

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 511.311.21. (234.9)

**ИМПАКТНЫЙ МЕХАНИЗМ ПОДГОТОВКИ
ЛЕДНИКА КОЛКА К СЕЛЕВОЙ КАТАСТРОФЕ:
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КРУПНЫХ ОБВАЛАХ**

В.Л. Познанин, С.Г. Геворкян*

*Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов Министерства природных ресурсов – РАН,
121357, Москва, ул. Вересаева, 15, Россия, poznain@list.ru*

**ФГУП “Фундаментпроект”, 125993, Москва, Волоколамское ш., 1, Россия, guevorkyan@narod.ru*

К настоящему времени по вопросу Геналдонской ледниковой катастрофы 20 сентября 2002 г. уже опубликовано около трех десятков работ, в которых излагаются самые различные точки зрения на это событие. По мнению одних специалистов, катастрофу вызвал одновременный обвал, рухнувший в этот день на ледник Колка. По мнению других, катастрофа стала следствием подвижки (сёрджа) Колки и с обвалами непосредственно не связана. Есть и промежуточные точки зрения. В данной статье мы выдвигаем иную, отличную от существующих, точку зрения на причины и механизм подготовки Геналдонской катастрофы. По нашему убеждению, в данном случае следует говорить о целой серии ударов обвальных масс в тыловую часть Колки, совокупность которых и обусловила действие импактного (ударного) механизма подготовки обрушения этого ледника.

Ледник, обвал, ледниковая катастрофа, Колка

**THE IMPACT MECHANISM OF THE PREPARATION OF THE KOLKA GLACIER
TO THE MUDFLOW ACCIDENT: THE PHYSICAL PROCESSES DURING
THE LARGE LANDSLIDES**

V.L. Poznanin, S.G. Gevorkyan*

*Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Ministry of Natural Resources and RAS,
121357, Moscow, Veresayev str., 15, Russia, poznain@list.ru*

**Institute “Fundamentproject”, 125993, Moscow, Volokolamskoye sh., 1, Russia, guevorkyan@narod.ru*

By now about thirty papers have been already published on the Genaldon glacial accident (September, 20, 2002) discussing various view points on this event. Some experts assume that the accident was caused by the unique landslide that crashed down on the Kolka glacier on the 20 of September, 2002. The others believe that the accident has been the consequence of the Kolka glacier motion (surge) and was not connected directly with the landslides. The intermediate points of view also exist. In this article we put forward another (distinct from existing) point of view on the reasons and mechanism of Genaldon accident preparation. We think that it is necessary to examine a series of impacts of landslide masses in the rear part of the Kolka glacier which caused the impact (shock) preparation mechanism of the collapse of this glacier.

Glacier, landslide, glacial accident, Kolka

ВВЕДЕНИЕ

По данным сейсмостанций Северной Осетии, вечером 20 сентября 2002 г. обрушилась часть ледника Колка, расположенного под склонами горы Джимарай-хох, недалеко от горы Казбек. В результате обрушения сформировался гляциальный селевой поток, который с большой скоростью прошел по долине р. Геналдон свыше 30 км и остановился примерно в полукилометре южнее селения Гизель, при этом погибли 125 человек и была раз-

рушена нижняя часть пос. Кармадон. Объем перемещенного материала составил около 140 млн м³ [*Ледник Колка...*, 2002; *Поповнин и др.*, 2003; *Десиннов, Котляков*, 2005].

Геналдонская ледниковая катастрофа вызвала большой интерес у специалистов (гляциологов, селевиков, геологов и др.). К настоящему времени по данному вопросу уже опубликовано около трех десятков работ, в которых излагаются самые различ-

ные точки зрения на это событие [Петраков и др., 2004; Муравьев, 2005; Тутубалина и др., 2005] (подробный анализ этих работ дан в [Черноморец, 2005]). Почти во всех этих публикациях с разной степенью достоверности и обстоятельности приводятся сведения о чередовании крупных обвалов снежно-ледовых масс и горных пород со стены г. Джимарай-хох на тыловую часть ледника Колка в течение 50–60 дней, предшествовавших катастрофе. По нашему убеждению, основанному на анализе имеющихся в открытом доступе материалов, срыв Колки вызван не подвижкой (сёрджем) и не единовременным обвалом ледово-каменной массы со стены г. Джимарай-хох. В данном случае следует говорить о целой серии ударов обвальных масс в тыловую часть Колки, совокупность которых и обусловила действие импактного (ударного) механизма подготовки обрушения Колки. Что представляет собой этот импактный механизм и как он действует, рассмотрено ниже.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ “КРУПНЫЙ ОБВАЛ”

По оценкам, суммарный объем обвальной массы, поступившей на ледник Колка в течение предшествующих катастрофе 50–60 дней, составляет 20–50 млн м³ [Десинов, Котляков, 2005; Тутубалина и др., 2005; Черноморец, 2005]. Это означает, что в течение всего лишь двух месяцев до сентябрьской катастрофы на ледник ежедневно поступало в среднем около 1 млн м³ в сутки (т. е. более 10 м³/с) ледово-каменного материала. Для сравнения укажем, что в предыдущие десятилетия межкатастрофического цикла со спокойным фоновым развитием событий гравитационный расход вещества составлял около 3 тыс. м³ в сутки (0,35 м³/с) [Роттаев и др., 1983].

Резкая активизация обвалов перед катастрофой (их объемы возросли более чем в 30 раз), а также их крайняя неравномерность и импульсивность, будучи проявлением фундаментальных свойств экзогенных геологических процессов, ставят вопрос о роли этих обвалов в механизме формирования катастрофы: что именно происходит на леднике и внутри ледника при крупных обвалах?

Важнейшее фундаментальное свойство горных пород (и льда в том числе) – их изменчивость [Бондарик, 1981], которая особенно наглядно проявляется в изменении формы объектов при их взаимодействии. В частности, при падении обвалов на поверхность ледника закономерным образом деформируются и ледник, и материал обвала в зависимости от состава, строения и свойств горных пород и льда, а также изменяется тепловое состояние взаимодействующих сред, поскольку при ударе часть кинетической энергии обвалов (до 35 %) переходит в тепловую [Геворкян, 1998].

Изменчивость ледникового льда характеризуется свойством текучести. Согласно [Гляциологический..., 1984, с. 373], лед можно представить в виде пластического тела с пределом текучести около 0,1 МПа, что при плотности льда 0,9 т/м³ соответствует столбу льда высотой примерно 11 м. Поскольку полученная высота ледового столба является пороговой величиной, то объем ледового куба со стороной 11 м можно принять в качестве энергетического (теплового) эталона. Очевидно, что применительно к леднику Колка для превращения в воду эталонного (критического) объема высокотемпературного (примерно 0 °С) льда потребуются вполне определенное количество тепла, которое выделяется при ударе о лед некоторого объема горной породы, падающего на ледник с высоты 1150 м и имеющего критическую массу ($M_{кр}$). В таком случае имеем [Геворкян, 1998]

$$M_{кр} = 3VL/(gH). \quad (1)$$

Здесь V – объем ледового куба со стороной 11 м ($V = 1331 \text{ м}^3$); $L = 3,08 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^3$ – объемная теплота плавления льда; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $H = 1150 \text{ м}$ – относительная высота места отрыва обвала над поверхностью ледника.

Из уравнения (1) следует, что критическая масса обвала $M_{кр}$ примерно равна 10^8 кг (при этом она совершенно не зависит от вещества падающего тела, будь то лед или горная порода).

Полученное расчетное значение критической массы обвального тела соответствует значению нижнего предела градации “крупный обвал”, поскольку при нагрузках более 0,1 МПа лед деформируется с любой скоростью [Гляциологический..., 1984]. Верхний предел рассматриваемой категории крупности обвалов можно определить из следующих соображений.

На сегодняшний день единственное косвенное указание на величину объемов или масс крупных обвалов, обрушившихся на Колку, содержится в работе [Тутубалина и др., 2005], в которой приводится величина площади свежего обвала, равная 0,07 млн м². Согласно [Десинов, Котляков, 2005], толщина обвалившихся ледников составляет около 50 м, а объем горных пород примерно равен объему льда. Следовательно, без ограничения общности рассуждений можно принять, что толщина слоя горной породы равна 50 м. В этом случае получаем, что максимальный объем обвального тела непосредственно перед катастрофой составлял около 3,5 млн м³ (что соответствует массе 8,7 млн т при плотности кристаллических сланцев 2,5 т/м³). Учитывая, что точность определения площади обвалов обычно равна 12–15 % [Тутубалина и др., 2005], можно утверждать, что верхний предел крупных обвалов составляет около 7,0 млн т. Таким образом, крупные обвалы можно

характеризовать диапазоном массы от 100 тыс. т до 7 млн т (10^8 – $7 \cdot 10^9$ кг).

Обвалы большей массы следует отнести к категории сверхкрупных.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРУПНЫХ ОБВАЛОВ С ЛЕДНИКАМИ. СХЕМАТИЧЕСКАЯ КАРТИНА

Реальная картина взаимодействия обвалов со стены г. Джимарай-хох с тыловой частью ледника Колка чрезвычайно сложна. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть здесь некий схематический вариант такого взаимодействия, с тем

чтобы с помощью методов аналитического конструирования событий (на основе общих законов физики) выяснить, какие именно процессы возникают при этом и как они протекают на поверхности и внутри тела ледника, поскольку от прямого наблюдения они скрыты. Такой подход вполне правомерен, поскольку все основные особенности строения ледникового цирка Колки и его режима хорошо известны [Роттаев и др., 1983; Десинов, Котляков, 2005; Тутубалина и др., 2005].

Тыловая часть ледника Колка, подвергшаяся в 2002 г. наиболее интенсивному воздействию обвальных масс со стены г. Джимарай-хох, занимает около 1/3 площади и объема ледника при его толщине около 150 м, средней абсолютной высоте его поверхности 3250 м и абсолютной высоте обвальных стенок цирка до 4500–4600 м. Не нарушая общности рассуждений, можно допустить, что обвальное тело имеет массу, близкую к критической ($M_{кр} = 7 \cdot 10^9$ кг), шероховатую поверхность и падает вертикально с абсолютной высоты 4400 м на ровный участок поверхности примерно в центре тыловой части ледника Колка. Согласно [Гляциологический..., 1984; Маэно, 1988; Петренко, 1990], принимаем также, что предел прочности льда на сжатие равен 2,5 МПа, модуль объемного сжатия – 7000 МПа, модуль сдвига – 3000 МПа, а твердость льда (как характеристика, определяющая способность льда оказывать сопротивление проникновению в него другого тела, в данном случае обвала) составляет 1–5 МПа при температуре льда 0°C .

При перепаде высот $\Delta H = 1150$ м принятое для аналитики обвальное тело в силу незначительного сопротивления воздуха (менее 1 %) разгоняется пропорционально квадратному корню из $2g\Delta H$ и приобретает у поверхности ледника скорость около 150 м/с. При такой скорости удар обвального тела о поверхность ледника (рис. 1) приводит к возникновению высокоскоростного потока воздушно-ледово-каменной пульпы, представляющей собой смесь зерен фирна, кристаллов дробленного льда, частиц горной породы, капель воды и воздушных включений. Плотность потока этой пульпы быстро падает по ходу его движения вниз по уклону, при этом в результате разброса обломков в течение первых секунд формируется кольцеобразный (в плане) вал.

В момент касания обвальным телом поверхности ледника и проникания этого тела в толщу ледника на глубину всего 1,5 м на контакте обвальное тело–ледник скачком развивается давление примерно $13 \cdot 10^4$ МПа (1,3 млн атм) (см. рис. 1). Такого рода импульсное воздействие вызывает мощнейшую ударную волну в теле ледника, которая, распространяясь в нем со скоростью более 3 км/с, достигает ложа всего за 0,05 с (см. рис. 1,а). Давление на фронте ударной волны столь велико,

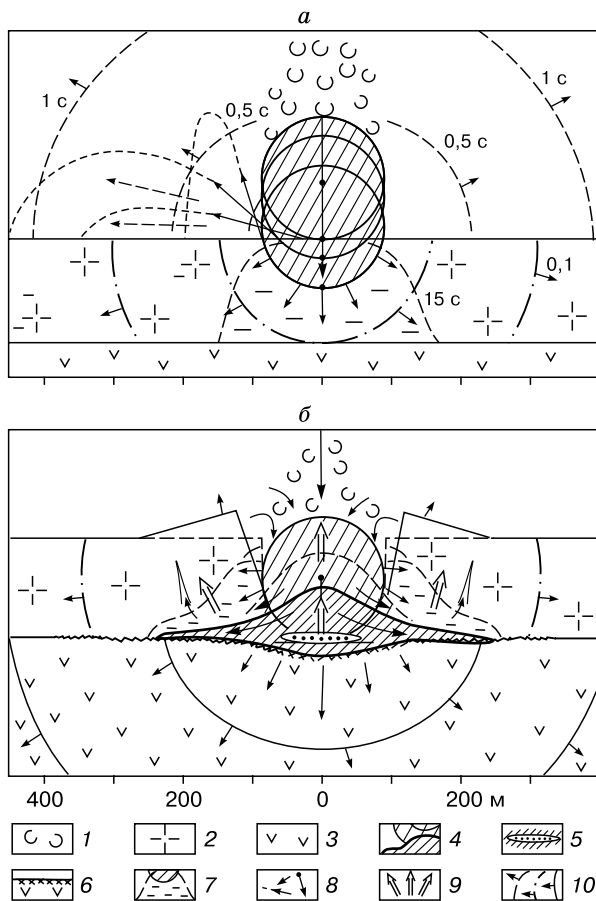


Рис. 1. Механизм взаимодействия крупного обвала горных пород с ледником в приповерхностных слоях льда (а) и на скальном ложе (б):

1 – воздушная среда и зоны пониженного давления; 2 – тело ледника; 3 – скальное ложе; 4 – тело обвала и его конфигурация при ударном расплющивании на ложе; 5 – очаг теплового перегрева горных пород при раздавливании обвала; 6 – участки ударного хрупкого разрушения и деформации ложа; 7 – куполовидный объем жидкокристаллического льда; 8 – силы выбрасывания обломков, давления, смятия и смещения взаимодействующих сред; 9 – силы упругой реакции ложа и деформации ледника; 10 – упругие ударные волны в воздушной среде, во льду и горной породе и направления их движения.

что обусловленный ею импульсный, “встряивающий” эффект вызывает почти мгновенные (за 0,05–0,10 с) смещения базисных плоскостей в кристаллах льда независимо от их пространственной ориентировки. Вследствие этого кристаллы льда почти мгновенно переходят в жидкое состояние. Следует иметь в виду, что здесь речь идет не о воде, а о жидких кристаллах льда [Маэно, 1988], как особом его состоянии при отрицательной температуре, вызванном огромными, пульсирующими нагрузками в течение коротких промежутков времени. Особое состояние льда в виде жидких кристаллов поддерживается в некотором замкнутом объеме до тех пор, пока обвальная масса, стремительно продвигающаяся от поверхности ледника к его ложу (вплоть до своего удара о скальное ложе), обеспечивает соответствующее напряженное состояние.

Взаимодействие обвального тела со скальным ледниковым ложем (см. рис. 1) происходит в виде жесткого удара, влекущего за собой формирование классической импактной воронки (кратера) [Геворкян, 1998]. Результатом удара является возникновение в породе скального ложа продольных и поперечных упругих волн, которые со скоростями 4–5 км/с концентрически расходятся от места удара (см. рис. 1,б).

Часть энергии удара (около 35 %) переходит в тепло, что приводит к расплавлению не только части льда в образующейся импактной воронке и образованию линзы горячей воды (с температурой не выше 100 °С), но и к плавлению минеральных пород. Такой высокотемпературный очаг нагрева, образовавшийся в минеральном ложе ледника, сыграет в дальнейшем роль источника воды. Удар обвального тела приводит к внедрению дробящейся горной породы под тело ледника при давлении, достигающем 3000 МПа. Этого вполне достаточно, чтобы приподнять огромные блоки ледника при давлении более 1,5 МПа вокруг импактной воронки и обрушить в нее снег, куски льда и морену. Воронка как бы “затягивается”, т. е. система воздух–лед–горная порода временно становится закрытой с внутренним очагом тепла (см. рис. 1) и непрерывно меняющимся давлением между взаимодействующими средами.

Очевидно, что термобарическое состояние импактного очага должно прийти в состояние равновесия, которому соответствует внутреннее давление 1,0–1,5 МПа, между тем как в действительности это значение на три порядка выше. Эта разница в давлении расходуется на отжимание и выдавливание грунтово-ледяной массы обратно – вверх по основной воронке и по радиально-кольцевым трещинам в ее периферической части, что сопровождается сильнейшими проявлениями трения и смятия как ледяных блоков, так и самой гор-

ной породы обвала, частичным перемешиванием грунтово-ледяной массы с массой жидкокристаллического льда, которая при скачкообразном падении давления в разных местах кольматирует обломки рекристаллизационным льдом. При этом формируются отложения типа брекчии, что было зафиксировано в натуральных условиях [Роттаев и др., 1983; Черноморец, 2005]. Участки скачкообразного падения давления в очаге приводят к непрерывно меняющейся, напоминающей “кипение”, картине выбросов и оседаний грунтовых и ледяных масс сложной формы (рис. 2,а). Барическое

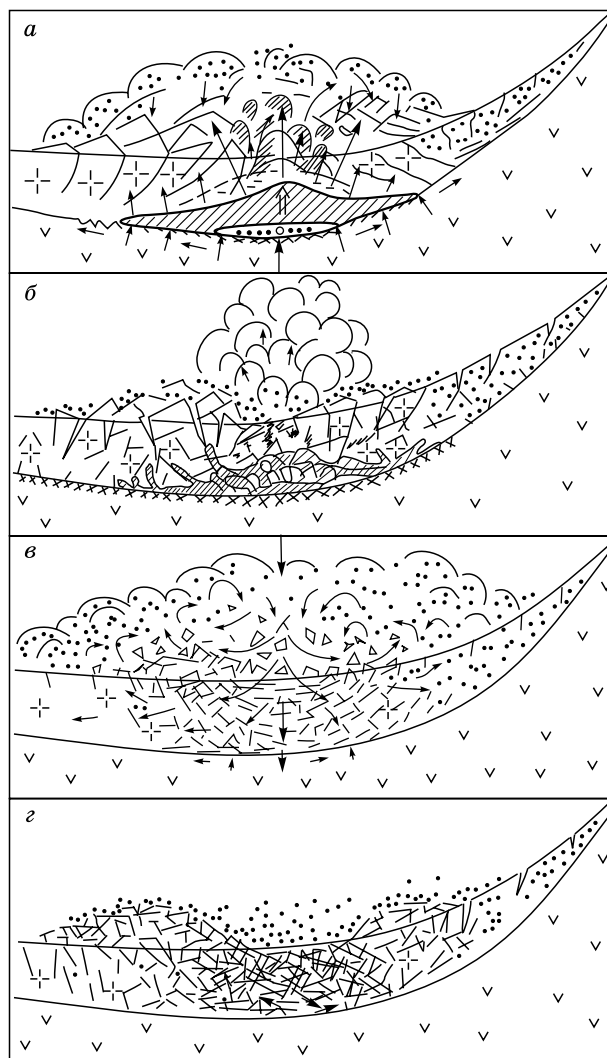


Рис. 2. Вероятные сценарии динамической перестройки тыловой части ледника Колка после ударов крупных обвалов горной породы (а, б) и фирново-ледяных масс (в, з).

Импактные очаги: а, б – “горячий” при частично закрытой системе, в, з – “холодный” в условиях открытой системы. Усл. обозн. см. на рис. 1.

“кипение” очага может продолжаться, по некоторым косвенным данным, довольно длительное время (до 70 дней), после чего активные механические подвижки вещества прекращаются и начинает сказываться тепло перегретой линзы горной породы (см. рис. 1,б, 2,а) в виде клубящегося пара – признака стабилизации очага (см. рис. 2,б).

Выше был рассмотрен случай обвала на ледник горной породы. Несколько иная картина должна иметь место при падении крупных масс льда (до $7 \cdot 10^9$ кг), поскольку в силу различий в плотности ледникового льда и минеральных горных пород (700 и 2500 кг/м³ соответственно) объем ледового обвального тела будет существенно больше, а ударные эффекты слабее, несмотря на одинаковую скорость падения. Можно предположить, что комплекс импактных эффектов будет развиваться по радиально-сферической схеме (см. рис. 2,в, г). При этом существенно большим будет объем раздробленного льда при отсутствии импактного контакта со скальным ложем. Причем при одинаковой в обоих случаях кинетической энергии (но меньшей плотности льда) увеличится и дальность разброса обломков, скрытых мощными облаками ледяного крошева. Стабилизация такого “холодного” очага в условиях открытой системы протекает быстрее, чем “горячего”, с мощными процессами дробления, смятия и трения как источниками жидкой воды (см. рис. 2,з).

Таким образом, нами рассмотрены случаи обрушения на ледник чисто минеральных или ледовых обвальных масс. Однако следует иметь в виду, что в реальных условиях [Поповнин и др., 2003; Десинов, Котляков, 2005; Тутубалина и др., 2005] чаще происходили крупные обвалы из смеси горных пород и фирна. Рассмотрим такие случаи.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРУПНЫХ ОБВАЛОВ С ЛЕДНИКОМ. РЕАЛЬНАЯ КАРТИНА

Картина взаимодействия с тыловой частью ледника Колка крупных обвальных масс, состоящих из горной породы, фирна и льда, составлена по описаниям очевидцев и специалистов, посетивших ледниковый цирк с конца июля по конец сентября 2002 г., а также по многочисленным фотографиям [Поповнин и др., 2003; Десинов, Котляков, 2005; Муравьев, 2005].

Вначале рассмотрим действие крупного обвала, который сорвался из района висячего ледника № 9 [Роттаев и др., 1983]. Судя по морфологии стенок цирка, обладающее критическим объемом обвальное тело, состоящее из смеси горных пород и льда, сорвалось с обрывистой стенки в результате опрокидывания блоков, возможно, при незначительных сейсмических толчках. В данном случае имел место чисто гравитационный процесс, кото-

рый возникает и развивается при крутизне склонов более 38° [Проблемы..., 1985], а данный участок имеет уклон до 65° (рис. 3,а). Уже в момент опрокидывания наиболее крупных блоков горной породы происходит их значительный вращательный разгон и набор скорости (стадия 1) с последующим скользящим ударом об обрывистую стенку цирка, образованием при ударе динамической подушки, состоящей из плотного воздуха, мельчайших сильно наэлектризованных частиц грунта, не дающих плотно прижаться к скальному ложу. Наличие в этой контактной зоне обломков горной породы разного размера играет роль своего рода “роликов”, по которым обвальная масса стремительно движется вниз по склону. Именно благодаря этим обломкам-“роликам” происходит резкое снижение коэффициента трения обвальной массы о ложе почти до нуля [Геворкян и др., 2005]. При этом скорость движения обвальной массы регулируется только ускорением g и при перепаде высоты 500–

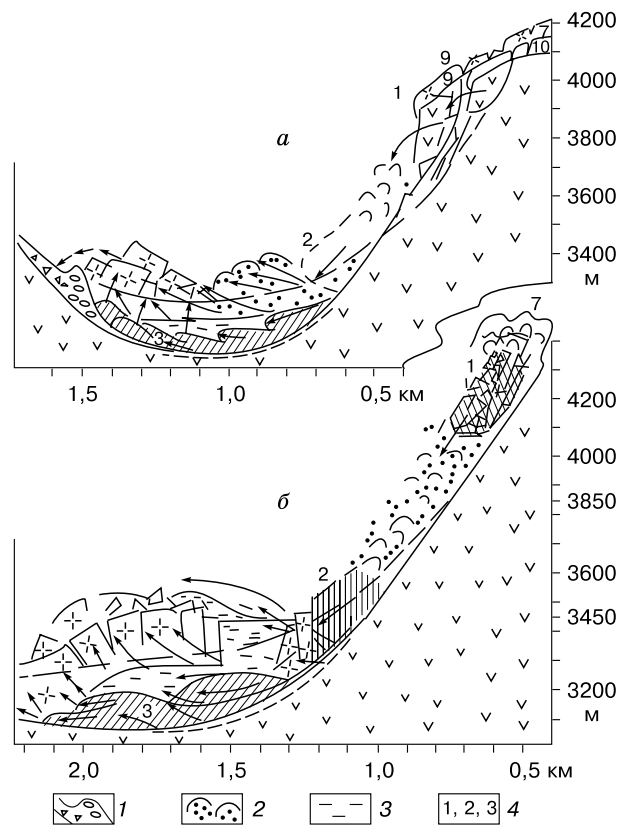


Рис. 3. Импактная стадия формирования селевого очага в тыловой части ледника Колка при падении крупных обвалов с правого борта ледникового цирка (а) и с задней стенки цирка вдоль оси ледника (б):

1 – осыпь и морена; 2 – снег и фирн; 3 – скопления воды; 4 – стадии развития обвалов. Остальные обозн. см. на рис. 1.

600 м достигает огромной величины – около 100 м/с (см. рис. 3,а).

Заметим, что при прохождении обвального тела через фирновую зону там возникает специфический процесс рассеечения телом обвала увеличивающейся по толщине снежно-фирновой массы, которая лобовой частью обвала разбрасывается с огромной скоростью в разные стороны (см. рис. 3,а, стадия 2). В ходе такого рассеечения (или “прорезания”) фирновой зоны возникает и ударная лобовая волна, состоящая из зерен фирна, дробленного льда, обломков горной породы осыпей, которая распространяется поперек ледника над его поверхностью. Обладая скоростью около 300 м/с, она через 2–3 с ударяется в левую боковую морену: звуковая волна вместе с пылевой пульпой уходит при этом вверх по склону, а крупные обломки льда и горной породы оседают в районе морены.

В течение этих 2–3 с движение обвального тела по ложу порождает своеобразные динамические и тепловые эффекты. Во-первых, обладающая колоссальной инерцией гигантская масса обвала, двигаясь по вогнутому ложу, подвергается воздействию больших центробежных сил, вследствие чего происходит прижатие горной породы к ложу, резко возрастает коэффициент трения и, как результат, происходит перегрев контактирующих движущихся слоев, т. е. возникает плоский очаг нагрева. Во-вторых, верхние слои тела обвала, сохраняя большую скорость, послонно срезаются (с выделением тепла за счет трения) и активно внедряются в лед, вызывая его временный локальный переход в жидкокристаллическое состояние при огромных (более 500 атм) давлениях. В-третьих, такое стремительное многослойное внедрение осуществляется, вероятно, не в чистый лед, а в смесь ледникового льда, воды и масс предыдущих, меньших обвалов, материал которых отделяется от ложа и приподнимается последним, самым крупным обвалом. В-четвертых, все эти события развиваются под поверхностью ледника – внутри ледникового тоннеля плоской лопастевидной формы.

В результате сложного взаимодействия всех этих термобарических и гидромеханических процессов происходит приподнимание и перекоп разбитых на крупные куски блоков ледникового льда, подпруживающих покрытое с поверхности дробленным льдом озеро водогрунтовой массы, размеры которого постепенно увеличиваются за счет таяния льда, а насыщенность грунтом (мутность) уменьшается. Особо следует отметить медленный, но неуклонный рост уровня воды в таком скрытом водоеме за счет нескольких источников тепла – фрикционных, активационных и, возможно, фумарольно-гидрогеологических.

Действие другого крупного обвала, сорвавшегося из района висячего ледника № 7 [Роттаев и др., 1983; Тутубалина и др., 2005] и прошедшего вдоль динамической оси ледника Колка (см. рис. 3,б), во многом похоже на описанный случай, за исключением одного принципиально важного момента. А именно, его движение было направлено вдоль динамической оси Колки, следовательно, воздействие его здесь максимально и заключается в том, что обвал отодвинул ледяную плотину (точнее, “пробку”), которая сдерживала растущий объем скрытого озера. Можно утверждать, что этот “продольный” обвал стал заключительным звеном импактной стадии перестройки всего селевого очага, который и после удара продолжал активно изменяться и формировать те особенности строения сложнейшей термобарогидромеханической полузакрытой системы (т. е. селевого очага), развитие которой неуклонно вело к катастрофе.

Наконец, при анализе действия крупных обвалов как основного звена импактной стадии механизма формирования катастрофического ледникового селя, нельзя не отметить два дополнительных момента: роль фумарол и роль сжимаемого в процессе обвалов воздуха. Если первый из них подробно описан в работе Я.Д. Муравьева [2005], то второй требует специального рассмотрения.

Как показывают сделанные нами оценки, при чрезвычайно сильном сжатии воздуха в ледово-водокаменной среде при перегрузках свыше 15g, а также при резком падении давления и росте температуры (т. е. при мощных термобарических скачках) активно проявляются кавитационные эффекты (“холодное кипение” воды), которые стремительно разрушают горные породы, превращая крупные обломки кристаллических сланцев в пылевато-песчаный мелкозем и щебень. Налицо массовое диспергирование горных пород, которое отмечалось исследователями после катастрофы как образование “муравьиных куч” [Роттаев и др., 1983; Петраков и др., 2004; Роттаева и др., 2005; Черноморец, 2005]. Это явление хорошо известно, но до настоящего момента генезис “муравьиных куч” приписывался криогенному выветриванию [Геокриологический..., 2003] – процессу очень и очень длительному, между тем как здесь процессы происходили за доли секунды.

Особо следует выделить эффект формирования ударных упругих волн на ложе ледника. На вогнутых участках ложа (см. рис. 3) кривизна его поверхности приводит к тому, что в процессе движения обвала вниз по склону со скоростью около 100 м/с на этих участках развиваются чрезвычайно высокие давления. Под действием этих давлений происходит динамическое прогибание скаль-

ного ложа, а в момент инерционного сброса верхних слоев обвального тела и выпрямления приповерхностной части ложа параллельно контакту ложе–лед возникает упругая бегущая волна. Эта волна, движущаяся со скоростью около 4–5 км/с, обгоняет обвальную массу и деформирует не только ложе, но и нижние слои льда (на контакте ложе–лед) вплоть до языка ледника, возникает дробленый слой пористого льда. Вследствие диссипации (потери, рассеяния) энергии процесс формирования пористого слоя при динамической деформации ложа затухает. При прохождении продольных и поперечных волн напряжений ледник испытывает пульсирующие удары снизу вверх, в результате чего возникают локальные очаги дробления (разуплотнения) льда, которые в зависимости от конфигурации, размеров, насыщенности мореной частично или полностью восстанавливаются. Однако при повторных прохождении волн такого типа, даже менее мощных, картина повторяется, а толщина пористого слоя растет.

Есть основания считать, что в конце августа или в начале сентября 2002 г. по леднику прошли две мощные волны деформации. В результате произошло дробление нижних слоев льда и растрескивание ледниковой поверхности, и доказательством этому служит частичная “потеря” моренного чехла, когда язык ледника оставался на прежнем месте [Черноморец, 2005, рис. 5.3,б]. Только дробление поверхности ледника при сильном встряхивании способно было сбросить поверхностную морену в возникавшие трещины разрыва.

Особое внимание следует обратить на наличие описанных выше следов импактного раздавливания крупных обвалов при внедрении горных пород в основание ледника Колка (в его тыловой части). Эти следы в виде серповидных лопастей горных пород отчетливо видны даже без увеличения на фотографиях, опубликованных в целом ряде работ (см., например, [Десинов, Котляков, 2005; Черноморец, 2005]).

ВЫВОДЫ

1. Впервые предложенное понятие критической массы обвалов при их ударах о ледник разработано на основе энергетического (теплового) эталона крупности – количества тепла, необходимого для превращения в воду куба льда со стороной 11 м, соответствующего пределу текучести льда (0,1 МПа). Этот количественный критерий использован для разделения обвалов по их величине: крупные обвалы характеризуются диапазоном массы от 100 тыс. до 7 млн т (10^8 – $7 \cdot 10^9$ кг), средние и мелкие – массой менее 100 тыс. т, а сверхкрупные – массой более 7 млн т.

2. Исследование взаимодействия (энергообмена) крупных обвалов с ледником позволило описать импактный (ударный) механизм подготовки ледника Колка к срыву как последовательный и взаимосвязанный процесс смены адиабатических эффектов сжатия и выброса воздуха, стремительного проникновения обвалов в лед внутри жидкокристаллической оболочки, жестких ударов по скальному ложу, прохождения ударных акустических волн во льду и по ложу, мощных термобарических колебаний внутри ледника, термоактивационного диспергирования горных пород, фрикционных и тепловых эффектов при центробежных перегрузках (15–20g) на вогнутых участках ложа, его прогибанием–выпрямлением с формированием жестких сферических волн, направленных в ледник снизу вверх и приводящих к разрушению льда на контакте сред в виде пористого слоя.

3. Главными звеньями импактного механизма подготовки ледника к срыву являются гигантские термобарические колебания внутри ледника (1–150 МПа), формирующие пузырчатые емкости с пульсирующим веществом горных пород, льда, воды, газов, а также ударные сферические волны на ложе, разрушающие ледник снизу до образования пористого слоя. Именно они стимулируют развитие состояния неустойчивости в тыловой части ледника со сложным проявлением комплекса термобарических и гидромеханических процессов, обуславливающих непрерывно нарастающую, скачкообразную дестабилизацию системы ложе–ледник, что позволяет считать импактный механизм подготовки ледника к срыву первым этапом формирования селевой ледово-водокаменной катастрофы.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность за предоставленные материалы И.В. Галушкину, д-ру геол.-мин. наук С.Н. Волкову, канд. геогр. наук С.С. Черноморцу.

Литература

- Бондарик Г.К.** Общая теория инженерной (физической) геологии. М., Недрa, 1981, 256 с.
- Геворкян С.Г.** О возможном импактном происхождении чаши Южного Каспия // Экономика природопользования, 1998, № 6, с. 80–84.
- Геворкян С.Г., Калантарова Ж.Х., Голубов Б.Н.** Нелинейный закон трения для грунтов // Бюл. МОИП. Отд. геол., 2005, т. 81, № 2, с. 36–41.
- Геокриологический** словарь. М., ГЕОС, 2003, 140 с.
- Гляциологический** словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л., Гидрометеиздат, 1984, 528 с.
- Десинов Л.В., Котляков В.М.** Ледник Колка в 2002 году: от активизации до катастрофы // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 98, с. 146–154.
- Ледник Колка:** снова катастрофа // Материалы гляциол. исслед., 2002, вып. 93, с. 221–228.
- Маэно Н.** Наука о льде. М., Мир, 1988, 231 с.

- Муравьев Я.Д.** Газовое извержение в цирке – возможная причина развития подвижки ледника Колка по катастрофическому сценарию // *Материалы гляциол. исслед.*, 2005, вып. 98, с. 44–55.
- Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** По следам Геналдонской катастрофы: год спустя // *Криосфера Земли*, 2004, т. VIII, № 1, с. 29–39.
- Петренко В.Ф.** Физика льда // *Материалы гляциол. исслед.*, 1990, вып. 68, с. 3–8.
- Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** Гляциальная катастрофа 2002 г. в Северной Осетии // *Криосфера Земли*, 2003, т. VII, № 1, с. 3–17.
- Проблемы** классифицирования склоновых гравитационных процессов / Под ред. М.В. Чуринова, Е.А. Толстых. М., Наука, 1985, 204 с.
- Роготаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н.** Исследование пульсирующего ледника Колка. М., Наука, 1983, 169 с.
- Роготаева О.В., Котляков В.М., Носенко Г.А. и др.** Исторические данные о подвижках ледников на Северном Кавказе и Кармадонская катастрофа 2002 г. // *Материалы гляциол. исслед.*, 2005, вып. 98, с. 136–145.
- 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.** Селевые очаги до и после катастроф. М., Науч. мир, 2005, 184 с.

*Поступила в редакцию
29 мая 2006 г.*