

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 511.311.21.(234.9)

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ИМПАКТНОГО СЕЛЕВОГО ОЧАГА  
И ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЛЕДНИКА КОЛКА ПЕРЕД ЕГО СРЫВОМ**

**В.Л. Познанин, С.Г. Геворкян\***

*Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов МПР–РАН,  
121357, Москва, ул. Вересаева, 15, Россия, [poznanim@list.ru](mailto:poznanim@list.ru)*

*\* ФГУП Фундаментпроект, 125993, Москва, Волоколамское ш., 1, Россия, [guevorkyan@narod.ru](mailto:guevorkyan@narod.ru)*

Впервые рассмотрены процесс энергетической активизации импактного селевого очага неустойчивости в тыловой части Колки и эффекты лавинообразного разрушения льда при прохождении ударных упругих волн по телу ледника и его ложу. Установлено, что энергетический потенциал очага при падении крупных обвалов возрастал на 30–100 % и 20 сентября 2002 г. достиг почти 500 млн МДж, а упругая отдача скального основания привела к дроблению поверхности ледника и залегающего на скальном ложе льда в виде пористого слоя. Максимальный объем пористого слоя перед срывом ледника составил около 35 млн м<sup>3</sup>, что при его скважности 0,15 определило суммарный объем аккумулированной в порах воды более 5 млн м<sup>3</sup>.

*Импактный селевой очаг, энергетический потенциал, пористый слой, структура ледника*

**ENERGY POTENTIAL OF THE IMPACT MUDFLOW CENTER  
AND CHANGE OF STRUCTURE OF THE KOLKA GLACIER BEFORE ITS FAILURE**

**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, [poznanim@list.ru](mailto:poznanim@list.ru)*

*\* FGUP Fundamentproject, 125993, Moscow, Volokolamskoye shosse, 1, Russia, [guevorkyan@narod.ru](mailto:guevorkyan@narod.ru)*

For the first time the process of power activation of the impact mudflow center of the instability in a rear part of Kolka glacier is considered. The effects of the avalanche-type destruction of ice during the passage of the shock elastic waves through the glacier body and its bed are also considered. It has been established that during the falling of large landslides the energy potential of the center grew by 30–100 % and on September 20 of 2002 achieved about 500 million MJ. The elastic kickback of the rocky basis had resulted in crushing of the glacier's surface and ice deposited on a rocky bed as a porous layer. The maximal volume of the porous layer before the glacier's failure had achieved about 35 million m<sup>3</sup>, and with its porosity equal to 0.15, the total volume of the accumulated porous waters has been determined as more than 5 million m<sup>3</sup>.

*Impact mudflow center, energy potential, porous layer, glacier structure*

**ВВЕДЕНИЕ**

В отличие от большинства работ по гляциодинамике, объясняющих обрушение ледника Колка вечером 20 сентября 2002 г. либо подвижкой (сёрджем) ледника, либо единовременным обвалом ледово-каменной массы со стены горы Джимарай-хох [Запорожченко, 2002; Осокин, 2002; Панов и др., 2002], мы видим причины этой катастрофы в целой серии ударов обвальных масс в тыловую часть Колки. Удары крупных обвалов горных пород массой до  $7 \cdot 10^9$  кг способны свободно пробивать толщу ледника, вызывать в его теле комплекс акустических, термобарических и гидромеханических

процессов, генерировать мощнейшие колебания скального ложа [Познанин, Геворкян, 2007]. Физические процессы деструкции природных сред в ограниченных объемах льда и на ледниковом ложе имеют и конструктивную составляющую – формирование устойчивых к разрушающему действию обвалов структур – импактного селевого очага в тыловой части ледника и пористого слоя дробленого льда на его ложе. Под селевым очагом в данном случае мы понимаем часть водосбора Колки, где неравномерное накопление объема разрушающихся горных пород и льда нарушает ус-

тойчивость ледника при его взаимодействии с возрастающим количеством воды, которая и приводит в движение ледово-водокаменную массу в виде селевого потока. По сути селевой очаг – неравновесный объем горных пород и льда, теряющий свою устойчивость в процессе самоорганизации вещества, т. е. автомодельности ледника.

Рассматривая проблему сентябрьского (2002 г.) срыва ледника Колка, мы имеем целью исследование не только внутреннего устройства изменяющихся частей, их взаимодействия и функционирования главных звеньев механизма формирования ледово-водокаменного селя, но и выяснение причин самовоспроизведения катастрофичности потока в процессе его высокоскоростного движения.

Предлагаемая читателю разработка не может рассматриваться как некий вероятностный сценарий развития событий, поскольку для решения этих сложнейших задач, которые в данном случае тесно связаны с исследованием термодинамики и механики 4-компонентной системы горные породы–лед–вода–газ, использованы оценки и расчеты, основанные на законах физики. Для реализации идеи автомодельности ледника необходимо ввести в рассмотрение энергетический потенциал селевого очага. При этом под энергетическим потенциалом мы понимаем способность любого природного объекта, в том числе и селевого очага, накапливать и расходовать энергию посредством тепло- и массопереноса, генерации и поглощения упругих и электромагнитных колебаний в ограниченных объемах взаимодействующих природных сред, находящихся под постоянным действием гравитации. Поступление огромных порций энергии в тыловую часть ледника при крупных обвалах вызвало кардинальную перестройку всего ледникового тела и, собственно, определило возникновение и развитие двух основных взаимодействующих структур перед срывом Колка – импактного селевого очага и пористого слоя.

### ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА ИМПАКТНОГО СЕЛЕВОГО ОЧАГА

Возникновение импактного селевого очага происходило в тыловой части ледника Колка, а его постепенное разрастание сопровождалось накоплением энергии с одновременно происходившими разрушениями в основной части ледникового тела. Хотя это и единый процесс, однако представляется целесообразным рассматривать его по частям с целью выявления специфики поведения очага и состояния ледникового тела.

Формирование очага началось с момента первого удара по тыловой части ледника крупного обвала массой  $10^8$ – $10^9$  кг или более точно – до 7 млн т, который упал, вероятно, в конце июля 2002 г. из района висячих ледников № 10, 11, где

пресекаются два крупных тектонических разлома [Абуладзе, 1999]. Влияние сейсмички на обвальные процессы не однозначно: сейсмические толчки в районе ледника Колка были зафиксированы 21 марта, 23 апреля, 2 и 4 июня, 14 июля (три толчка в этот день) [Десинов, Котляков, 2005, табл. 1], но крупных обвалов по данным местных наблюдений не было. Известно, однако, что сильное землетрясение может не дать обвального результата, а серия мелких толчков, разделенных короткими временными интервалами, способна выделить нужное количество энергии, особенно на участках сходящихся разломов, чтобы вызвать крупный обвал [Садовский, 1987]. Так, по-видимому, и произошло после 2 часов ночи 29 июля 2002 г., когда серия упругих тектонических импульсов привела к обвалу висячих ледников № 10 и (частично) № 11 и к крупному обвалу горных пород (рис. 1).

На границе ледника энергия падения обвальных масс была столь велика, что они, двигаясь со скоростью более 100 м/с, буквально рассекли фирновую зону ледника, вызвав мощнейший выброс снега и льда, сопровождаемый еще и воздушной ударной волной. Пробив поверхность ледника, обвальное тело внедрилось в его толщу, вызвав еще один (второй) удар, на сей раз – о скальное ложе ледника. Упругая волна, возникшая при этом ударе, менее чем за 1 с докатилась до языка ледника. Лед слабо препятствовал внедрению обвального тела в толщу ледника, поскольку при сверхвысо-

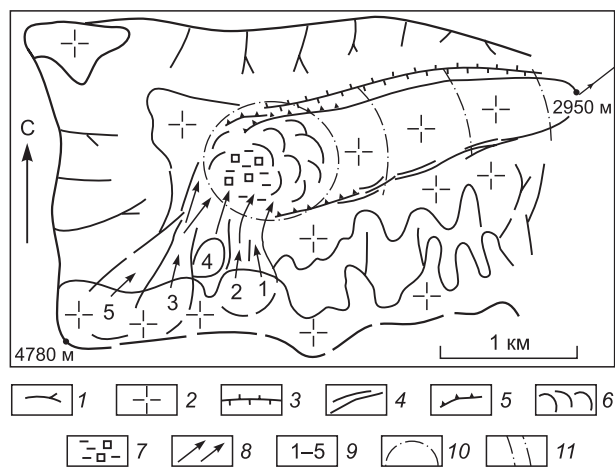


Рис. 1. Импактный селевой очаг в тыловой части цирка ледника Колка (план):

1 – водоразделы и скальные гребни; 2 – поверхности фирновых полей и ледников; 3 – левая боковая морена; 4 – ледниковые трещины; 5 – крупные разломы ледника; 6 – пузырьчатая структура ледниковой плотины очага; 7 – вода и ледяные блоки в емкостях очага; 8 – зона крупных обвалов и пути их движения; 9 – номера крупных обвалов с массой около  $7 \cdot 10^9$  кг; 10 – активизированная зона импактного очага; 11 – схема прохождения ударных акустических волн по леднику.

ких давлениях (до 100 тыс. МПа), возникающих в момент удара обвальных масс о поверхность ледника, лед практически мгновенно переходит в жидкокристаллическое состояние [Познанин, Геворкян, 2007].

Внедрившееся в толщу ледника обвальное тело в результате взаимодействия со льдом и ложем ледника начинает замедлять движение и спустя 2–4 с после своего падения останавливается, образуя выпуклые лопастевидные тела, приподнимающие собой поверхность ледника. Избыточное давление, сопровождаемое сильными фрикционными и тепловыми эффектами, приводит к перегреву обвального материала и разделению его на термобарические зоны в соответствии с состоянием взаимодействующих сред. Перегретые слои горной породы, представляющие собой плотную пульпу, содержащую включения воды (сжиженного атмосферного воздуха), располагаются вдоль основных плоскостей трения. Во внешних (холодных) слоях обвального тела быстро понижается внутреннее давление, что приводит к своего рода “холодному” кипению внутриледниковой смеси. Это происходит на общем фоне рекристаллизации льда, формирования брекчиевидных отложений, при медленном неравномерном компенсационном приподнятии примыкающих к очагу частей ледника с образованием в них системы пластических куполообразных (типа пены) форм, радиальных и поперечных трещин. Таким образом, морфология очага после первого крупного обвала была представлена, во-первых, вытянутой воронкой, заполненной водой и крошевом ледникового льда, и, во-вторых, уходящей под ледник грунтовой массой, представляющей собой выпуклую лопастевидную гряду, границы которой угадываются по приподнятым и деформированным участкам льда, засыпанном валом фирна с включениями выброшенным обвалом обломков горной породы.

Немаловажен вопрос о продолжительности этих событий. Ответ на него можно получить достаточно надежным методом, используя фундаментальные свойства геологической среды [Бондарик, 1981; Садовский, 1987]. Согласно работе М.А. Садовского [1987], существуют вполне определенные зависимости между характерным временем процессов ( $t$ , год), их энергией ( $E$ , эрг) и размерами очага ( $L$ , м):

$$\lg \Delta t = 0,33 \lg E - 7, \quad (1)$$

$$\lg \Delta t = \lg L - 6. \quad (2)$$

В силу того что формулы (1), (2) получены на большом статистическом материале, включая и поверхностные очаги разрушения горных пород, нам представляется вполне допустимым использовать их в исследовании.

По нашим оценкам, энергия первого удара по леднику составляет около  $7 \cdot 10^{13}$  Дж. Отсюда, согласно (1), (2), следует, что характерный размер очага в поперечнике должен составлять до 1 км (см. рис. 1) при времени пребывания его в активном состоянии около 70 дней. Учитывая, что активность термобарических и гидромеханических процессов спадает в очагах по гиперболическому закону, можно заключить, что максимальные изменения происходили в течение первых 10–20 дней, т. е. до 10–20 августа.

Следует, однако, иметь в виду, что в рассматриваемый период на тыловую часть Колки ежедневно обрушивалось в среднем около 1 млн т горных пород и льда (что соответствует расходу  $10 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Можно утверждать, что за счет неравномерности и импульсивности этих обвалов очаг все это время поддерживался в активном состоянии, способном выделять энергию и совершать механическую работу по пространственному перемещению его отдельных частей друг относительно друга. Степень активности очага снижалась значительно медленнее, чем можно предполагать, исходя из общетеоретических представлений. Хотя и невозможно отделить долю мелких обвалов (камнепадов) от средних обвалов, активизировавшихся очаг, тем не менее можно утверждать, что вследствие периодического, но регулярного поступления на ледник обвального материала снижение начальной активности очага больше соответствовало не гиперболической, а близкой к линейной зависимости.

#### ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ИМПАКТНОГО СЕЛЕВОГО ОЧАГА

Аккумулированная в очаге энергия уменьшилась почти вдвое в конце августа, когда второй крупный обвал ударил в эту же зону, сорвавшись из района висячих ледников № 10 и 11. Вследствие второго обвала энергия очага скачком возросла до  $10^{14}$  Дж. По-видимому, это событие произошло 22–23 августа после сейсмического толчка силой до 3,4 баллов, имевшего место в районе горы Джимарай-хох [Десинов, Котляков, 2005]. Массы горных пород и льда были приведены этим толчком в неустойчивое состояние и тем самым подготовлены к последующему обрушению. В результате оказалось достаточно слабого сейсмического толчка, случившегося 26 августа, чтобы произошел третий крупный обвал. То есть в тыловой части ледника Колка имело место фактически залповое обрушение крупных обвалов, обладающих большой энергией. Ледник Колка “лишился” своей поверхностной морены и представлял собой (по крайней мере, с поверхности) ледяное крошево. Это хорошо видно на фотографии, сделанной

30 августа Д.Е. Солодким [Черноморец, 2005, рис. 5.3.6]. Энергия, аккумулированная в очаге, вновь скачком возросла до  $1,7 \cdot 10^{14}$  Дж.

Результатом последовательных обрушений крупных обвалов (№ 2, 3, см. рис. 1) стало резкое расширение области приподнятого и деформированного льда, была отодвинута граница открытого водоема, забитого ледяными блоками, ледовым крошевом и фирном, сброшенными из зоны транзита обвалов, и, самое главное, произошла резкая активизация термобарических процессов под ледником. При быстром движении обвальных масс вниз по ложу на вогнутых его участках колоссальные перегрузки порождают сильные фрикционные эффекты, сопровождающиеся на виражах послойным срезанием верхних горизонтов обвальных масс с одновременным сбрасыванием их вперед и вдавливанием по инерции в тело ледника на нескольких ярусах от ложа в виде серповидных линз, окруженных жидкокристаллической ледяной оболочкой. Фрикционные эффекты приводят к сильному перегреву горных пород и стремительным перепадам давления в движущейся обвальной массе с последующим более медленным его выравниванием на общем фоне постепенного снижения нагрузок. Вспышки активизации описываемых процессов происходили при падении обвальных масс средней величины в тыловую часть ледника Колка. Можно говорить о том, что в течение еще примерно 24–25 дней, вплоть до 19–20 сентября, происходил постепенный спад энергии очага. Оценка общей энергии очага на 19 сентября близка к  $10^{14}$  Дж. 19 сентября и ночью 20 сентября обрушились еще два крупных, но разных по структуре и направлению обвала (№ 4, 5, см. рис. 1) [Познанин, Геворкян, 2007]. Их воздействие завершило формирование картины, непосредственно предшествующей катастрофе. Но эта картина, будучи “завершенной”, вовсе не была статичной, напротив, поступление энергии в количестве около  $1,5 \cdot 10^{14}$  Дж увеличило энергетический потенциал селевого очага почти до  $2,5 \cdot 10^{14}$  Дж.

Напомним, как возрастала величина аккумулированной энергии очага, Дж: 30 июля –  $0,7 \cdot 10^{14}$ , 23 августа –  $10^{14}$ , 27 августа –  $1,7 \cdot 10^{14}$ , 20 сентября –  $2,5 \cdot 10^{14}$ . Учитывая, что в расчетах использована только половина массы всех рухнувших горных пород, величину энергии в представленном ряду следует еще удвоить. Следовательно, максимальное значение энергии импактного селевого очага оценивается в  $5 \cdot 10^{14}$  Дж = 500 ТДж при общей энергии всех обвалов, учитывая ледовые, около  $0,8 \cdot 10^{15}$  Дж. Полученное нами значение на 1–2 порядка ниже аналогичного параметра, приведенного в работах [Васьков, 2006; Хуггел и др., 2006]. Расхождение в первом случае обусловлено исполь-

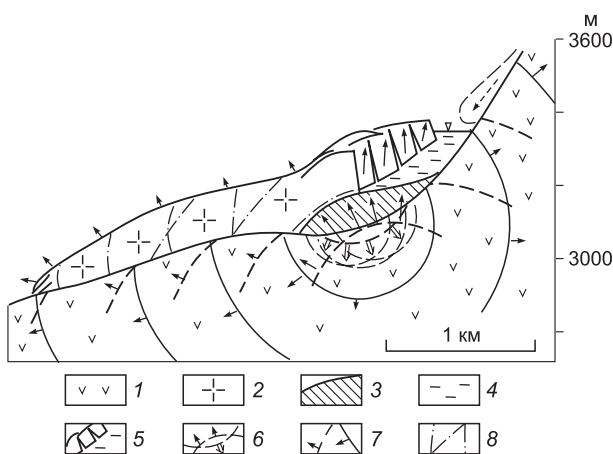
зованием экстремальных значений объемов и плотности обвальных масс, во втором – опечаткой на с. 191 (второй абзац снизу), где количество энергии ошибочно указано в килоджоулях ( $1,57 \cdot 10^{14}$  кДж).

Процесс возникновения и развития в тыловой части ледника Колка импактного, сложно построенного поверхностно-подповерхностного многоярусного, лопастевидного в плане, оконтуренного валообразно-глыбовым полукольцом селевого очага приобретает накануне срыва ледника ряд специфических черт. Так, активированное состояние очага постоянно поддерживалось периодическими ударами обвалов средних и малых объемов горных пород. Эти импактные воздействия не позволяли леднику обрести стабильное состояние, напротив, благодаря этим воздействиям неустойчивость его неуклонно увеличивалась. Причем рост неустойчивости ледника сопровождался периодической аккумуляцией энергии в очаге. Признаки нарастающей неустойчивости проявлялись в постоянных разрушениях масс льда и горной породы, механических перемещениях вещества, в комплексе термобарических процессов дробления, сжатия, рекристаллизации льда, в таянии льда под воздействием внутренних источников тепла, в выдавливании воды и перемешивании ее с горной породой и льдом, в выбросах газовоздушных пузырей, зажатых в обвальной массе горных пород.

#### ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКА ПРИ РАЗВИТИИ СЕЛЕВОГО ОЧАГА

Развитие импактного селевого очага тесно связано с изменением состояния всего ледникового тела, поскольку ударные силовые импульсы (импакты) постоянно порождали в теле ледника системы мощных продольных и поперечных упругих волн, которые с большой скоростью двигались от очага к языку ледника (рис. 2).

Известно, что поверхность ледника наклонена от правого борта к левому, причем линии тока льда идут сначала справа налево, затем винтообразно изгибаются, частично выходят на поверхность и устремляются к языку ледника [Рототаев и др., 1983]. Между линиями тока существуют зоны разуплотнения льда, слои внутренней морены, разнообразные по размеру и форме пустоты, каналы стока, которые частично или полностью заполнены водой, а также ледниковые колодцы и многочисленные трещины длиной до 300 м и глубиной до 20–25 м, и, наконец, сам лед характеризуется повышенным содержанием морены, что отражается в почти сплошной заморенности поверхности ледника даже в фирновой зоне. Ясно, что прохождение продольных упругих волн через такое тело представляет собой весьма сложный и



**Рис. 2. Схема ударного акустического воздействия упругих волн на ледниковое тело и скальное ложе (разрез):**

1 – скальные породы; 2 – лед; 3 – материал обвалов в очаге; 4 – вода; 5 – ледяные блоки-айсберги; 6 – упругое прогибание и выпрямление ложа – сферическая волна; 7 – упругие волны в горных породах; 8 – акустические волны в леднике.

многоплановый процесс, в ходе которого имеют место эффекты отражения волн, их взаимного наложения, резонанса, смены их скоростей и направлений. При этом надо иметь в виду, что падающие на ледник обвальные массы генерируют ударные волны из различных пространственных точек и с разными промежутками времени.

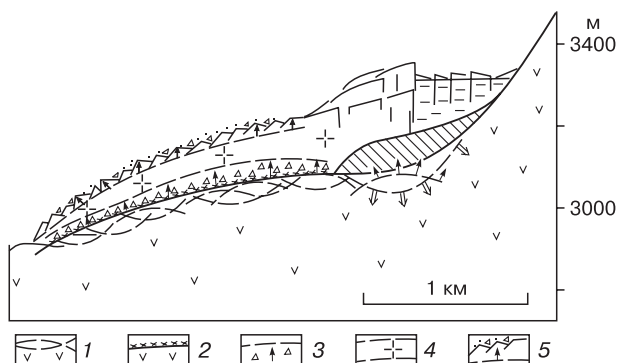
Первый крупный обвал ударил по леднику примерно в конце июля и, как говорилось выше, основная его масса проникла в толщу ледника. Реакцией тела на этот удар стало возникновение в ледниковом теле упругой волны, которая со скоростью около 2 км/с [Савельев, 1991] промчалась до языка ледника менее чем за 1 с (см. рис. 2). С наибольшей скоростью эта волна прошла по плотным монолитным слоям льда, огибая небольшие обломки (соизмеримые с ее длиной), резко замедляясь в местах скопления внутренней морены, которая и поглощала энергию волны. Под действием этой волны небольшие пустоты в ледниковом теле заполнялись ледяным крошевом, что увеличивало объем дефектов в толще ледника, а в полостях с напорным состоянием воды возникали гидравлические силовые импульсы (гидравлический удар). В верхних слоях льда упругая волна двигалась вдоль акустической границы – левой боковой морены, а имеющиеся на поверхности ледника трещины, особенно близкие к языку, под действием проходящей волны лавинообразно развивались, разрушая тело ледника. На правом борту упругая волна уходила вверх по ледяным слоям и попада-

ла в акустические ловушки – трещины, фирновые толщи, осыпные каменные скопления (см. рис. 1).

Удары в очаге при внедрении крупных объемов скальных пород в лед вызывали цепочку последовательно проходивших акустических волн, каждая последующая из них все “труднее” преодолевала расстояние до языка, поскольку предыдущие волны увеличивали число и размеры “дефектов” – повреждений в теле ледника (масс дробленого льда, деформированных каналов, полостей и трещин). Заметим, что если бы не активно идущие процессы режеляции, особенно в нижних слоях ледника при давлении до 15 атм, то фактически уже после удара второго, а тем более третьего крупного обвала прохождение акустических волн по телу ледника стало бы невозможным.

Накануне 1 сентября, т. е. за 20 дней до катастрофы, произошло еще одно событие, в результате которого поверхность ледника превратилась в крошево. Последствия этого события отчетливо видны на фотографии из работы [Черноморец, 2005, рис. 5.3.6]: поверхность ледника разбита не на блоки, а на куски, причем встряхивающий удар был настолько силен, что перемешал поверхностный слой морены со льдом, а также спровоцировал мощный гляциальный сель за счет разрушения внутренних емкостей.

Единственное внятное объяснение состоявшегося событию можно дать только при допущении мощных пульсирующих ударов снизу со стороны скального ложа по телу ледника. А рассмотренная нами ранее реакция скального ложа ледника на крупные обвалы как раз и указывает на проявление эффекта упругой отдачи ложа в ответ на местные запредельные перегрузки (до  $10^8$  атм). В данном случае этот эффект проявился в результате падения двух крупных обвалов, вероятно, 23 и 27 августа. Суть эффекта заключается в катастрофической перегрузке (до 20g), вызванной движением массы горной породы (до  $7 \cdot 10^9$  кг) со скоростью около 150 м/с на участках вогнутого ложа при радиусе закругления более 100 м, когда вогнутость ложа на коротких участках приводит к импульсным скачкам давления до 10 млн МПа, влекущим упругое деформирование (прогиб) ложа с последующей упругой отдачей (“отстрелом”, “выпрямлением” прогиба ложа). Этот местный участок “мгновенного подпрыгивания” ложа со скоростью до 5 км/с перемещался в виде бегущей волны вниз по тальвегу, вызывая последовательное дробление ледника в нижних и поверхностных слоях льда при сохранении монолитности средних слоев ледникового тела. Принципиальная схема развития сферических ударных волн и механизма формирования пористого слоя представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Механизм формирования пористого слоя на скальном ложе и дробление поверхностных слоев ледника за счет ударных сферических волн:**

1 – удары сферических волн на скальном ложе; 2 – дробленый слой скального ложа; 3 – пористый слой; 4 – слой монолитного льда; 5 – поверхностный слой дробленого льда. Остальные обозн. см. на рис. 2.

### ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОГО СЛОЯ НА ЛЕДНИКОВОМ ЛОЖЕ

Периодическое импактное воздействие крупных обвалов кардинально изменило состояние не только тыловой части Колки, но и структуру остальной части ледника за счет выделения упругой энергии на контактах скальное ложе–ледник–атмосфера. Энергия ударов сферических волн генерировалась при импактах на вогнутых участках скального ложа в тыловой части цирка и выделялась в лед по площади скального основания от очага до языка ледника. В результате поглощения энергии лед разрушался, и на контакте со скальным ложем сформировался особый объем дробленого льда – пористый слой. Визуальное представление о пористом слое дает цветная фотография, сделанная на третий день после катастрофы [Десинев, Котляков, 2005, рис. 1,б]. Данный снимок позволил оценить примерный объем пористого слоя как половину оставшегося в цирке льда при исходном объеме ледника около 150 млн м<sup>3</sup> и выбросе (срыве) около 80 млн м<sup>3</sup> [Петраков и др., 2004], т. е. равную 35 млн м<sup>3</sup>.

Учитывая, что объем пористого слоя при каждом из импактов можно определить как отношение поглощенной (эффективной) энергии к показателю прочности ледникового льда, представляется целесообразным проследить формирование этого элемента строения ледникового тела, поскольку именно пористый слой, взаимодействуя с селевым очагом, сыграл ключевую роль в механизме срыва Колки. Для количественных оценок размеров пористого слоя целесообразно сделать следующие допущения: 1) величина эффективной энергии любого из пяти импактов составляет око-

ло 30 %, что логично в силу известной величины тепловой составляющей (около 35 %) и предполагаемых затрат на механические перемещения вещества (около 30 %); 2) прочность ледникового льда соответствует нижнему значению (1 МПа), поскольку она обратно пропорциональна объему и характеризует способность к разрушению массивов, а не образцов льда; 3) возникший объем пористого слоя уменьшается во времени почти линейно аналогично падению энергии в импактном селевом очаге, т. е. примерно на 50 % в месяц; 4) выбросы упругой энергии скальным ложем при последующих импактах гасятся наполовину ее диссипацией в уже существующем объеме дробленого льда.

Пористый слой возник в конце июля 2002 г. при падении первого крупного обвала горных пород с энергией около  $7 \cdot 10^{13}$  Дж. Он представлял собой плоский объем дробленого льда около 20 млн м<sup>3</sup>, что при площади контакта ледника с ложем около 1 км<sup>2</sup> дает среднюю толщину слоя 20 м. Учитывая уменьшение количества поглощенной энергии от границ очага к ледниковому языку, а также неравномерность ее выделения скальным ложем и поглощения льдом, толщина слоя могла изменяться в широких пределах – от 5–10 до 30–35 м. Возможно, процесс высокоскоростного дробления ледникового льда на ложе и его трансформация в пористый слой сопровождалась частичным переходом льда в жидкокристаллическое состояние, на что указывает существование мало-мощного (до 5 м) слоя ледово-каменной брекчии [Роттаев и др., 1983; Петраков и др., 2004]. Кроме того, этот процесс должен был вызывать мощные вакуумные эффекты затягивания воды и воздуха из верхних слоев ледника по трещинам, колодцам и другим формам ледниковых полостей. Поэтому пористый слой представлял собой не просто плоский объем дробленого льда переменной толщины, а некую транзитно-аккумулятивную емкость со сложной миграцией воды и воздуха при рекристаллизации льда и частичном восстановлении его сплошности на отдельных участках.

Компрессионная избирательная режеляция пористого слоя, частично заполненного фильтрационными потоками, вызывала пространственную миграцию воды, ее отжимание и сброс в постепенно очищавшиеся от заторов каналы стока. Это приводило к резким колебаниям расходов на выходе из-под ледника. Активное взаимодействие процессов режеляции и стока постепенно формировало мозаичную в плане картину распределения стоковых и бесстоковых участков в пористом слое. Участки транзита воды тяготели к зонам краевых трещин на правом борту ледника, к левой боковой морене и подледниковым каналам, а участки восстанавливавшегося льда занимали промежуточное положение между водоносными зонами.

Сокращение объема пористого слоя происходило постепенно, а возрастание – скачкообразно. Увеличение пористого слоя имело место еще дважды до катастрофы – 23, 27 августа и 19–20 сентября при ударах четырех крупных обвалов (два и два соответственно). Сценарий его формирования в этих случаях был таким же, поскольку развитие событий определяло стремительное (около 0,5 с) прохождение упругих волн по телу ледника и по его ложу.

Парные обвалы в конце августа, когда объем пористого слоя сократился до 10 млн м<sup>3</sup>, вызывали мощное сотрясение ледника и существенную трансформацию его структуры в силу того, что один из импактов обладал энергией, которая примерно вдвое превышала среднюю расчетную ( $7 \cdot 10^{13}$  Дж). Количество эффективной энергии при максимальном импакте было столь значительным, что привело к активному дроблению льда на поверхности и его перемешиванию с мореной. Судя по имеющемуся у нас набору крупномасштабных цветных фотографий, “исчезновения морены” не происходило ни до, ни после этого удара. Оценочные расчеты показывают, что независимо от того, был ли энергетический максимум 23 или 27 августа, реакция ледника на парный удар одинакова: объем пористого слоя достигал 40 млн м<sup>3</sup>. В силу дисимметричности процесса дробления льда его толщина колебалась в широких пределах – от 10–15 м у ледникового языка до 50–60 м в средней части ледника (см. рис. 3). Увеличение объема пористого слоя сопровождалось не только вакуумными эффектами затягивания воды и воздуха из поверхностных слоев и внутренних емкостей, но и резким нарушением водопроводящих путей и, как следствие, блокировкой стока и накоплением воды в слое дробленого льда. Развитие пористого слоя еще в течение примерно одного месяца представляло собой режеляционно-компрессионное сокращение его объема до 20 млн м<sup>3</sup> на фоне ежедневных ударов по леднику мелких и средних обвалов, которые за счет вибрационных эффектов разрушали водопроводные пути в теле ледника, блокировали сток и способствовали накоплению воды в пористом слое льда. Следовательно, полного заполнения пустот в пористом слое не происходило.

Парные обвалы 19–20 сентября вновь вызывали мощное сотрясение ледника и скачкообразное возрастание объема пористого слоя до 30–35 млн м<sup>3</sup>, что соответствует приведенным выше морфологическим оценкам данного параметра. Пористый слой за 10–15 ч до катастрофы представлял собой плоский объем дробленого водонасыщенного льда толщиной от 10–15 до 40–50 м. При пористости 15–20 % он мог аккумулировать до 6–7 млн м<sup>3</sup> воды, но был частично заполнен воздухом: вакуумные эффекты при формировании слоя обеспечили затягивание воздуха и его кон-

центрацию в виде комбинированных зон воздух–вода, препятствовавших стоку из пористого слоя. Учитывая большую сжимаемость воздуха, несжимаемость воды и наличие временных режеляционных контактов между кусками льда разного размера, можно предполагать, что в пористом слое при указанной скважности содержалось около 5 млн м<sup>3</sup> воды. Однако это количество воды было изолировано от воды в селевом очаге давлением обвалных масс грунта на нижнюю поверхность ледника в зоне его изгиба на границе с пористым слоем (см. рис. 3).

Таким образом, формирование на контакте ледник–ложе пористого слоя дробленого льда, протекавшее за счет периодического поступления значительных порций энергии из импактного селевого очага при ударах крупных обвалов в тыловую часть Колки, представляет собой тот единственно возможный элемент ледниковой структуры, который способен полностью обеспечить потерю сцепления ледника с ложем при дозаполнении пористого слоя водой из емкостей селевого очага и вызвать селевую катастрофу.

## ВЫВОДЫ

1. Зарождение импактного очага неустойчивости в тыловой части ледника Колка произошло в конце июля 2002 г. в результате удара крупного обвала горных пород и льда с энергией до 70–100 млн МДж. Это событие вызвало постепенное формирование сложной системы поверхностно-подповерхностных ледниковых емкостей, активность физических процессов в которых поддерживалась за счет ежедневной активации очага и окружающей территории падением мелких и средних обвалов.

2. Развитие очага неустойчивости в тыловой части ледника Колка обусловлено действием импактных (ударных) разрушительных процессов. При этом развитие очага внешне выражалось в виде конструктивного формирования устойчивой пузырчато-кольцевой структуры селевого очага, энергия которого при падении крупных обвалов скачками возрастала на 30–100 % и достигла 20 сентября за 10–15 ч до катастрофы почти 500 млн МДж. Нараставший в течение 50 дней энергетический потенциал очага сопровождался возникновением и прохождением внутри тела ледника и по его ложу (вплоть до его языка) мощных волн напряжений. Специфика распространения этих волн во льду и горной породе характеризовалась многочисленными сложными отражениями, резонансными эффектами, локальным лавинообразным дроблением льда вдоль акустических границ по трещинам, кавернам, пустотам и краевым зонам.

3. Упругая отдача скального основания, вызванная быстрым прохождением по вогнутым

участкам ложа больших обвальных масс, приводила к дроблению как поверхностных слоев ледникового тела, так и контактирующего со скальным ложем льда в виде пористого слоя. Пористый слой возникал при импактах скачком за счет поглощения льдом упругой энергии сферических волн и представлял собой плоский объем дробленого водонасыщенного льда (20–40 млн м<sup>3</sup>) толщиной 10–50 м. Развитие пористого слоя протекало на фоне вибрационных нагрузок от постоянного падения на ледник мелких и средних обвалов и выражалось в постепенном компрессионно-режеляционном уменьшении его объема, которое сменялось новым скачкообразным возрастанием полости на 20–100 %. Максимальный эффект перестройки структуры пористого слоя имел место при парных обвалах, что и произошло 19–20 сентября 2002 г., когда транзитная емкость пористого слоя была заполнена на 70–80 % и содержала около 5 млн м<sup>3</sup> воды.

4. Энергетическое развитие импактного селевого очага в тыловой части Колки оказало кардинальное воздействие на весь ход конструктивно-деструктивной перестройки структуры ледника: изменения выразились в формировании особого элемента – транзитного коллектора талых вод в виде пористого слоя на ледниковом ложе, как этапа подготовки ледника к его последующему катастрофическому срыву.

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

- Абуладзе Г.С.** Дистанционный гляциологический мониторинг: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Тбилиси, 1999, 57 с.  
**Бондарик Г.К.** Теория инженерной (физической) геологии. М., Недра, 1981, 256 с.

**Васьков И.М.** Возможные признаки и критерии образования катастрофических обвалов // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Докл. Междунар. конф. (Владикавказ; Москва, 23–26 июня 2004 г.). Владикавказ, Олимп, 2006, с. 80–91.

**Десинов Л.В., Котляков В.М.** Ледник Колка в 2002 году: от активации до катастрофы // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 98, с. 146–154.

**Запороженко Э.В.** Сход ледника Колка 20 сентября 2002 года и его последствия // Вестн. Кавказ. горного о-ва, 2002, № 4, с. 44–48.

**Осокин Н.И.** Ледниковая катастрофа в Осетии // География, 2002, № 43 (674), с. 3–7.

**Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Лурье П.М.** Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 г. // Метеорология и гидрология, 2002, № 12, с. 94–98.

**Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** По следам Геналдонской катастрофы: год спустя // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 1, с. 29–39.

**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.

**Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н.** Исследование пульсирующего ледника Колка. М., Наука, 1983, 169 с.

**Савельев Б.А.** Гляциология. М., Изд-во Моск. ун-та, 1991, 288 с.

**Садовский М.А.** Автомодельность сейсмических процессов // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М., Наука, 1987, с. 6–12.

**Черноморец С.С.** Селевые очаги до и после катастроф. М., Науч. мир, 2005, 184 с.

**Хуггел К., Цграген-Освальд С., Кээб А. и др.** Моделирование и анализ эрозии ледника Колка в 2002 году, образование и динамика лавины, опасности, связанные со сходом селевого потока // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Докл. Междунар. конф. (Владикавказ; Москва, 23–26 июня 2004 г.). Владикавказ, Олимп, 2006, с. 191–213.

Поступила в редакцию  
30 января 2007 г.