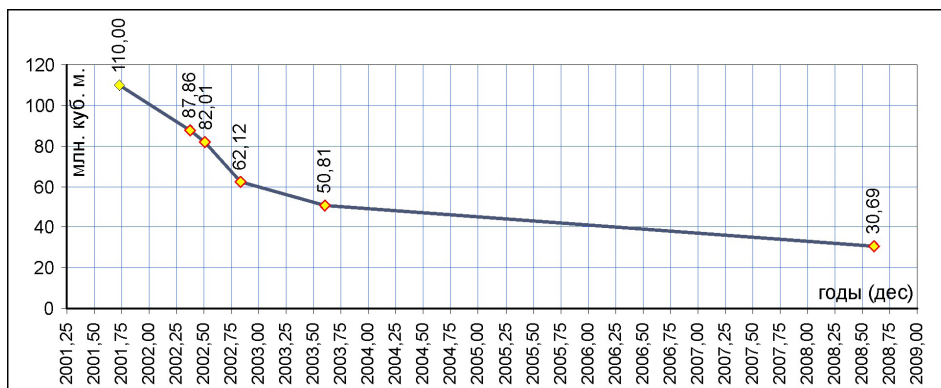


Рис. 18. График изменения во времени объема (м³) ледового тела в Кармадонской котловине. Построен на основе данных топографического мониторинга



Рис. 19. Озеро «Саниба» в августе 2005 года.

Вид со стороны ледового завала. Ближние постройки были полностью затоплены. 1 — положение максимального уровня воды в озере 22 октября 2002 года

средней части. При торможении рыхло-глыбовый материал лавины образовал довольно значительный мыс, заполнивший устье правого бокового ущелья, перекрыв выход небольшой речке Кауридон. Реке Геналдон, лишенной своего русла в области завала, хватило одной недели для формирования протоки по ледовой поверхности вдоль левого борта долины. В нижней части завала вода попадала во внутренние полости и выбрасывалась уже в каньоне. По ледовому руслу р. Геналдон образовывались заводи, но все они были проточными и довольно быстро исчезали.

По данным топографического мониторинга поверхности завала уже можно делать предположения о длительности процесса его исчезновения. За период от момента катастрофы — 20 сентября 2002 года по май 2003 года ледовое тело, в результате уплотнения и просадок, потеряло 21 % своего первоначального объема. В течение 5,5 месяца (май–октябрь) льда стало меньше еще на 18 %, в основном за счет поверхностного таяния и активно развивающейся донной термоэрозии, приуроченной к потокам рек Геналдон и Кауридон. В результате происшедших изменений площадь поверхности ледового завала сократилась на 0,4 км² и составляет 1,7 км². Дальнейший ход изменения объема иллюстрируется на графике (рис. 18). Учитывая то, что активная фаза таяния в этих местах продолжается всего 4–5 месяцев в году, полная деградация ледникового тела ожидается лет через 5–6. На отдельных участках погребенные под мощным моренным чехлом мертвые льды могут скрываться и вдвое дольше.

ПОДПРУДНОЕ ОЗЕРО «САНИБА»

Формирование озера началось сразу после образования ледяного завала (рис. 4) в Карма-



Рис. 20. Геналдонский каньон после прохождения селевой волны

донской котловине 20 сентября 2002 года. Ледовая масса перегородила выход из правого бокового ущелья, перегородив русла двух небольших речек: р. Кауридон с дебитом 1,2 м³/сек и р. Фардон с дебитом 0,8 м³/сек. Образовалась чаша будущего озера, которая начала заполняться водой. Суммарный дебит этих двух речек около 2,0 м³/сек обеспечивал накопление 170 000 м³/сут. Однако ситуация разворачивалась более стремительно. 24 сентября 2002 года вода р. Геналдон в поисках выхода прорвалась вдоль правого борта и вливалась в озеро четверо суток. К моменту начала прорыва озеро содержало уже около 0,6 млн м³ воды. Затем, 28 сентября, прорыв закончился, но вода в озере поднялась на 20 м и заключала в себе уже около 2,5 млн м³ воды. Затопленными оказались две небольшие улицы селения Горная Саниба. 18 октября 2002 г. рост уровня воды озера прекратился, а 22 октября сформировался русловой сток по поверхности ледового завала вдоль правого борта долины. К этому моменту площадь зеркала озера составляла 260 000 м², а его объем оценивался в 3,5 млн м³. Никто не знал, чем все это закончится [21]. Жители равнинных сел, расположенных по берегам р. Гизельдон (р. Геналдон является ее правым притоком. Слияние происходит при выходе из полосы Скалистого хребта) (рис. 3), ощущали себя в большой опасности и были готовы в любой момент покинуть свои дома в случае прорыва озера. За озером велись круглосуточные наблюдения. Углубление русла протоки по поверхности льда происходило относительно быстро. Уровень воды в озере начал быстро снижаться и за 15 дней понизился на 7 метров. В середине июня 2003 года произошел второй прорыв воды, с понижением уровня на 2,5 м за 2 дня.

10–11 июля озеро обследовалось специалистами МГУ. Была проведена первая изобатиче-



Рис. 21. Селевые отложения после выхода из каньона

ская съемка. На 10 июля 2003 г. озеро содержало 1,32 млн м³ воды. Уровень зеркала находился на отметке 1 319,63 м.

Третий прорыв состоялся в начале декабря. В течение десяти дней уровень воды в озере опустился на 2,8 метра. К 1 января 2004 года его отметка была равна 1 314,45 метра. В 2004 г. снижение уровня водного зеркала озера продолжалось равномерно, со скоростью около 1 см в сутки. 25 августа уровень находился на отметке 1 312,77 м, 25 ноября – на отметке 1 311,9 м. В озере оставалось около 0,5 млн м³ воды. В августе 2005 года озеро выглядело уже вполне безобидно (рис. 19).

СЕЛОВОЙ ВЫБРОС

Как уже отмечалось, после остановки ледового обвала в створе эскарпа Скалистого хребта катастрофический процесс нашел свое продолжение в виде ледово-каменной селевой волны высотой до 30–40 метров. На скорости, превышающей 100 км/час, смертоносный ураган преодолел 5,5 км Геналдонского каньона (рис. 20). Именно в этой полосе ши-

риной 30–80 м случилось наибольшее количество жертв. Селевые отложения накрыли, в общей сложности, 3 км². Их мощность убывает в направлении от ледового завала, где она достигает 11 метров. При выходе из каньона – 4 м; в области слияния р. Геналдон и р. Гизельдон – 2 м (рис. 21). Объем селевых отложений оценивается в 3–5 млн м³.

К настоящему времени в нижних ярусах селевого выброса поток р. Гизельдон планомерно возвращается к исходному базису донной эрозии. Обращаются террасы.

Растительность вновь отвоевывает потерянные территории. Взамен уничтоженных участков дорог строятся новые, возводятся мосты.

ЗОНА ТРАНЗИТА

Обрушение ледника Колка в Геналдонском ущелье не без основания относится к событиям регионарного значения. Чрезвычайно быстрое перемещение колоссальной массы вещества на несколько десятков километров сопровождалось выделением огромного количества энергии, часть которой распространялась в виде сейсмических возмущений геологической среды, часть уходила на экзарацию бортов и дна долины, часть тратилась на преодоление внутренних сил трения, преобразовываясь в тепловую. Энергетики механического воздействия ледовой лавины на борта долины было достаточно, чтобы вывести из стабилизированного состояния три оползневых склона. Оползневой процессом было охвачено около 30 млн м³ грунта (рис. 22). Трудно поддающееся оценке количество рыхлого материала скопилось в пойме долины. Угроза



Рис. 22. Геналдонское ущелье

Активизация оползневого процесса после прохождения ледового обвала. Оползень «Активный». 1 – линия отрыва оползневого блока; 2 – траектория движения обвала.

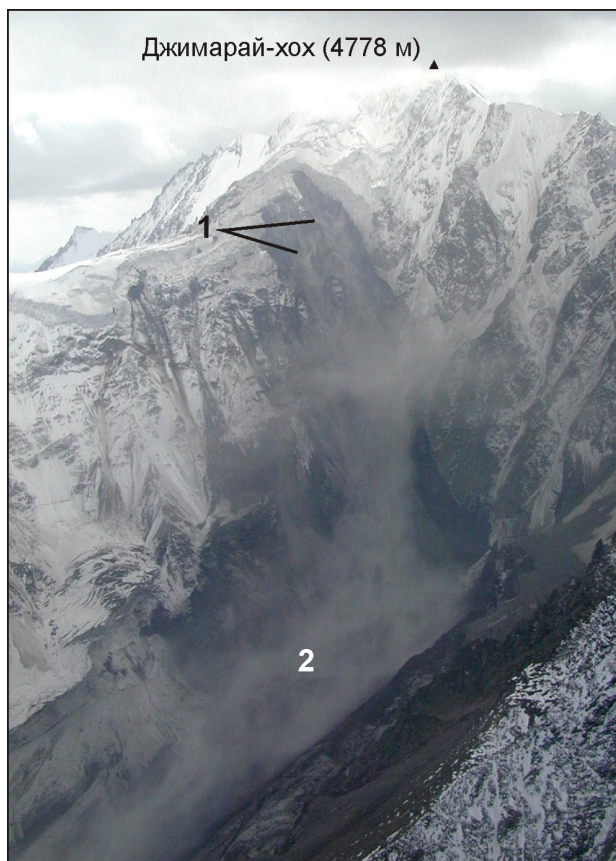


Рис. 23. Джимарай-хох

Зона обрушения фирновых полей. Первые часы после катастрофы: 1 – фумаролы; 2 – облако газа

схода катастрофического селя до настоящего времени остается вполне реальной. Огромные скопления рыхлого материала на дне долины, безусловно, вовлекаются в русловые процессы, и его перемещение вниз происходит в спокойном режиме. Селевая опасность, надо полагать, состоит в обратной зависимости с продолжительностью такого режима.

ВЫВОДЫ

1. РАСПАД ФИРНОВЫХ ПОЛЕЙ

По снимкам очаговой области, сделанным с борта вертолета 22 сентября 2002 года, на северо-восточном склоне г. Джимарай-хох четко прослеживались две фумаролы (рис. 23). Из них начинался сток белесого газа, медленно сползавшего вниз, в виде длинного облака. При попытке высадки десанта исследователей в окрестностях ложа ледника ощущался сильный запах сернистого газа. Высадку пришлось отменить.



Рис. 24. Распадающееся фирновое поле вершины Джимарай-хох. 28 августа 2002 года

1 – зона обрушения

Не исключено, что активизация фумарольных эманацій произошла в результате сейсмогенных дислокаций, происшедших в момент землетрясения № 244 (выборка КМV-2002). Близость казбекского вулканического очага и питаемых им магматических камер вполне объясняет такой феномен. Верховья Геналдонского ущелья изобилуют большим количеством самоизливающихся источников термальных вод с высокой минерализацией. Это – прямой признак близости глубинного тепла [2; 3; 7; 10].

В такой сценарий корректно вписывается факт постепенности распада фирновых полей на локальном участке. Выходы нехолодного газа эндогенной природы на контакте скального субстрата с ледово-фирновым полем сопровождался развитием термокарста. По мере продолжения этого разрушающего процесса висячий ледово-фирновый массив терял целостность и как следствие – прочность, что привело к его осыпанию (рис. 24). Этот фотоснимок был сделан одновременно с фото 1 на рис. 8 туристами, посетившими этот район в конце августа 2002 года (Д. Солодкий). Сравнивая рис. 24 и рис. 8.1, нетрудно убедиться, что процесс деградации фирновых полей шел в соответствии с «законом сохранения количества материи» [20]. В пользу этой точки зрения служит еще один факт: расположение фумарол, безусловно, совпадает с серединой области расположения обрушенного фирнового поля [7].

Интерес вызывает и факт скорого прекращения фумарольных эманацій после катастрофы. Скорее всего, в результате исчезновения с поверхности колоссальной массы, в ниже лежащем блоке горных пород опять произошла перестройка поля динамических напряжений, что обусловило затягивание недавно возникшего

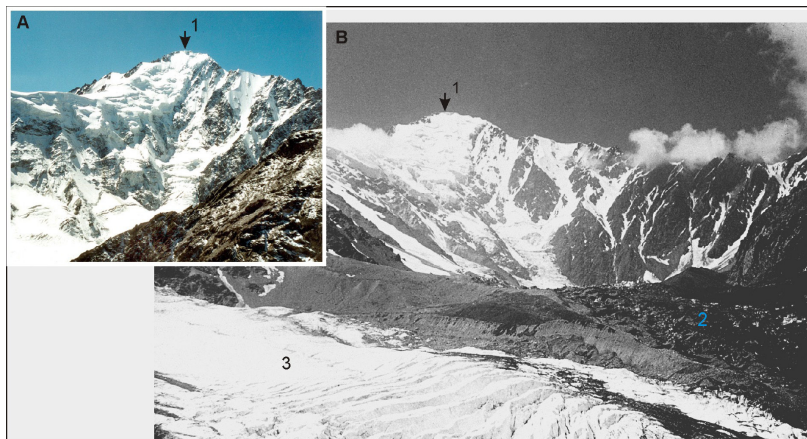


Рис. 25. Фирновые поля Джимарай-хох

Фото «А» – 2000 год; фото «В» – 1970 год. 1 – вершина Джимарай-хох (4 778м); 2 – ледник Колка пульсирует; 3 – ледник Майли.

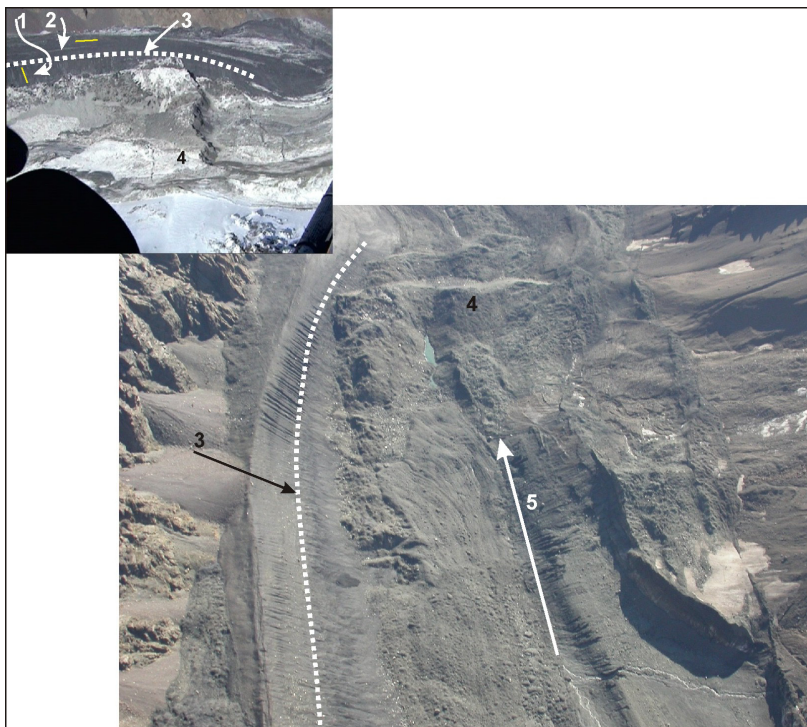


Рис. 26. Ложе ледника Колка. Вид – вниз по долине

1 – борозды струйной эрозии; 2 – борозды струйной эрозии; 3 – уровень дневной поверхности ледника на 20 сентября 2002 г.; 4 – поперечное ледово-каменное образование на нижней границе ложа ледника Колка; 5 – направление движения ледника

сейсмо-тектонического нарушения. Примерно через неделю свидетельства о выходе газа перестали появляться.

2. ЛЕДОВО-КАМЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В НИЖНЕЙ ЧАСТИ ЛОЖА ЛЕДНИКА КОЛКА: «РИГЕЛЬ»

При рассмотрении фото 1 на рис. 12 обращает на себя внимание поперечный уступ в нижней части ледникового ложа. Это образование, состоящее из льда, с большим содержанием

литогенного материала, географически находится внутри палеограницы ушедшего ледника. Его морфология вовсе не соответствует облику аккумулятивного образования. По-видимому, это концевая часть ледника, исполняющая роль дамбы, препятствующей леднику Колка выходить в режим долинного ледника.

Ранее было отмечено, что на Колку вместе с фирновыми лавинами попадает большое количество каменного материала. При пластичном перемещении ледовых масс из тыловой части к языку содержание каменной примеси возрастает, вследствие поверхностного, внутреннего и донного таяния вмещающего льда. В нижних ярусах ледника содержание каменного материала достигает уровня, при котором пластические деформации уменьшаются, а затем исчезают полностью. Лед обретает каменный скелет. Таким образом, получается, что ледник сам себя запирает в зоне преимущественного питания. При нормальном (для ледника Колка) режиме накопления устойчивость ледника обеспечивается прочностью дамбы, создаваемой им самим же, до тех пор, пока этой прочности хватает.

Обращаясь к рис. 25, заметим, что фирновые поля Джимарай-хох к подвижке ледника Колка 1969–1970 г. явного отношения не имеют, тем не менее подвижка состоялась [16]. Разнохарактерность движения ледника Колка в двух последних случаях скорее всего найдет свое объяснение в различии систем и механизмов разрывообразования в теле ледника при достижении и преодолении, в процессе накопления массы, критического уровня сдерживающих сил.

Очень похоже, что «пульсационность», или, точнее говоря, склонность к периодически повторяющейся потере устойчивости ледника Колка определяется именно свойством образовывать в нижних ярусах своего тела зону с высоким содержанием каменного материала. В повышенной прочности этого образования сомневаться не приходится: «Ригель» выстоял в катастрофе (несмотря на, пожалуй, самый яростный натиск)

и сохранился как реликтовый фрагмент обрушенного ледника (рис. 26).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кармадонская катастрофа не является научной загадкой, несмотря на свою уникальность. Предварительное изучение условий развития катастрофического процесса в Геналдонском ущелье было достаточно разноплановым. Каждый природный фактор, способный оказать прямое или косвенное воздействие на ледник, был рассмотрен. Однако, при любой расстановке факторов внешнего воздействия, данное обрушение классифицируется как экзогенное движение катастрофического уровня, то есть склоновый процесс. Тем не менее уровень научных проблем, возникших перед обществом, чрезвычайно высок. Во избежание повторения

трагедии в будущем гляциальная область ледника Колка должна находиться под контролем нескольких служб одновременно. Метеорологический мониторинг желательнее сопровождать топографическим мониторингом (в пределах разумной достаточности). Результаты наблюдений за геотермальным полем, метеоусловиями и развитием сейсмической обстановки необходимо увязывать со скоростью пластических деформаций тела ледника, определяемых с применением высокоточной аппаратуры. Это даст возможность рассчитывать интегральные значения изменяющихся физико-механических свойств активного тела автоматически, непосредственно в полевых условиях. При уменьшении устойчивости ледника до опасного предела необходимо провоцировать его сход с применением активных мер воздействия, разработанных заблаговременно.

Автор выражает благодарность за плодотворные дискуссии и представление отдельных фотодокументов И.В. Галушкину (ИнфоТЕРРА, Владикавказ), Л.В. Десинову (Институт географии РАН, Москва), Г.А. Долгову (ПЦ «Севосеомониторинг»), А.А. Вьюхину (Национальный парк РСО-А), Э.Т. Манукянцу (Владикавказ), С.С. Черноморцу (УЦИГМ, МГУ, Москва), О.В. Тутубалиной (УЦИГМ, МГУ, Москва).

ЛИТЕРАТУРА

1. Годзиковская А.А., Бугаевский А.Г., Габсатарова И.П. Сейсмологическая составляющая в катастрофическом движении ледника Колка. 2004 г., ЦОМЭ ГС РАН, <<http://zeus.wdcd.ru/wdcd/sep/kolka/index.ru.html>>.
2. Гурбанов А.Г., Кусраев А.Г., Чельдиев А.Х. Первые результаты исследования эндогенных процессов в Геналдонском и прилегающих ущельях // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2004. Т. 4, № 3. С. 2–8.
3. Гурбанов А.Г., Богатииков О.А., Докучаев Л.Я., Газеев В.М., Лексин А.Б., Ляшенко О.В. Транскавказское направление вулканизма: причина, следствие и эпитепральная минерализация // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2007. Т. 7, № 3. С. 25–44.
4. Дробышев В.Н. Анализ сейсмической обстановки на территории Северной Осетии в 2002 году // Биржа интеллектуальной собственности. – М.: Международный институт промышленной собственности, 2009. Т. VIII, № 6.
5. Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Харебов А.К. Анализ инструментальных записей схода ледника Колка по данным сети сейсмических наблюдений // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, том 4, № 3, 2004 г. С. 58–64.
6. Копаев А.В., Гурбанов А.Г. Гравиметрические исследования в Геналдонском ущелье // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2004. Т. 4, № 3. С. 9–11.
7. Корниенко С.Г., Ляшенко О.В., Гурбанов А.Г. Выявление признаков очагового магматизма в пределах Казбекского вулканического центра по данным тепловой космической съемки // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2004. Т. 4, № 3. С. 25–32.
8. Котляков В.М., Рототаева О.В., Десинов Л.В., Осокин Н.И. Причины и следствия катастрофического выброса пульсирующего ледника Колка в Центральном Кавказе // Доклады Академии наук РАН. – М.: Наука, 2003. Т. 389, № 5. С. 688–692.
9. Котляков В.М., Рототаева О.В. Ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Природа. – М.: Наука, 2003. № 8. С. 15–23.
10. Лаврушин В.Ю., Маковозов А.О. Температура минеральных вод - отражение мазматогенной термодинамики в районе вулкана Казбек // Вестник Владикавказского научно-
11. го центра РАН и РСО-А, 2004. Т. 4, № 3. С. 33–40
11. Осокин Н.И. Ледниковая катастрофа в Осетии // География. – М.: Гео, 2002. № 43 (674), 16–22 ноября. С. 3–7.
12. Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Лурье П.М. Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 г. // Метеорология и гидрология. – М.: Гидрометеоиздат, 2002. № 12. С. 94–98.
13. Полковой А.П. Каковы же причины схода ледяной лавины // Северная Осетия, № 178 (23735), 24.09.2002.
14. Павлов О.В., Рогожина В.А. Сейсмическое микрорайонирование. – М.: Наука, 1984 г.
15. Поповин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли. – М.: Гео, 2003. Т. VII, № 1.
16. Рототаев К.П. Ледник Колка – факты и выводы // Материалы гляциологических исследований. – М.: Международный геофизический комитет при президиуме АН СССР, 1974. Вып. 24. С. 3–17.
17. Рогожин Е.А., Собисевич Л.Е., Нечаев Ю.В. и др. Геодинамика, сейсмотектоника и вулканизм Северного Кавказа / Под ред. акад. Н.П. Лаврова. – М.: Регион. обществ. ученых по пробл. прикладн. геофиз., 2001 г. С. 335–340.
18. Савич А.И., Владимиров В.Г., Годзиковская А.А., Стром А.Л. Оценка сейсмической опасности Зарамагской ГЭС-1 // РАО ЕЭС России, Проектно-исследовательское и научно-производственное акционерное общество «Институт гидропроект», Отчет. – М.: Институт гидропроект, 1996. Т. 1.
19. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. – М.: Наука, 1993. С. 3–55.
20. Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А. Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные // Криосфера Земли. – М.: Гео, 2005. Т. IX, № 4. С. 62–71.
21. Черноморец С.С., Крыленко И.В., Крыленко И.Н. Эпикастрофический лимногенез: Санибанское озеро после Геналдонской катастрофы 2002 года // Сб. материалов 3-й научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». – М.: Эдиториал УРСС, 2003. С. 95.
22. Штебер Э.А. Ледниковые обвалы в истоках р. Геналдон на Кавказе // Терский сб., Екатеринбургское научное общество, т. II, № 7, 1903. С. 72–81.