

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 511.311.21.(234.9)

ГЛИССИРУЮЩИЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ
ЛЕДОВО-ВОДОКАМЕННОГО СЕЛЯ ПРИ СРЫВЕ ЛЕДНИКА КОЛКА В 2002 ГОДУ

В.Л. Познанин, С.Г. Геворкян*

*Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов МПР–РАН,
121357, Москва, ул. Вересаева, 15, Россия, pozninin@list.ru
* ФГУП Фундаментпроект, 125993, Москва, Волоколамское ш., 1, Россия*

Детально рассмотрен механизм формирования Геналдонской катастрофы 2002 г. Срыв ледника Колка, его глиссирующий разгон и динамическое разрушение привели к вынужденной трансформации ледникового тела в ледово-водокаменный селя с расходом около 2 млн м³/с. Установлено, что срыв был вызван потерей сцепления ледника с водонасыщенным пористым слоем при гидравлическом ударе силой до 40 МПа, в результате чего возникло три взаимосвязанных тела–потока: 1) селевой (20 м/с), двигавшийся перед фронтом набравшего скорость ледника, 2) ледниковое тело (3–35 м/с), глиссировавшее по поверхности селя, 3) селеподобный поток (50 м/с), сброшенный вправо инерцией с поверхности ледника. На основе анализа их взаимодействия при скользящем ударе ледникового тела о дно долины ниже языка Майли был сделан вывод о формировании при ударе функционально устойчивой структуры – совокупности подвижных ледяных блоков, насыщенных циркулирующей водогрунтовой массой и окруженных вязкой грязекаменной оболочкой (тело ледово-водокаменного селя с глиссирующим механизмом высокоскоростного (60 м/с) потока).

Ледниковое тело, скользящий удар, глиссирование, селевой поток

GLIDING MECHANISM OF THE FORMATION OF ICE-WATER-ROCK MUDFLOW,
KOLKA GLACIER, 2002

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, pozninin@list.ru
* FGUP Fundamentproject, 125993, Moscow, Volokolamskoye sh., 1, Russia*

The process of the formation of the Genaldon catastrophe in 2002 has been considered in details. The failure, gliding acceleration and dynamic destruction of Kolka glacier led to the forced transformation of the glacial body into an ice-water- rock mudflow with the discharge about 2 million m³/sec. It was established that failure had been caused by the loss of the cohesion between the glacier and the water-saturated porous layer at hydraulic impact by force up to 40 MPa. Therefore, three interrelated bodies–flows occurred: 1) the mudflow (with the velocity of 20 m/s), which moved before the front of the picking-up-the-speed glacier, 2) a glacial body (3–35 m/s), which glided on the surface of the mudflow, and 3) the mudflow-type flow (50 m/s), thrown off to the right by the inertia from the surface of the glacier. The analysis of their interaction during the sliding impact of the glacial body against the bottom of the valley under the Maily tongue leads us to a conclusion that during the impact a functionally steady structure was formed. That was an aggregate of moving ice blocks, saturated with the circulating water-soil masses and surrounded by a viscous mud-and-gravel envelope (the body of the ice-water- rock mudflow with the gliding mechanism of the high-speed (60 m/s) flow).

Glacial body, sliding impact, gliding, mud-debris flow

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от существующих представлений о причинах Геналдонской ледниковой катастрофы 2002 г. [Десинов, Котляков, 2005; Муравьев, 2005; Рототаева и др., 2005] мы сформулировали и последовательно развиваем идею о срыве Колки в результате саморазвития ледника, основываясь при

этом на физических расчетах, отражающих поведение тех или иных объемов горных пород, льда, воды в процессе их взаимодействия, изменения и движения. Суть предлагаемой идеи в следующем.

Импактный механизм подготовки катастрофы в результате серии крупных обвалов горных пород

и льда вызвал возникновение емкости импактного селевого очага в тыловой части цирка, а также резкое ударно-механическое изменение структуры ледника на контакте с ложем, где сформировался мощный пористый слой дробленого льда объемом около 35 млн м³ [Познанин, Геворкян, 2007, 2008]. В селевом очаге и пористом слое скопилось более 11 млн м³ воды, которая находилась в напорном состоянии. Рост уровня воды до критического значения привел к сработке напорно-ударного механизма отделения ледника от ложа вследствие серии мощных гидравлических ударов. В результате ударов ледник потерял сцепление с ложем и, залегая на несжимаемой водонасыщенной массе пористого слоя, начал ускоренное гравитационное движение, которое представляло собой глissирующий разгон, динамическое разрушение и трансформацию ледникового тела в ледово-водокаменный сель с расходом до 2 млн м³/с.

Общепринятые представления о стадийности селевых процессов и зональности селевых бассейнов использованы нами таким образом, что стадия формирования селя для удобства анализа и синтеза сложного, но единого явления разделена на четыре элемента-стадии: 1) срыв ледника при выравнивании бокового перекося, 2) разгон ледникового тела с инерционным сбросом селеподобного потока, 3) динамическое разрушение тела при потере опоры, 4) формирование глissирующего механизма ледово-водокаменного селя. Выделенным стадиям (точнее, подстадиям) соответствуют определенные временные интервалы между поверхностными сейсмическими толчками, маркирующими проявление ключевых событий в развитии катастрофы. Специальный анализ продолжительности временных интервалов между толчками и сопоставление их с характером и лавинообразным развитием катастрофы привели к выводу о том, что минимальному интервалу времени (30 с) соответствовало кардинально значимое событие – срыв и скользящий удар ледника о левую боковую морену. Это позволило соотнести временные интервалы с пространственными и выделить характерные участки – зоны протекания установленных стадий формирования катастрофы.

Казалось бы, значимость выделения стадий и зон формирования катастрофы столь велика, что они должны найти отражение в названии статьи. Однако в силу условности и синтетичности их смыслового содержания при необходимости отражения сущности процесса формирования катастрофы мы вынесли в название публикации два ключевых звена процесса: 1) срыв ледника и 2) глissирующий механизм трансформации ледникового тела в функционально устойчивую структуру – высокоскоростной ледово-водокаменный поток.

СРЫВ ЛЕДНИКА КОЛКА

Состояние ледника Колка перед срывом характеризовалось особыми чертами:

1) наличием на контакте ледник–ложе несжимаемой водно-ледовой массы пористого слоя, толщина которого увеличивалась от 10–15 м в районе языка ледника до 40–50 м в тыловой его части (что при общем объеме дробленого слоя около 35 млн м³ и пористости, равной 15 %, дает объем воды более 5 млн м³);

2) развитием неустойчивости импактного селевого очага, содержавшего 6,6 млн м³ воды и обеспечивавшего напорное состояние всей гидравлической системы;

3) существованием и постоянным действием на ледник срывающей силы, достигавшей 75 млн кН и определяемой общей массой ледника (150 млн т) и средним уклоном ложа (0,05);

4) окончанием заполнения пустот пористого слоя под языком ледника, когда в момент прорыва воды из-под ледника (в 20 часов 09 минут 51 секунду) возник мощный (около 40 МПа) гидравлический удар, сработавший не на расширение пористого слоя, а на его сжатие (рис. 1, а).

Такое состояние ледника прямо указывает на неизбежность его срыва. Однако даже в этом состоянии Колка не страгивался с места в течение 1–2 с, пока упругая волна при гидравлическом ударе, двигаясь вверх к очагу со скоростью до 1500 м/с, сдавливая водно-ледовую массу в пористом слое с такой силой (40 МПа), что вода из очага не могла поступать в напорную систему при гидростатическом давлении всего 3,5 МПа (см. рис. 1, а). Из-за неразрывности водной среды сток из очага прекратился на 1–2 с. Бегущая вверх к очагу волна сжатия вызвала “мгновенное” выдавливание части водно-ледовой массы из-под ледника по его краям – преимущественно вдоль левой боковой морены, где остались следы мощных прорывов. На правом борту, который гипсометрически расположен значительно выше левого, это сжатие напорной системы вдавливало воду вверх по пористому слою вплоть до рандклюдтов, отрывая последние участки сцепления с ложем (точнее, с нижележащими слоями льда).

Ледник потерял сцепление с ложем из-за того, что сила сдавливания пористого слоя при гидравлическом ударе ($4 \cdot 10^{13}$ Н) почти в 50 раз превысила силу отрыва ледника ($8 \cdot 10^{11}$ Н). Ледник как бы завис на мгновение за счет инерции колоссальной массы его тела, которое имело особое строение. Он представлял собой наклоненную справа налево вниз, слегка изогнутую пластину толщиной до 150 м на протяжении около 1,5 км, которая в тыловой части ледника сменялась горизонтальной чашей импактного селевого очага, заполненного водой и оконтуренного по бортам уступами льда. Эти

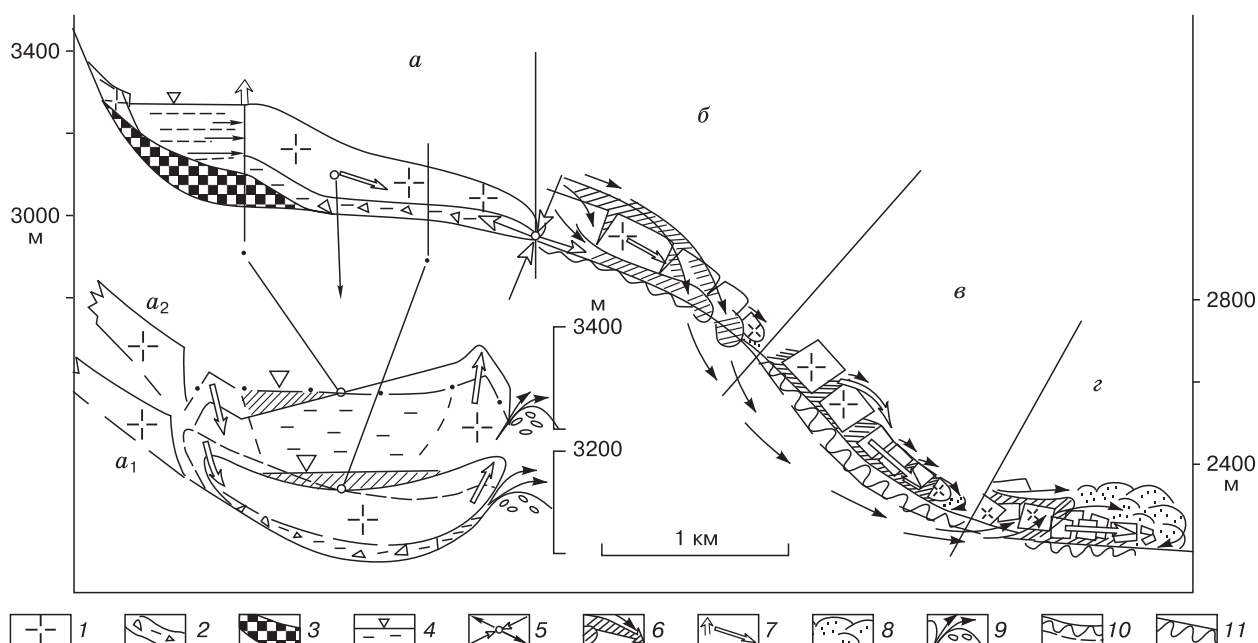


Рис. 1. Стадии возникновения ледниковой катастрофы:

a – срыв ледника при выравнивании бокового перекоса (a_1 – a_2); *б* – разгон ледникового тела с инерционным сбросом потока; *в* – разрушение льда с заваливанием влево; *г* – формирование глиссирующего механизма движения ледово-водокаменного потока.

1 – тело ледника и блоки льда; 2 – пористый слой; 3 – обвальное тело; 4 – вода в селевом очаге и ее уровень; 5 – силы при гидравлическом ударе; 6 – селеподобные потоки и направления их движения; 7 – направления движения ледника и его частей; 8 – динамическая смесь воздуха, воды, дробленого льда и обломков горных пород; 9 – направление выбросов водно-ледовой смеси через левую боковую морену; 10 – положение тальвега под слоем мертвых льдов; 11 – масса селевого потока, по которой глиссировало ледниковое тело.

уступы отчетливо видны на космоснимках [Ту-тубалина и др., 2005, с. 68–69, рис. 4, 6б]. Такое наклонно-горизонтальное, деформированное крупными разрывами строение ледника определило характер как его начального движения, так и опорожнения емкостей селевого очага в течение 30 с до следующего за гидравлическим ударом поверхностного толчка.

Потеря сцепления ледника с ложем вызвала возобновление прорыва водно-ледовой массы из-под языка с одновременным медленным, но ускорившимся смещением ледникового тела. Прорыв водно-ледовой массы имеет смысл рассмотреть несколько позже, поскольку он послужил одной из причин формирования глиссирующего механизма разгона ледника. Начальное же движение ледника в виде скользящего выравнивания его тела, происходившее по водно-ледовой массе пористого слоя, было направлено справа налево вниз по линиям тока льда и осуществлялось за счет постоянного действия огромной сдвигающей силы как составляющей веса оторвавшегося ледникового тела. В течение 30 с ледник сместился на расстояние до 100 м (рис. 2, *a*) и со скоростью более 3 м/с врезался в левую боковую морену: грандиозный скользящий удар, вероятно, и был зафиксирован сейсмо-

станциями в 20:10:21 как поверхностный толчок. Следы отрыва ледникового тела от правого борта и мощного удара о моренный вал с выбросами водно-ледовых масс через гребень морены отчетливо видны на ряде фотографий (см., например, [Десинов, Котляков, 2005, с. 146, рис. 16]).

Однако при начальном сдвиге ледника в первые же секунды его выравнивания началось механическое разрушение стенок емкости селевого очага, находившихся в напряженном состоянии под большим (около 15 атм) гидростатическим давлением. Скользящее выравнивание ледника справа налево вниз представляло собой ротационное осевое проворачивание его тела, что вызвало заваливание вправо горизонтальной чаши селевого очага, разрушение стенок и прорыв воды (см. рис. 1, a_1 – a_2). Прорыв воды осуществлялся на поверхность начавшего движение ледника в виде мощного вала высотой, вероятно, до 30 м при ширине потока около 150 м. Максимальный расход прорывной волны составлял до 100 тыс. м³/с при скорости 28 м/с, оцененной по формуле Шези–Маннинга при плоском серповидном поперечном сечении потока (см. рис. 1, a_1). Очевидно, что прорывной вал воды, двигаясь по начавшему ускоренное смещение леднику, устремился по некоторой изменяющейся в

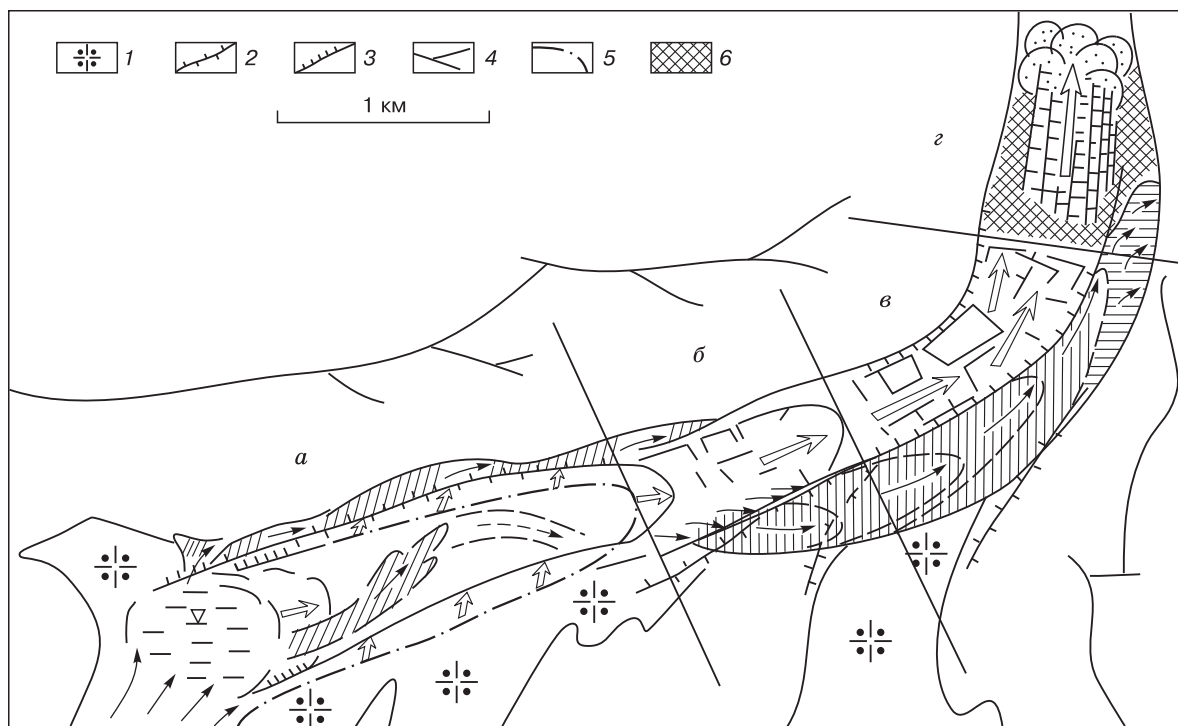


Рис. 2. Конфигурация зон формирования селевой катастрофы в верховьях ледника Колка (в плане):

а – зона начального смещения ледника и опорожнения емкости импактного очага; *б* – зона разгона ледника и инерционного сброса потоков через моренный треугольник и ледник Майли; *в* – зона дробления ледниковых блоков и бокового захвата воды огибающего потока; *г* – зона высокоскоростного взаимодействия льда, воды, грунта и воздуха – формирование инверсионной структуры потока с глиссирующим механизмом движения селя.

1 – поверхность ледников; 2 – морены; 3 – крутые и обрывистые участки долины; 4 – скальные гребни; 5 – контур ледника в момент отрыва; 6 – селевая грязекаменная масса. Остальные условные обозн. см. на рис. 1.

плане траектории от правого борта к левому и до момента удара ледника о морену успел преодолеть более 700 м. При этом опорожнилась почти половина объема оставшейся в очаге воды (около 2 млн м³). Большая скорость воды обеспечивала активный захват кусков льда и морены с дробленной поверхности ледника, что вызывало некоторое снижение скорости и расширение фронта селеподобного потока, который двигался по поверхности выскальзывавшего из-под него и набравшего скорость ледникового основания. При ударе ледника о морену часть воды и льда были сброшены за гребень морены, а сам поток начал смещаться вправо, сталкиваемый приподнимающимся левым краем ледникового тела (см. рис. 1, 2).

Таким образом, при потере сцепления ледника с ложем в течение 30 с начала стремительно развиваться первая стадия катастрофы. Она представляла собой последовательную синхронно-асинхронную цепочку функционально связанных событий: 1) мощный прорыв водно-ледовой смеси из-под языка ледника; 2) соскальзывание (срыв) оторвавшегося ледникового тела по массе пористого водонасыщенного слоя в направлении справа налево

вниз до момента бокового удара о левую боковую морену; 3) разрушение селевого очага за счет растяжения и ротационного опрокидывания емкости; 4) формирование прорывной волны на поверхности разгоняющегося ледника в виде высокоскоростного потока, насыщаемого кусками льда и морены до селеподобного состояния.

МЕХАНИЗМ РАЗГОНА ЛЕДНИКА И ИНЕРЦИОННЫЙ СБРОС ПОТОКА

Ключевым моментом в понимании механизма разгона ледника выступает упомянутое выше событие – мощный прорыв водно-ледовой массы из-под языка в момент начала его движения с последующим через 30 с ударом о морену. Прорыв был вызван большим статическим давлением воды (около 3,5 МПа) в напорной системе “очаг–пористый слой”, которое (давление) “включилось” после прохождения упругой волны сжатия при гидравлическом ударе вверх до очага. При таком давлении и при сечении пористого слоя под языком около 2 тыс. м² прорыв представлял собой выброс водно-ледовой массы со скоростью до 40 м/с, т. е. с расходом 80 тыс. м³/с в течение нескольких секунд. Пос-

ле прорыва расход потока резко сократился, но затем вновь увеличился. Такие выбросы происходили, вероятно, в течение всего времени разгона ледника с разной частотой и максимальными расходами более 100 тыс. м³/с, поскольку суммарно было сброшено до 5 млн м³ воды. Пульсирующий поток двигался по узкому щелевидному врезу в моренно-ледниковых отложениях Колки, сохранившихся после пульсации 1970 г., активно насыщался твердым материалом морены и погребенным льдом, превращаясь в мощный селя с лобовой волной до 20 м при ее ширине более 200–300 м. Активному формированию селя способствовало постепенное возрастание уклона русла, что обеспечивало высокую скорость лобовой волны. Селевой вал со скоростью 20 м/с преодолел за 30 с около 600 м, т. е. он двигался перед набиравшим скорость ледником.

Ледник после удара о левую боковую морену имел скорость около 3 м/с и разгонялся как единое твердое тело по водонасыщенному пористому слою. Ускоренному движению ледникового тела способствовало гидростатическое давление в тыловой части разрушающейся структуры импактного селевого очага, уровень воды в котором понижался при ее напорном поступлении на контакт пористого слоя и нижней неровной поверхности ледника. Именно неровности этой поверхности при ускоренном движении по неровностям пористого слоя вызывали его динамическое линейное смятие, порционное затягивание воды из оставшейся емкости очага и резкое пульсационное усиление выбросов водно-ледовой массы из-под языка набиравшего скорость ледника.

Тыловая часть ледника, будучи перегружена материалом обвалов горных пород, оторвалась от основного тела, постепенно замедлила свое движение и, цепляясь за борта более узкой нижней части ледникового ложа, остановилась, перегородив выход из цирка в форме хорошо известного “ригеля”, сложенного ледяными блоками структуры импактного очага, мореной и обломочным материалом обвалов [Муравьев, 2005, с. 48, рис. 2; Рототаева и др., 2005, с. 148, рис. 8].

Фронтальная часть ледника ускоренно двигалась по выбрасываемому из-под языка пульсирующему потоку, который вначале значительно опережал фронт ледника. Естественно, что такой характер движения без заметного трения по поверхности, покрытой слоем воды, обеспечивал быстрый разгон ледника пропорционально увеличению уклона. В конце километровой отрезка пути ледник разогнал до 35 м/с, что при средней скорости около 20 м/с дает время прохождения этого расстояния 50 с. Очевидно, что за это время селевой вал, двигавшийся перед ледником со скоростью 20 м/с, преодолел еще 1000 м, т. е. его фронт находился на расстоянии 1,6 км от стационарного положения языка ледника (см. рис. 1, б, 2, б).

На выпуклом участке разгона ледника (см. рис. 1, б, 2, б) произошло два знаменательных события: формирование поперечных трещин и сброс поверхностного потока. Причина этих событий кроется в специфике движения ледника по резко меняющемуся рельефу вдоль левого борта цирка, где нижняя 400-метровая часть морены, расположенная под углом к направлению движения, сменяется 500-метровым понижением долины ручья Шау, куда сталкивались ледяные блоки языка при разгоне. Формирование трещин в едином ледниковом теле происходило за счет приподнимания и переваливания его левого борта через морену с боковым перекосом поверхности ледника до 10°, ее опусканием в частично заполненное понижение Шау и новым стремительным подъемом на скальном борту цирка при возрастании скорости разгона с 5–10 до 30–35 м/с. Такой “волнообразный” разгон распадающегося на гигантские блоки ледника подчинялся общему направлению гравитационного движения, а масса составлявших его частей-блоков приобретала возможность относительного смещения и взаимного силового воздействия. Обмен силовыми импульсами между ледяными блоками был существенно смягчен наличием воды на контактах. Вода (точнее, селеподобная масса) выдавливалась снизу на выступах ложа и проникала с поверхности, по которой двигался селеподобный поток.

Движение потока по поверхности набиравшего скорость ледника характеризовалось возрастанием скорости потока до 30 м/с, его концентрацией и отклонением вправо за счет столкновения потока в результате приподнимания левого борта ледника на участке левой боковой морены, где остались четкие следы скользящей обработки давлением льда. Стремительный прямолинейный разгон ледника и уходивший вправо по его поверхности поток в силу относительной независимости движения направленных под углом тел привели к инерционному сбросу потока на поверхность моренного треугольника и далее через ледник Майли (см. рис. 2). Сброс представлял собой сконцентрированный поток селеподобной массы с расходом около 100 тыс. м³/с, которая сносилась с поверхности набиравшего скорость ледника. При собственной скорости потока до 30 м/с и ширине его до 150 м разгон ледника на участке сброса с 10 до 30 м/с вызвал скачок скорости потока с 40 до 60 м/с при его движении по естественной поверхности. Ускоренное смещение ледникового фронта сброса шириной до 150 м относительно правой морены на расстояние до 500 м в течение 20 с привело к формированию на поверхности разноскоростной полосы селеподобного вала. Его скорость по внешнему огибающему краю была в 1,5 раза ниже, чем по внутреннему, при сохранении общего высокоскоростного режима движения плоского потока, про-

хождение которого по огибающей кривой показано на рис. 2. Сброс потока прекратился через 20 с в силу того, что правый борт ледника резко поднялся на моренном валу, когда было сброшено около 2 млн м³ селеподобной массы, а оставшаяся ее часть вновь двинулась вниз по поверхности ледника.

При средней протяженности следов потока в зонах б и в (см. рис. 2), равной 2,5 км, фронтальный вал преодолел это расстояние за 50 с со скоростью 50 м/с. В этом случае остается непонятным механизм движения потока по неровной поверхности моренного треугольника и ледника Майли. Физическое объяснение данному феномену можно получить из анализа морфологии и структуры высокоскоростного селеподобного потока. Морфологически поток представлял собой плоское тело с отношением ширина/глубина около 100. При инерционном сбросе с ледника поток испытал скользящий удар и “мгновенно” претерпел дифференциацию на два слоя – нижний и верхний. Нижний слой представлял собой систему поперечных, стремительно вращающихся турбулентных ядер-валов, слегка изогнутых в плане, направленных выпуклостью вниз и повторяющих конфигурацию огив на леднике Майли. Нижний слой можно рассматривать как некий аналог стоячих волн плоских потоков на шероховатом основании [Чугаев, 1975; Познанин, 2001], возникающих при трении об основание и вращающихся за счет стремительного движения по ним верхнего слоя, который взаимодействует с ротационными вихрями через буферный подслой [Чугаев, 1975; Морозов, 1987]. Верхний слой представлял собой стремительно летевшее плоское тело с режимом движения, близким к ламинарному, т. е. с параллельными линиями тока. Только при такой ламинарно-вихревой структуре плоского селеподобного потока можно объяснить быстрое (за 10–15 с) формирование крупных поперечных полос по огивам на поверхности ледника Майли, следы которых были отчетливо видны в первые дни после катастрофы [Рототаева и др., 2005, с. 141, рис. 7].

Таким образом, вторая стадия формирования катастрофы представляла собой следующий комплекс функциональных звеньев: 1) разгон ледникового тела происходил по поверхности обогнавшего его селевого потока, что обеспечило глиссирующий механизм возрастания скорости ледника на километровом участке с 3 до 35 м/с; 2) выпуклый продольный профиль участка разгона вызвал поперечное разламывание ледника на крупные блоки, отрыв тыловой части, ее торможение и остановку в форме “ригеля”; 3) боковой перекося ледникового тела при разгоне до 30 м/с привел к инерционному сбросу селеподобного потока с поверхности ледника в виде высокоскоростного (50 м/с) плоского потока, огибающего разгонявшийся ледник справа.

ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЛЕДНИКОВОГО ТЕЛА

Третья стадия формирования катастрофы (участок в на рис. 1, 2) представляет собой развитие событий на предыдущей стадии еще в течение 30 с, вплоть до поверхностного сейсмического толчка в 20:11:40, т. е. через 1 мин 20 с после бокового удара ледника о морену.

Сложность ситуации заключается в одновременно протекавших и взаимосвязанных событиях, точнее – в разноскоростном движении трех объектов-тел: 1) мощного селевого потока перед фронтом ледника; 2) глиссирующего по поверхности селя и распадающегося на блоки ледникового тела; 3) плоского высокоскоростного селеподобного потока, огибающего ледник справа. Гидрогляциомеханика события корректно может быть рассмотрена в указанной последовательности, исходя из вышеизложенных сведений и детального анализа следов и признаков на крупномасштабных цветных фотографиях, характеризующих ситуацию до и после катастрофы [Черноморец, 2005, рис. 5.3.а; Рототаева и др., 2005, рис. 7; Десинов, Котляков, 2005, рис. 6].

Мощный селевой поток двигался по русловой зоне ручьев Колка–Шау со скоростью 20 м/с в виде лобовой волны высотой до 15–20 м на участке крутизной около 20° с максимальной величиной расхода более 100 тыс. м³/с, захватывая материал морены и погребенный лед, сохранившийся в виде пластов переменной толщины (5–20 м) после пульсации Колки в 1970 г. Состояние погребенных льдов на этом участке характеризовалось наличием большого числа подповерхностных пустот в виде деформированных каналов стока, термокарстовых полостей и термоэрозионных емкостей, которые лишь частично были заполнены водой в силу транзитного режима стока. Такая почти губчатая структура льдов свободно выдерживала давление слоя морены толщиной 3–8 м, но была не способна выдержать ударно-эрозионное воздействие селя. Селевой поток вспарывал слой погребенных льдов и морены. Это приводило к расширению селевого фронта до 500–700 м и лавинообразному увеличению расхода селя ежесекундно на 10–80 тыс. м³, т. е. почти до 1 млн м³/с в створе в–г (см. рис. 1, 2), что дает высоту фронтального вала до 70 м при его скорости 20 м/с. Приведенные параметры указывают на то, что сам селевой поток, двигавшийся перед фронтом ледника, имел катастрофический характер.

Ледниковое тело в зоне в (см. рис. 1, 2) двигалось набирая скорость с 35 до 60 м/с и в течение 30 с преодолело расстояние более 1300 м, т. е. практически догнало лобовую волну селевого потока. В верхней части зоны разрушения ускоренное движение ледникового тела вниз по уклону до 0,3

происходило по прямолинейному участку цирка, заполненного селевым потоком. В силу того что скорость ледника была значительно выше скорости селя, возникало особое глиссирующее скольжение ледяных блоков по грязекаменной массе в центральной части ледникового тела. Однако его левый край двигался по скальному борту цирка, а правый глиссировал (почти без трения) по селеподобной массе плоского огибающего потока в зоне их контакта. Очевидно, что фрикционные эффекты вдоль левого “сухого” края ледникового тела приводили к росту разворачивавших влево напряжений, взаимному давлению ледяных блоков и их частичному дроблению. Такой характер движения глиссирующее ледниковое тело имело вплоть до крутого поворота долины влево под углом около 120° . Изменение морфологии долины на повороте (отступление борта) вызвало потерю опоры левого края ледникового тела на скорости около 60 м/с, что привело к гравитационному заваливанию и плавному повороту объекта с активным динамическим дроблением блоков.

Только потеря боковой опоры способна вызвать перекося огромной массы ледникового тела и изменение прямолинейности его инерционного движения без удара о правый борт долины, где остались следы только плавного поворота ледово-водокаменной массы. Поворот произошел в момент достижения фронтом глиссирующих ледяных блоков зоны лобовой волны селя на участке расширения долины и уменьшения уклона поверхности в районе нижней части языка ледника Майли, куда уже стремительно врывался плоский огибающий поток (см. рис. 1, 2).

Плоский селеподобный поток, сброшенный с поверхности ледника при его разгоне, огибал ледниковое тело справа (см. рис. 2) в виде высокоскоростного вала. Скорость потока на контакте с разогнавшимся ледниковым телом не уменьшалась в силу особой ламинарно-вихревой структуры и поддерживалась на уровне около 50 м/с ускорявшимися блоками ледника и большим уклоном поверхности. При этом их взаимодействие выражалось в захвате части потока ледяными блоками в нижней половине зоны в на рис. 2. Передний вал плоского потока достиг зоны контакта лобовой волны селевого потока и фронтальной части глиссирующих блоков ледникового тела примерно за то же время – за 5–10 с до поверхностного толчка, в 20:10:40, зафиксированного сейсмостанциями. Почти полная синхронность этих трех событий подтверждается тем, что на повороте на правом борту долины гипсометрически выше следов движения ледникового тела остались куски льда в виде прерывистой линии, маркировавшей подпор и резкий подъем уровня воды, поднявшей всплывавшие куски льда, но не размывшей четкие формы осыпных конусов (см. [Десинов, Котляков, 2005, рис. 6]).

Таким образом, третья стадия формирования катастрофы характеризуется следующими главными особенностями: 1) динамическим разрушением ледника за счет напряжений при выравнивании разнотемпных участков в его теле, дроблением крупных ледяных блоков на повороте при потере опоры, стремительном заваливании блоков влево при общем глиссирующем механизме их движения; 2) почти одновременным достижением нижней части языка ледника Майли тремя взаимодействующими потоками: селевым грязекаменным ↔ ледниковым глиссирующим ↔ огибающим селеподобным.

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОВО-ВОДОКАМЕННОГО СЕЛЯ

Формирование ледово-водокаменного селевого потока функционально вытекает из геодинамической ситуации, сложившейся за поворотом долины в месте ее расширения до 800–850 м при слиянии ручьев Колка и Майли (зона z на рис. 1, 2). Значительное уменьшение уклона здесь до 0,15–0,10 вызвало сложное взаимодействие трех потоков – селевого, ледникового и огибающего.

Селевой поток с расходом до 0,8 млн м³/с растекался на расширенном участке с уменьшением высоты лобовой волны до 40–50 м и отжимался преимущественно к правому борту долины возраставшим давлением массы глиссировавших по его поверхности ледяных блоков, которые двигались со скоростью до 60 м/с, т. е. в три раза быстрее, чем сам сел. Ситуация осложнялась боковым подпруживанием селевой массой плоского потока, его торможением и стремительным подъемом уровня воды, следы которого остались выше границы воздействия селя на правый борт долины. Вместе с тем часть плоского потока (около 1 млн м³) была уже захвачена динамически ледниковым телом в зоне разрушения льда в процессе их взаимодействия при насыщении селеподобной массой промежутков между распадавшимися ледяными блоками. Поэтому ледниковое тело перед прыжком с лобовой волны селя представляло собой совокупность подвижных ледяных блоков, связанных воедино селеподобной массой плоского потока. Эта масса весьма специфическим образом циркулировала между блоками в зависимости от их размера, формы, взаимного расположения и характера относительного ограниченного смещения в процессе общего движения. В целом локальное растяжение ледникового тела вызывало поглощение и втягивание массы с поверхности, а сжатие – выдавливание, что обеспечивало единство и функциональную целостность ледникового тела при высокоскоростном движении – глиссировании по поверхности селевого грязекаменного потока. За 5–10 с до поверхностного толчка, в 20:11:40 сложившаяся ситуация разрешилась следующим образом.

Фронтальная часть ледникового тела сорвалась с лобовой волны селевого потока и своей массой обрушилась на дно долины. Этот удар и был зафиксирован сейсмостанциями как поверхностный толчок. В течение 2 с обрушилось более 3 млн м³ ледово-водокаменной массы в виде мощнейшего скользящего удара, сила которого превышала 100 млн кН за счет высоты вала (сыгравшего роль трамплина) и дополнительного количества вещества, сбрасывавшегося в течение последующих секунд с расходом до 1,8 млн м³/с. Давление в момент удара достигало 6–10 МПа.

Обрушение фронта ледникового тела сопровождалось мощной ударной волной, представлявшей собой воздушно-водоледово-каменный поток пульпы, механика которой описана в публикации [Познанин, Геворкян, 2007], а следы ее воздействия на склоны долины хорошо видны на фотографиях, представленных, например, в статье [Никитин и др., 2006, рис. 5].

Скользящий удар при обрушении ледникового тела мы рассматриваем не как некий “мгновенный” акт, а как реальный процесс во временном интервале по крайней мере 5–10 с. За это время могло быть сброшено до 20 млн м³ вещества, а фронт ледникового тела продвинулся на 500–600 м (при такой же ширине) и начал “втискиваться” в более узкий участок долины с V-образным поперечником (в конце зоны ζ на рис. 1, 2). Глиссирующий сброс в течение 10 с, вероятно, раздавил вал волны грязекаменного селя, выдавил его по бокам и значительно обогнал его даже при некотором снижении скорости. В процессе сброса менялось состояние и характер движения вещества ледникового тела.

Фронтальная часть ледникового тела при скользящем ударе претерпела значительное разрушение ледяных блоков и мощное инерционное выдавливание селеподобной массы на контакт с днищем долины. Разрушение наиболее крупных ледяных блоков, имевших различные размеры, форму и ориентировку, сопровождалось массовым проявлением дробящих эффектов на контактах и происходило при их взаимном давлении с преобладающим направлением действия сил вперед вниз при ударе о днище долины. Характерный размер блоков, судя по “впечатанным” остаткам льда на бортах долины, составлял не менее 50 м в поперечнике. Учитывая, что средний объем таких блоков около 50 тыс. м³ и что до половины объема ледникового льда могло превратиться в мелкие куски и крошево, общее их число в ледниковом теле в момент скользящего удара и формирования устойчивой структуры ледово-водокаменного селя могло быть более тысячи. Вместе с тем несомненная компактность упаковки крупных и мелких блоков, объединенных селеподобной, насыщенной ледяным крошевом массой и общим направлением движения, позволяет рас-

сматривать сформировавшееся при ударе тело как некий гибкий волнистый параллелепипед, растянувшийся по долине более чем на 2 км.

Выдавливание селеподобной массы на дно долины достаточно оценить для первых 20 млн м³ вещества ледникового тела. Учитывая ударную перестройку структуры ледникового тела и возрастание его скважности при дроблении блоков, в указанном объеме льда могло содержаться до 4 млн м³ воды. Если при скользящем ударе за счет инерции поступило только 10 % этого объема воды, то на площади контакта лед–грунт выдавило слой воды толщиной более 1,3 м. Такого количества несжимаемой среды вполне достаточно для дальнейшего глиссирования всей массы без потери скорости тела (около 50–60 м/с) даже при “втискивании” в сужения долины, поскольку расчетная величина лобового давления такого тела достигает 20 МПа при прочности рыхлых делювиально-коллювиальных и оползневых отложений на бортах 0,1–0,5 МПа.

Таким образом, на четвертой стадии формирования катастрофы возникла устойчивая структура ледово-водокаменного потока с глиссирующим высокоскоростным режимом движения. Это было вызвано взаимодействием трех тел-потоков: 1) мощного селя с расходом до 1 млн м³/с, который двигался перед фронтом разгонявшегося и разрушавшегося ледникового тела; 2) прыжком ледникового тела с фронтального вала селевого потока, что привело к скользящему удару огромной силы, дроблению и компоновке ледяных блоков в виде гибкого тела, насыщенного водогрунтовой массой и сохраняющего глиссирующий режим движения по слою водогрязекаменной массы; 3) высокоскоростным движением огибающего потока, насыщавшего ледяные блоки в процессе разрушения ледникового тела селеподобной массой в зоне бокового контакта за счет пульсаций взаимодействовавших потоков.

ВЫВОДЫ

1. Срыв ледника Колка был обусловлен поторей сцепления с ложем за счет серии мощных гидравлических ударов при дозаполнении пористого слоя водой из импактного селевого очага в тыловой части цирка. Срыв представлял собой постепенно ускорявшееся соскальзывание ледникового тела справа налево вниз с ротационным заваливанием емкости селевого очага и опорожнением около 3 млн м³ воды. В результате этого по поверхности ледника хлынул поток с расходом около 100 тыс. м³/с и, насыщаясь кусками льда и морены до селеподобного состояния, почти достиг левого борта через 30 с, но был отброшен вправо грандиозным скользящим ударом оторвавшейся части ледника о левую боковую морену при массе льда свыше 80 млн т и скорости контакта более 3 м/с.

2. Разгон ледникового тела с двигавшимся по его поверхности селеподобным потоком (30 м/с) происходил в виде глиссирования по массе селевого потока, обогнавшего ледник. Глиссирующий механизм обеспечил быстрое возрастание скорости ледникового фронта с 3 до 35 м/с на участке километровой длины, где неровности и выпуклый продольный профиль вызвали поперечное разламывание ледника на огромные блоки. Первичное разрушение ледника при скорости 10–30 м/с сопровождалось инерционным сбросом поверхностного селеподобного потока вправо по огибающей кривой через моренный треугольник и ледник Майли, в результате чего плоский поток, имея специфическую ламинарно-вихревую структуру и двигаясь со скоростью 40–60 м/с, взаимодействовал с ледниковым телом, которое набирало скорость и интенсивно разрушалось.

3. Динамическое разрушение ледника при его разгоне до 40–50 м/с происходило за счет внутренних напряжений в его теле, возникавших при выравнивании разноскоростных участков на бортах ледника и приводивших к разламыванию и дроблению крупных блоков, с сохранением глиссирующего механизма их движения по поверхности селевого потока. Разрушению ледяных блоков способствовало гравитационное заваливание ледникового тела влево при потере опоры вдоль левого борта на повороте, когда фронт ледника достиг расширенной части долины в районе языка Майли, догнал вал селевого потока высотой до 40–50 м и сорвался с него в виде мощного скользящего удара с расходом около 2 млн м³/с.

4. Главное звено механизма формирования ледово-водокаменного селя заключается в ударной динамической перестройке функциональной структуры глиссирующего ледникового тела при скользящем ударе после его прыжка с лобовой волны грязекаменного потока. Ледниковое тело при высокоскоростном скользящем ударе приобрело функциональную устойчивость – способность к самовосстановлению внутренней структуры, которая представляла собой динамический объем подвижных ледяных блоков, насыщенный циркулирующей по контактам водогрунтовой массой и окруженный

вязкой грязекаменной оболочкой. Такая структура способна противостоять внешним механическим воздействиям и сохранять глиссирующий механизм высокоскоростного движения за счет гибкости тела потока.

Литература

- Десинов Л.В., Котляков В.М.** Ледник Колка в 2002 году: от активизации до катастрофы // *Материалы гляциол. исслед.*, 2005, вып. 98, с. 146–154.
- Морозов А.П.** О профиле скоростей в зоне взаимодействия турбулентного ядра потока и пограничного слоя // *Динамика русловых потоков*. Л., 1987, № 98, с. 134–137.
- 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.
- Никитин М.Ю., Хугтель К., Шварц М. и др.** Дешифрирование дистанционных материалов для реконструкции процесса обрушения ледника Колка // *Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Докл. Междунар. конф. (Владикавказ–Москва, 23–26 июня 2004 г.)*. Владикавказ, Олимп, 2006, с. 156–171.
- Познанин В.Л.** Ротационный механизм термоэрозии // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. Обзорная информация*. М., ВИНТИ, 2001, вып. 2, с. 93–102.
- Познанин В.Л., Геворкян С.Г.** Импактный механизм подготовки ледника Колка к селевой катастрофе: физические процессы при крупных обвалах // *Криосфера Земли*, 2007, т. XI, № 2, с. 84–91.
- Познанин В.Л., Геворкян С.Г.** Энергетический потенциал импактного селевого очага и изменение структуры ледника Колка перед его срывом // *Криосфера Земли*, 2008, т. XII, № 2, с. 90–97.
- Рототаева 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.
- Тугубалина 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.
- Чугаев Р.Р.** Гидравлика (техническая механика жидкости). Л., Энергия, 1975, 599 с.

*Поступила в редакцию
23 апреля 2008 г.*