

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 511.311.21. (234.9)

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ОТДЕЛЕНИЯ ТЕЛА ЛЕДНИКА КОЛКА  
ОТ ЛОЖА: НАЧАЛО СРЫВА – КИНЕТИКА И ГРАВИТАЦИЯ

В.Л. Познанин, С.Г. Геворкян\*

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

*\*ФГУП Фундаментпроект, 125993, Москва, Волоколамское ш., 1, Россия, [Sergrev99@yandex.ru](mailto:Sergrev99@yandex.ru)*

Впервые установлено, что на день Геналдонской катастрофы 20 сентября 2002 г. на леднике Колка за счет ударов крупных обвалов льда и горной породы сформировались, но не взаимодействовали две автомодельные структуры: емкость импактного очага, в которой скопилось 6,6 млн м<sup>3</sup> воды, и пористый слой дробленого льда на скальном ложе объемом около 35 млн м<sup>3</sup>, способный аккумулировать до 7 млн м<sup>3</sup> воды и пропускать расходы до 20 тыс. м<sup>3</sup>/с. Подъем уровня воды в очаге до критического (200 м) вызвал ее внедрение в пористый слой в течение примерно 27 мин при постоянных скачках скорости (0,1–20,0 м/с) и давления ( $\pm 0,5$  МПа), причем это внедрение сопровождалось лавинообразным ростом частоты и разрывающей силы гидравлических ударов от 20 до 35 МПа. Гидравлический удар при прорыве воды из-под языка ледника вызвал сжатие всей напорной системы с силой до 40 МПа и отделение ледникового тела от пористого слоя. Ледник потерял сцепление с ложем.

*Импактный очаг, пористый слой, гидравлический удар, потеря сцепления, срыв ледника*

THE HYDRAULIC MECHANISM OF DETACHMENT OF THE KOLKA GLACIER'S BODY FROM THE BED:  
THE BEGINNING OF THE FAILURE – THE KINETICS AND GRAVITATION

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

*\* FGUP Fundamentproject, 125993, Moscow, Volokolamskoye sh., 1, Russia, [Sergrev99@yandex.ru](mailto:Sergrev99@yandex.ru)*

For the first time it has been established, that by the day of the Genaldon catastrophe, on the 20th of September 2002, on the Kolka glacier two automodelling structures had been generated, but they did not cooperate due to the impacts of large landslides of ice and rock. These structures were: the capacity of the impact center, in which 6.6 million m<sup>3</sup> of water had been accumulated and a porous layer of crushed ice on rocky bed of about 35 million m<sup>3</sup>, capable to accumulate up to 7 million m<sup>3</sup> of water and to pass charges up to 20 thousand m<sup>3</sup> per sec. Rise of water level in the center up to the critical value (200 m) caused its intrusion to porous layer during about the 27 minutes at constant jumps of speed (0.1–20.0 m/s) and pressure ( $\pm 0.5$  MPa). This intrusion was accompanied by the avalanche-type increase in the frequency and in the disrupting forces of hydraulic impacts from 20 up to 35 MPa. The hydraulic impact as a result of the water break from under the tongue of the glacier caused the compression of the whole pressurized system with the force up to 40 MPa and the detachment of the glacial body from the porous layer. The glacier lost coupling with the bed.

*Impact center, porous layer, hydraulic impact, loss of coupling, failure of glacier*

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от общепринятого пульсационного сценария, катастрофический сброс ледника Колка, состоявшийся в 2002 г. при его активной подвижке, мы рассматриваем с позиций импактного (обвального-ударного) и гидравлического (напорно-ударного) механизмов селеформирования как проявление индивидуального саморазвития ледника, т. е. его автомодельности. Основанием для такого подхода

является то, что на космических снимках ледника Колка, сделанных 20 сентября 2002 г. за 8,5 ч до катастрофы, его язык находился в стационарном состоянии [Котляков и др., 2003; Десинов, 2004; Тутубалина и др., 2005]. Возможность импактной и гидравлической природы Геналдонской катастрофы требует также отказаться от представлений о единовременном сдвиговом механизме воздействия

обвалов на тыловую часть ледника [Панов и др., 2002], поскольку общая сила удара обрушившихся на ледник обвалных масс оказывается существенно меньше суммы сил, необходимых для сдвига даже не примороженного к ложу ледника ( $7 \cdot 10^{10}$  и  $2 \cdot 10^{12}$  Н соответственно). В таком случае “главным виновником” катастрофы остается вода.

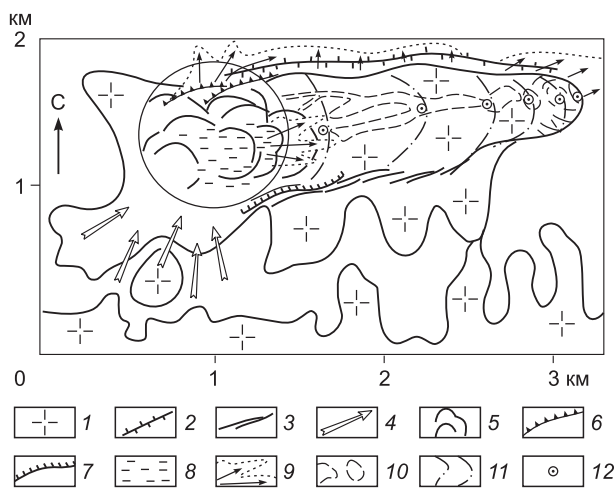
Исходя из идеи о том, что “к сентябрю 2002 г. в корытообразном ложе ледника Колка был накоплен огромный объем воды, а движение льда происходило не просто по водной смазке, а по толстому слою жидкости” [Десинов, Котляков, 2005, с. 149], мы попытаемся количественно и качественно ее аргументировать. В приведенной цитате есть неясности. Например, если на ложе имеется “толстый слой жидкости”, то незачем привлекать пульсации, кинематические волны физически не могут возникнуть в водной среде, где действуют законы механики жидких сред. Вместе с тем эта цитата имеет особую ценность для простого и ясного понимания причин и механизма Геналдонской катастрофы. Действительно, при наличии на ложе ледника слоя несжимаемой жидкости толщиной всего 0,5 м в импактном очаге тыловой части Колки должно скопиться около 1,2 млн м<sup>3</sup> воды, т. е. менее 1 % объема ледника, и тогда, чтобы удержать ледник на

месте (при среднем уклоне его ложа около 50 м на 1 км), понадобится сила, равная 75 млн кН. При отсутствии такой силы проблема решается полностью: наличие на ледниковом ложе водяного слоя позволяет Колке самостоятельно, “всего лишь” под действием сил гравитации устремиться вниз, разгоняясь на следующем до ледника Майли крутом участке. Такова физика. Но этого объяснения недостаточно, поскольку необходимо дать прямые и точные ответы на вопросы об источниках воды, их местоположении, дебитах, водном балансе аккумулирующей емкости ледникового очага. Желательно также ответить на самые сложные вопросы: какой толщины слой воды поступает на контакт ледника и ложа, каким образом он туда проникает, какие силы и как заставят воду поступить туда, причем в нужном количестве? Попробуем последовательно дать ответы на эти вопросы и наконец-то решить вопрос о том, как произошел срыв ледника Колка. Ответы на эти вопросы даны на основе количественных оценок и расчетов параметров механизма селеформирования.

#### НАКОПЛЕНИЕ ВОДЫ В ИМПАКТНОМ СЕЛЕВОМ ОЧАГЕ

Импактный селевой очаг возник и сформировался в тыловой части ледника Колка в течение почти 50 дней за счет падения крупных (до  $7 \cdot 10^9$  кг), средних ( $1,3 \cdot 10^7 - 10,4 \cdot 10^7$  кг) и мелких (менее  $1,3 \cdot 10^7$  кг) обвалов пород и льда общим объемом около 45 млн м<sup>3</sup>, массой 72 млн т при суммарной энергии процесса более 500 млн МДж. Морфологически очаг выглядит как специфическая кольцевая ударная структура, представляющая собой серию внутри- и надледниковых емкостей, заполненных диспергированной обвалной массой. В результате обрушения обвалных масс ледник был приподнят и разбит по периметру на крупные части, окружившие мощной полукольцевой ледниковой запрудой специфический водоем, имеющий в поперечнике более 400 м и покрытый с поверхности плавающими блоками и кусками льда (рис. 1). Рисунок очага в плане выглядит как пузырчатая ударная структура, форма которой отражает фундаментальные свойства горных пород и льда при их взаимодействии.

Вода в очаге накапливалась постепенно — примерно с июля по 20 сентября 2002 г., за счет функционирования различных источников и протекавших в это время процессов. Вода изначально содержалась в самой толще тыловой части ледника: в тающем фирне, боковых и поверхностных трещинах, поверхностных, внутренних и подповерхностных емкостях, в соответствии с общей гидравлической структурой таких ледников [Голубев, 1976]. Специфической чертой ледника Колка является его высокая заморенность и пористость, достига-



**Рис. 1. Ледник Колка: конфигурация в плане импактного селевого очага и последовательность заполнения водой пористого слоя на ледниковом ложе.**

1 – поверхность ледника и фирновых полей; 2 – левая боковая морена; 3 – ледниковые трещины; 4 – зона крупных обвалов; 5 – вздутия ледника под обвалными телами горных пород; 6 – разрывные трещины на участке приподнимания поверхности ледника; 7 – трещины на участке опускания ледника; 8 – поверхностные и подповерхностные скопления воды; 9 – следы выдавливания и выплескивания воды и кусков льда; 10 – подледниковые емкости и каналы стока; 11 – последовательность заполнения водой пористого слоя; 12 – предполагаемые места мощных гидравлических ударов в пористом слое при его заполнении водой.

ющая в тыловой части 15 % [Рототаев и др., 1983], что при объеме около 50 млн м<sup>3</sup> дает объем пор и пустот 7,5 млн м<sup>3</sup>. Учитывая транзитный гидрологический режим внутриледниковых полостей в конце теплого периода и их заполнение водой, можно оценить общее количество воды примерно в 7–8 млн м<sup>3</sup>. Однако не все это количество воды попало в импактный селевой очаг, поскольку его объем занимает только 70 % тыловой части ледника, т. е. в очаг поступило не более 5,5 млн м<sup>3</sup>. Это без учета выдавливающих эффектов и выплесков водно-ледовой массы в район левой боковой морены при падении крупных обвалов за счет их кинетики.

Второй источник воды импактного очага представлен жидкой составляющей ледников № 7–10, рухнувших вместе с обвалами горной породы. Объем льда этих образований оценен в 22,5 млн м<sup>3</sup> при средней плотности вещества 0,7 т/м<sup>3</sup> и толщине около 50 м [Десинов, Котляков, 2005], а общая площадь упавших ледников составляет 450 тыс. м<sup>2</sup>. При суммарных величинах основных составляющих водного баланса фирнового поля – жидких осадков и таяния, равных 11 и 80 см соответственно, внутреннем питании 50 % и стоке 46 см за сезон [Лебедева, Рототаева, 2005] легко оценить общее количество воды в этих ледниках за 2/3 сезона 2002 г. как произведение слоя воды толщиной до 60 см на площадь ледников. Это дает суммарный объем второго элемента жидкой составляющей селевого очага 0,27 млн м<sup>3</sup>. Полученная величина, возможно, завышена примерно на 1/3 за счет разброса снежно-ледовых масс вокруг импактного очага при крупных обвалах, что позволяет скорректировать ее и оценить примерно в 0,2 млн м<sup>3</sup>.

Третий источник воды в очаге обусловлен комплексом термогидромеханических процессов, возникающих при падении обвалов, т. е. он имеет импактную природу. Специальное исследование этой стороны процесса селеформирования как особой, импактной, стадии подготовки ледника к срыву показало, что при падении средних, крупных и сверхкрупных обвалов с энергией до 70 млн МДж активно проявлялись тепловые процессы внутри тыловой части Колки. Эти эффекты возникали при раздавливании и инерционных сбросах масс горных пород с развитием мощнейших фрикционных эффектов, перегревом плоских объемов грунта за счет возникновения критических давлений (до 100 тыс. МПа) и перегрузок на вогнутом ложе (до 15–20g). Пульсирующее выделение тепла из накапливавшегося обвального материала вызывало скачки в усилении скорости таяния льда и неравномерное накопление воды в емкостях очага. На фоне ежедневных мелких и средних обвалов с суточной массой до 1 млн т периодически имели место и крупные обвалы, активизировавшие скачкообразное развитие и перестройку очага вплоть до 20 сентября. Энергетический порог импактной

кольцевой структуры достиг почти 500 млн МДж, из которых около 35 % пошло на тепловые эффекты плавления льда, что дало объем талой воды около 0,6 млн м<sup>3</sup>.

Четвертый источник воды представляет собой суммарный результат дождей и абляции льда в пределах местного водосбора импактного очага, включая его поверхность и юго-западную часть цирка, суммарная площадь которых не превышает 0,5 км<sup>2</sup>, хотя выделение водосборной линии очага весьма затруднительно в силу непрерывного изменения конфигурации и морфологии кольцевой структуры (см. рис. 1). Не менее сложна оценка абляции в силу взаимоисключающей роли материала обвалов и осыпей: активизирующей за счет краевых эффектов на контактах лед–горная порода и блокирующей “подморенное” таяние при переменной толщине обвально-осыпного материала. По существу, такая оценка пока невозможна, даже несмотря на предложенные В.Г. Ходаковым подходы к определению подморенного таяния льда на Колке [Рототаев и др., 1983]. Единственный относительно корректный выход – заменить величину абляции в пределах очага величиной стока с фирновых полей. Их периодическое (вплоть до 20 сентября) обрушение позволяет использовать половину этой величины, т. е. взять только 23 см, увеличив при этом сумму жидких осадков до 22 см в соответствии с их вертикальным градиентом [Рототаев и др., 1983]. В данном случае замена одного источника воды другим вполне оправдывается, во-первых, их функциональной обусловленностью (таяние–сток), а во-вторых, тем известным фактом, что следы поверхностного стока в юго-западной части цирка отчетливо видны на многих фотографиях, сделанных до и после катастрофы [Десинов, Котляков, 2005; Тутубалина и др., 2005; Черноморец, 2005]. Сказанное позволяет оценить данный источник воды не более чем в 0,22 млн м<sup>3</sup>.

Пятый источник воды в очаге – количество растаявшего льда за счет захвата крупными обвалами воздуха, содержащегося в горных породах, фирне, льде, и его адиабатического сжатия при импактах. Точное количество захваченного воздуха также не поддается корректному определению в силу неизвестной части отжимаемого и выбрасываемого газа, общее содержание которого в фирновых полях и тыловой части ледника, рассчитанное по их пористости, составило около 15 тыс. т. При адиабатическом сжатии этой массы воздуха выделяется суммарное количество тепла, способное привести к таянию около 0,1 млн т льда.

Сложная проблема возникает при оценке роли фумарол в таянии фирна и льда. Здесь вообще нет исходных данных для расчетов, за исключением сведений о концентрации некоторых газов в остаточных водоемах после катастрофы [Муравьев, 2005]. Эта задача требует специального рассмотре-

ния, поскольку сами фумаролы являются не причиной, а следствием срыва Колки: эффект разуплотнения горных пород при резком снятии нагрузки хорошо известен в инженерной геологии (трещины бокового отпора, дилатансия, кливаж и др.).

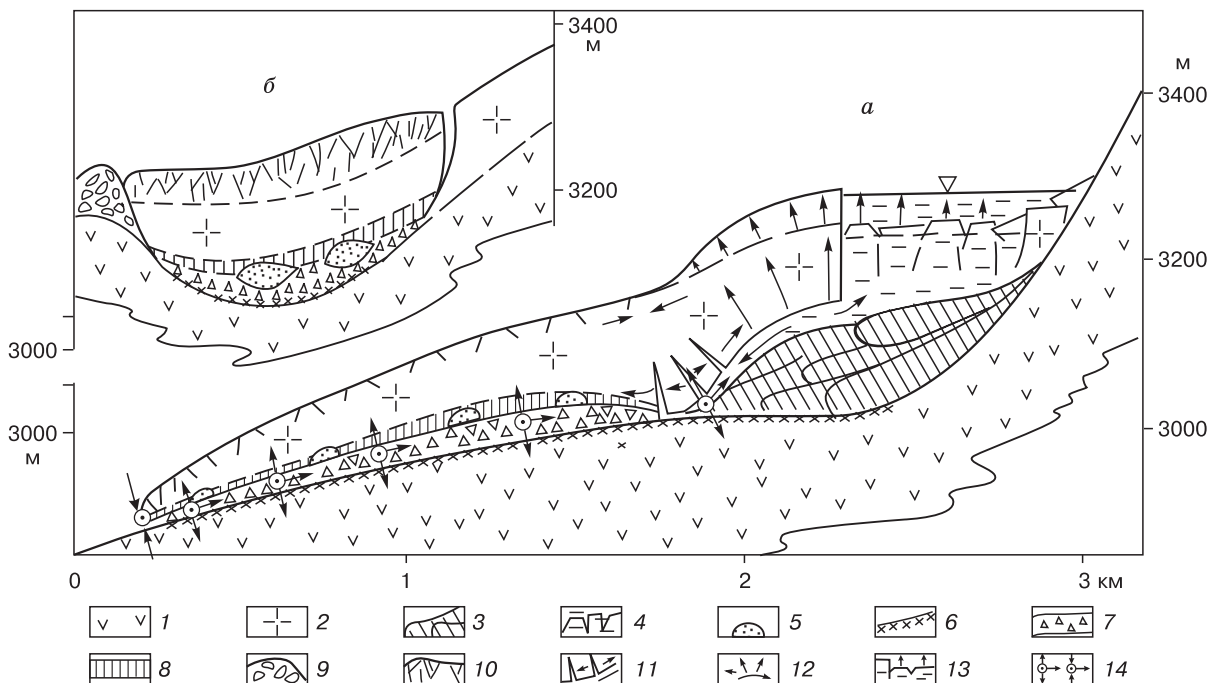
Таким образом, суммарный объем воды в импактном селевом очаге перед катастрофическим срывом ледника Колка 20 сентября 2002 г. мог достигать 6,6 млн м<sup>3</sup>.

### ГИДРОДИНАМИКА ПОРИСТОГО СЛОЯ НА ЛЕДНИКОВОМ ЛОЖЕ

Накопление воды в емкостях импактного селевого очага происходило изолированно от ее проникновения под ледник за счет кольтматации жидкокристаллическим льдом трещин и пустот на периферии импактной структуры. Несмотря на огромную массу льда, оконтуривавшего водоем в виде кольцевидной структуры толщиной около 150 м, ледник в этом месте пластически прогибался в виде пузырчатых форм (см. рис. 1) и медленно приподнимался с ростом уровня воды в очаге при сильном давлении снизу грунтовых масс (около 50 МПа), релаксация напряжений в которых протекала на фоне ежедневных ударов мелких и средних обвалов. Наличие растягивающих напря-

жений в нижних слоях ледника в зоне его изгиба по периферии очага и давление обвалных тел снизу способствовали блокировке стока воды под ледник, где на контакте со скальным ложем было установлено пористое состояние льда.

Периодическое импактное воздействие крупных обвалов кардинально изменило не только тыловую часть Колки, но и структуру остальной части ледника, который приобрел трехслойное строение (рис. 2). На контакте со скальным ложем возник представленный дробленным водонасыщенным льдом пористый слой толщиной от 10 до 50 м, формирование которого, скорее всего, сопровождалось вакуумными эффектами. Пористый слой дробленого льда подстилался слоем ледово-каменной брекчии, возникшей при прохождении по ложу самых мощных ударных упругих волн при импактах с последующим компрессионным вдавливанием льда между обломками горной породы. Верхняя часть пористого слоя переходила в трещиноватую зону толщиной до 15 м, в которой по мере движения вверх быстро уменьшается плотность трещин, и они исчезают, сменяясь монолитным слоем режеляционно-компрессионного льда. Этот слой, судя по ряду данных, имеет толщину от 20 м у языка ледника до 80 м вблизи границы импакт-



**Рис. 2. Строение продольного (а) и поперечного (б) профилей ледника перед его срывом 20 сентября 2002 г.**

1 – ледниковое ложе; 2 – тело ледника; 3 – обвалы; 4 – скопление воды и ледяных блоков в селевом очаге; 5 – подледниковые емкости и каналы стока; 6 – слой ледово-каменной брекчии; 7 – пористый слой дробленого льда; 8 – трещиноватый слой; 9 – слой морены; 10 – поверхностный слой ледяных блоков и дробленого льда; 11 – крупные трещины в зоне растяжения ледника; 12 – направления действия сил в селевом очаге; 13 – всплытие края ледника при резком росте уровня воды в очаге; 14 – мощные гидравлические удары на разрыв и сжатие напорной системы.

ной кольцевой структуры селевого очага. Поверхностный слой ледника на глубину до 20–25 м представлен блоками, глыбами, кусками льда и ледяным крошевом (он как бы присыпан с поверхности) за счет выхода и рассеяния энергии ударных упругих сферических волн, периодически приходивших из импактного очага при упругой реакции скального ложа на колоссальные перегрузки в пределах вогнутых участков.

Предложенное нами трехслойное строение основной части ледника хорошо подтверждается фактическими материалами. Так, ледовая брекчия, вскрытая водным потоком, описана в известной монографии [Рототаев и др., 1983], погребенные слои дробленого пористого льда – в ряде работ [Петраков и др., 2004; Рототаева и др., 2005], а поверхностный слой ледяных блоков и крошева отчетливо виден на рис. 5.36 в монографии [Черноморец, 2005].

Кроме того, нами детально проанализирована серия цветных крупноформатных фотографий, представленных в ряде публикаций [Десинов, Котляков, 2005; Тутубалина и др., 2005]. На них отчетливо видны следы раздавленных движением Колки при его срыве подледниковых каналов стока, спрессованного пористого слоя, а также прорывных форм, возникавших при гидравлических ударах на поверхности левой боковой морены и ледниковом ложе между известным “ригелем” и остатками обвальных масс. На деформированной поверхности этих масс также имеются следы гидравлических ударов в виде линейных отрицательных форм. Вышесказанное позволяет достаточно точно оценить состояние пористого слоя и характер его “дозаполнения” водой из импактного очага вечером 20 сентября, что, собственно, и вызвало срыв ледника.

Пористый слой на контакте ложа с ледником возник при первом крупном обвале в конце июля за счет дробления льда при прохождении упругих ударных волн по скальному основанию. Слой представлял собой плоскую полость, заполненную ледяным крошевом, которое было частично выброшено в подледниковые каналы, где достаточно мощный сток уносил и перерабатывал часть дробленого льда, вызывая в узких местах заторы, резкое падение скорости потоков, их фильтрацию через препятствия, повышение уровня воды в каналах и ее временную аккумуляцию с последующим сбросом. Такие заторы с локальным повышением уровня приводили к фильтрационному растеканию воды по площади прилегающих частей пористого слоя. Чем мощнее и длительнее по времени было препятствие, тем большая площадь пористого слоя пропитывалась водой, которая могла в отдельных местах переходить в напорное состояние в виде плоских, хорошо фильтрующих линз, в которых, судя по уклону ложа, скорость движения воды не могла превышать 0,1 м/с. На фоне такого гидрологического режима в течение августа активно протекали

процессы выборочной режеляции пористого слоя в местах с его минимальной толщиной. Компрессионная избирательная режеляция пористого слоя, частично заполненного фильтрационными потоками, вызывала пространственную миграцию воды, ее отжимание и сброс в постепенно очищавшиеся от заторов каналы стока, что 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 уменьшающемся пористом слое: участки транзита воды тяготели к зонам краевых трещин на правом борту ледника, к левой боковой морене и подледниковым каналам, а участки восстанавливавшегося сплошного льда занимали промежуточное положение между водоносными зонами.

Объем пористого слоя дробленого льда на ложе ледника возрастал еще дважды до момента катастрофы – в конце августа и 19–20 сентября при ударах четырех крупных обвалов (два и два соответственно). Сценарии его формирования в этих случаях были аналогичными, поскольку развитие событий определяло стремительное (около 0,5 с) прохождение упругих волн по телу ледника и его ложу. Существенное отличие от самого первого обвала заключается в последовательном деформирующем эффекте парных обвалов: в августе с интервалом три дня, в сентябре – около суток. Повторные удары вызывали увеличение слоя дробления, но не пропорционально их энергетическому потенциалу, а меньше, в силу влияния дробленной массы, блокирующей прохождение повторных упругих волн от ложа в ледник. Весьма важно также, что режеляционно-компрессионное восстановление нижних слоев ледника, т. е. частичная консолидация пористого слоя, происходило только между 3-м и 4-м обвалами в течение трех недель, а после обвалов 19 и 20 сентября пористый слой льда на ложе ледника имел близкое к максимальному развитие. Его площадь составляла 1,0 млн м<sup>2</sup>, что при средней толщине 35 м дает суммарный объем около 35 млн м<sup>3</sup>, а с учетом пористости, равной 0,15, свободный объем в пористом слое достигал 7 млн м<sup>3</sup> при поперечном сечении пористого пространства до 20 тыс. м<sup>2</sup>. Пористый слой был заполнен водой лишь частично и содержал около 5 млн м<sup>3</sup> жидкости и 2 млн м<sup>3</sup> воздуха.

Таким образом, в день катастрофы сформировались, но не взаимодействовали, две саморазвивавшиеся структуры на леднике Колка: емкость импактного очага, в которой скопилось 6,6 млн м<sup>3</sup> воды и более 20 млн м<sup>3</sup> горных пород в виде диспергированного физическими процессами обломочно-щебнистого грунта и мелкозема; пористый слой дробленого льда на ледниковом ложе объемом около 35 млн м<sup>3</sup>, способный при скорости течения 1 м/с пропускать воды до 20 тыс. м<sup>3</sup>/с.

### МЕХАНИЗМ ВНЕДРЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ОЧАГА В ПОРИСТЫЙ СЛОЙ

Гидравлическая обособленность огромных объемов воды в очаге и пористом водопроницаемом слое на ложе ледника позволяет характеризовать состояние Колки как неустойчивое. Неустойчивость возникала при ударах обвалов за счет их подповерхностного давления на ледниковую плотину, частичного ее приподнимания вместе с грунтом предыдущих обвалов и повышением уровня воды в очаге. Следы мощного удара по очагу 19 сентября проявились в форме выплесков воды и выбросов ледяных блоков за пределы верхней части левой боковой морены, что отчетливо просматривается на ряде фотографий (в частности, в публикации [Тутубалина и др., 2005, рис. 6, в]). Очевидно, что крупный обвал вызвал комплекс гидромеханических и термобарических процессов активизации импактного очага. Однако в отличие от предыдущего мощного импакта в конце августа, когда падение крупных обвалов было разделено интервалом около трех дней, в данном случае второй крупный обвал произошел уже 20 сентября.

Второй обвал двигался не поперек, а почти вдоль динамической оси со скоростью до 150 м/с, что на вогнутом ложе ледника вызвало комплекс напряжений и мощнейших ударов с прохождением упругих волн. В результате их действия на ледниковом ложе резко деформировался пористый слой, его встряхивание с дополнительным дроблением льда и локальное перераспределение воды полностью блокировали сток из-под ледника, что является признаком предселевой ситуации. Динамическое давление обвала в очаге привело ко второму выплеску водно-ледовой массы через левую боковую морену, выдавливающему росту уровня воды и быстрому приподниманию части грунтовых масс предыдущих обвалов и края ледника в кольцевой структуре (см. рис. 1, 2). Рост уровня воды, опережавший приподнимание ледяной плотины, вызвал всплывание льда в ее краевой зоне и стремительное заполнение водой возникавшего промежутка между нижней поверхностью ледника и грунтовыми массами обвалов (см. рис. 2). Однако вода временно была изолирована от емкости пористого слоя в силу возраставшего давления ледника на ложе в зоне растяжения, где могли образоваться трещины разрыва. Если допустить формирование двух-трех таких трещин, возникновение которых протекает со скоростью около 1000 м/с и сопровождается вакуумными эффектами, то становится понятным, как вода проникает в пористый слой, несмотря на рост давления ледника на ложе в месте изгиба (см. рис. 2).

“Мгновенное” появление вакуумной зоны при раскрытии трещины в напорной гидравлической системе селевого очага с давлением воды до 2 МПа

(20 атм) равносильно мгновенному открытию крана – заполнению трещины водой – мгновенному закрытию крана, что в обоих случаях приводит к явлению гидравлического удара [Кочин и др., 1948; Чугаев, 1975].

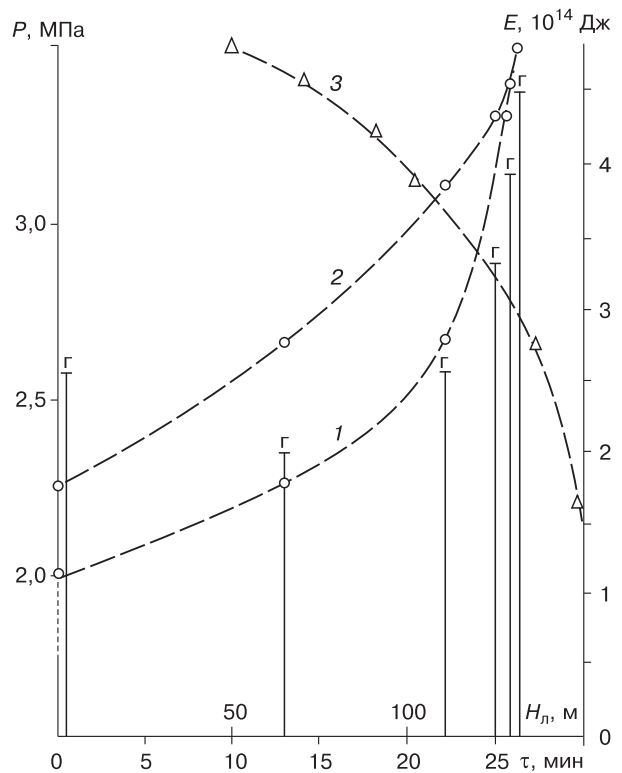
В данном случае два гидравлических удара практически сливаются в один силовой импульс, поскольку при глубине трещины 15 м и скорости ее заполнения 10–15 м/с временной интервал составляет всего 1,0–1,5 с. При этом сила ударов в соответствии с аналогичными оценками в каналах стока погребенного ледника [Познанин, 1979] может достигать в условиях Колки 15–20 МПа (150–200 атм) при прочности льда 2–3 МПа и давлении ледника на ложе 1,5 МПа (15 атм). Очевидно, что именно двойной силовой импульс гидравлических ударов деформировал зону контакта лед–ложе таким образом, что первый удар на сжатие трещины через 1,0–1,5 с сменился ударом на разрыв. Двойной удар с энергией  $2,6 \cdot 10^{14}$  Дж обеспечил возможность поступления воды из напорного селевого очага объемом 6,6 млн м<sup>3</sup> в полости пористого слоя (уже заполненного водой на 70–80 %). Это переломное событие произошло 20 сентября 2002 г. в 19 часов 43 минуты и было зафиксировано сейсмостанциями Северной Осетии как поверхностный толчок, что отмечается в одной из основных публикаций по Геналдонской катастрофе [Десинов, Котляков, 2005].

В этой же работе приведен последовательный временной ряд поверхностных сейсмических толчков, а именно 19:43, 19:56, 20:05:13, 20:08:13, 20:09:05, 20:09:51; 20:10:21; 20:11:40; 20:15:30. В силу лавинообразного режима опасных геологических процессов, включая селевой, нас интересует не время как таковое, а промежутки времени между событиями (в данном случае поверхностными толчками). Если интервалы времени между этими событиями быстро сокращаются и, достигая минимума, вновь возрастают, это означает, что здесь сработал некий механизм возникновения катастрофы. В нашем временном ряду интервалы между событиями составили: 13 мин, 9 мин, 3 мин, 52–46–30 с (минимум), 1 мин 20 с и 3 мин 50 с. Рассмотрим, какие же события вызвали поверхностные толчки с указанными интервалами времени и что произошло в 20:09:51, т. е. в начале минимального интервала времени.

Сила двойного гидравлического удара, возникшего в 19:43 в момент заполнения трещины в зоне растяжения ледника у ложа, резко возросла за счет напорного смыкания воды селевого очага и пористого слоя. В пористом слое давление скачком выросло на 20 атм. Это вызвало массовый сдвиг кусков льда пористого слоя с начальной скоростью до 20 м/с. Однако ударное движение по фронту водно-ледовой массы быстро замедлилось из-за закупоривания части пор и начала стабилизации на

некоторой средней скорости фильтрации. Она составила около 1 м/с, как отношение пути до языка ледника ко времени до наступления минимального интервала (1598 с). Замедление скорости в первые минуты заполнения пористого слоя было, вероятно, еще более значительным, что вызывало всплывание кусков дробленого льда и их концентрацию у нижней поверхности ледника, где существовала система тонких извилистых трещин, возникших при ударном формировании пористого слоя. Стремительное заполнение этих трещин водой также сопровождается резким сжатием и поглощением воздуха, причем в момент заполнения вновь возникают гидравлические удары малой силы, энергия которых расходуется на локальное избирательное рассредоточение кусков льда в некотором объеме воды. Это обеспечивает кратковременное (секунды) массовое возникновение линейных зон из смеси не успевающих всплыть кусков льда и воды – некие эфемерные образования типа каналов стока, в которых происходит резкое ускорение движения водно-ледовой смеси за счет субламинарной структуры потоков при огромном гидравлическом давлении, возрастающем до 20–30 атм (2–3 МПа) (рис. 3).

Скачки скорости таких потоков, судя по величине напора, могут достигать предельных значений, соответствующих неразрывности напорного движения воды. Постоянное возникновение многочисленных скоростных участков на фоне низкой скорости фильтрации (около 0,1 м/с) объясняет большое значение средней скорости продвижения воды в пористом слое (1 м/с). Однако скоростные участки быстро исчезают, они “гаснут” вследствие закупорки эфемерных стоковых каналов ледяным крошевом. Снова возникает режим фильтрации со скоростью около 0,1 м/с в силу большого гидравлического сопротивления среды, которое обусловлено не просто уменьшением сечения порового пространства, но и криволинейным движением воды по порам, где увеличивается путь и постоянно меняется направление движения водной среды. Скачки скорости вызывают локальное падение давления воды, а их быстрая смена фильтрацией – рост давления, т. е. по всему фронту продвижения воды в пористом слое постоянно происходит пространственная и временная смена режимов движения воды и кусков льда, которые, в свою очередь, снижают турбулентность потоков и обуславливают их субламинарность на фоне падения и роста давления воды. Такой режим постоянного выравнивания скачков давления и скорости можно назвать проявлением эффекта саморегулирования напорного пульсирующего стока. По сути, он представляет собой постоянно повторяющуюся цепочку звеньев: фильтрация–скачок скорости–закупорка–гидравлический удар–фильтрация и т. д.



**Рис. 3.** Лавинообразный рост минимального (1) и максимального (2) давления воды  $P$  и энергии гидравлических ударов  $E$  в пористом слое ледника Колка в течение примерно 27 мин до его срыва при существовавшем соотношении давления воды и толщины ледника  $H_{л}$  (3).

Избирательное пульсирующее заполнение водой свободных мест в пористом слое обуславливает неравномерное продвижение фронта фильтрации до тех пор, пока вода не достигнет сравнительно свободных подледниковых каналов стока, имеющих древовидную структуру. Сброс водно-ледовой смеси в каналы стока приводит к ее стремительному разгону под действием гидростатического давления до предельных скоростей, при субламинарной структуре потоков. Скорости потоков резко уменьшаются в местах слияния, сужения или поворотов каналов стока вследствие лавинообразного заполнения всего поперечного сечения канала кусками льда. Процесс закупорки протекает почти мгновенно, в результате чего возникает гидравлический удар: упругая волна в воде со скоростью до 1500 м/с [Познанин, 1979] устремляется против течения потока и интенсивно деформирует стенки канала на разрыв.

Сила гидравлического удара, рассчитанная в соответствии с уравнениями гидромеханики [Кочин и др., 1948; Чугаев, 1975], в месте слияния двух крупных подледниковых каналов стока (см. рис. 1)

достигала почти 230 атм (или 23 МПа) при напоре воды в селевом очаге около 265 м (см. рис. 3). Механический эффект этого удара, вероятно, и был зафиксирован сейсмостанциями как поверхностный толчок через 13 мин после первого удара, освободившего пути для напорного дозаполнения пористого слоя водой из импактного селевого очага. Воздействие гидравлического удара было максимальным в некоторой окрестности указанного места слияния подледниковых каналов и активно проявилось на расстоянии не менее 300 м при ударном прорыве воды в районе левой боковой морены (но не газа, который легко поглощался водой при таком давлении).

При гидравлическом ударе, вероятно, произошли существенные деформации подледниковых каналов: их временная закупорка вызвала частичное дробление вещества пористого слоя и резкое расширение фронта фильтрации, который, обтекая препятствие, начал более интенсивно продвигаться вниз по уклону, аналогично описанному выше избирательному пульсирующему режиму. Сходный характер развития событий привел к третьему гидравлическому удару в канале стока — при меньшей толщине ледника, но больших напоре и скорости воды (см. рис. 1, 3). Очевидно, что если первый и второй гидравлические удары облегчили условия стока, расширив каналы и диспергировав ледяные куски, то третий удар должен был возникнуть быстрее и быть более сильным. Так и произошло.

Третий гидравлический удар под ледником проявился уже через 9 мин: при напоре 310 м его удельная величина составила около 250 атм (25 МПа), что при менее мощной толще ледника привело к более значительным деформационным эффектам, облегчившим и ускорившим проявление четвертого удара уже через 3 мин (см. рис. 1, 3). Его давление приближалось к 30 МПа при напоре 330 м и толщине ледника около 90 м. Этот удар знаменует собой особый момент не просто ускоренного, а катастрофического темпа развития событий. Через 25 мин (см. рис. 3): кривые минимального (1) и максимального (2) давления воды в пористом слое почти слились в одну, практически вертикальную линию функции  $P(t)$ , т. е. скорость роста давления приняла необратимый характер, соответствующий разрыву сплошности.

Это означает, что через 52 с возник еще более мощный пятый гидравлический удар аналогичного разрывающего типа. Но последний, шестой, удар через 46 с был особым: он «мгновенно» открыл напорную систему при давлении воды около 40 МПа (400 атм), причем удар сработал не на расширение, как все предыдущие, а на сжатие системы. Главный результат действия этой силы — отрыв части ледника от ложа как динамический признак начала срыва Колки.

## НАЧАЛО СРЫВА ЛЕДНИКА КОЛКА

Состояние ледника в момент последнего гидравлического удара характеризуется особыми чертами: 1) почти полным отсутствием сцепления ледникового тела с ложем (за исключением небольших участков контакта на правом борту); 2) наличием на контакте ледник–ложе несжимаемого слоя водно-ледовой массы переменной толщины; 3) возникновением под языком ледника зоны пониженного давления воды (40 МПа) упругой волны, которая движется к очагу со скоростью около 1500 м/с, вызывая мощнейший эффект сжатия напорной системы; 4) существованием и постоянным действием срывающей силы, определяемой общей массой ледника (150 млн т) и средним уклоном ложа (0,05), т. е. составляющей около 75 млн кН.

Естественно, что такое состояние ледника четко указывает на неизбежность его срыва. Однако даже в таком состоянии Колка не двинулся вниз в течение 1,5–2,0 с, поскольку упругая волна при гидравлическом ударе сдавливала несжимаемую 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. 3). Сила сдавливания пористого слоя площадью около 1 км<sup>2</sup> достигла величины  $(4 \cdot 10^{13} \text{ Н})$ , почти в 50 раз превышающей силу, необходимую для срыва ледника  $(8 \cdot 10^{11} \text{ Н})$ . Следовательно, произошло расслоение пористого слоя и ледника по его нижней поверхности, и 80 млн м<sup>3</sup> льда потеряли сцепление со скальным ложем через пористый слой.

В силу неразрывности водной среды сток из очага прекратился, а бегущая вверх к очагу волна сжатия вызывала частичное выдавливание водно-ледовой массы из-под ледника по его краям, преимущественно вдоль левой боковой морены. На правом же 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 или нижележащими слоями льда пористого слоя.

Развитие событий в пористом слое при гидравлических ударах в течение примерно 27 мин до срыва ледника характеризовалось возрастанием их энергетического потенциала от  $(2,0\text{--}2,6) \cdot 10^{14}$  до  $(3,9\text{--}4,6) \cdot 10^{14}$  Дж (см. рис. 3). Причем энергетический уровень гидравлических ударов оказался несколько выше энергетического потенциала крупных обвалов в импактном селевом очаге  $(0,7 \cdot 10^{14}\text{--}2,1 \cdot 10^{14}$  Дж). Отсюда следует, что гидравлические удары, как и импакты, вызвали серию поверхностных толчков, зафиксированных сейсмостанциями в 19:43–19:56:12–20:05:13–20:08:13–20:09:05–20:09:51 [Десинов, Котляков, 2005]. Сокращение временных интервалов между гидравлическими



ударами от 13 мин до 46 с при росте силы и энергии ударов раскрывает сущность процесса отделения части ледника Колка от пористого слоя: стремительное нарастание энергетики этого процесса проявилось в лавинообразности катастрофы (см. рис. 3).

Рассмотренные процессы длились не более 2 с: ледник как бы “завис” на мгновение за счет огромной инерции колоссальной массы его тела. Но наличие значительного бокового перекося при потере сцепления с ложем (20:09:51) вызывало гравитационное выравнивание ледника справа налево, причем с одновременным смещением вниз по тальвегу за счет действия огромной сдвигающей силы как части массы оторвавшегося ледникового тела (40 млн кН) – это и есть причина начала его движения (срыва). Катастрофа как таковая началась через 2 с после гидравлического удара: мощный выдавливающий выброс водно-ледовой массы пористого слоя из-под языка ледника со скоростью около 40 м/с при расходе вещества до 80 тыс. м<sup>3</sup>/с сопровождался одновременным троганием с места оторвавшегося объема ледника.

Пока ледник медленно разгонялся под действием гравитации, разрушая структуру импактного очага и освобождая огромный объем воды, цепляясь неровностями за борта и ложе, вода, смешиваясь с грунтовыми массами обвалов в тыловой части цирка, хлынула поверх ледника, стремительно обгоняя (как более подвижная жидкая среда) движение ледяного тела. Гравитационный разгон тела ледника, нагруженного материалом горных пород и селеподобным потоком на его поверхности, происходил поверх несжимаемой водно-ледовой массы пористого слоя и был плавным, но стремительным.

Таким образом, напорно-ударное гидравлическое отделение ледника от ложа через пористый слой привело к чисто гравитационному началу движения ледникового тела – к собственно срыву.

## ВЫВОДЫ

1. На завершающей стадии импактного разрыва ледника сформировались две изолированные друг от друга саморазвивающиеся структуры: сложно построенная “пузырчатая” емкость селевого очага в тыловой части, где скопилось 6,6 млн м<sup>3</sup> воды, и пористый слой дробленого льда на ложе объемом до 35 млн м<sup>3</sup>, как основная водопроводящая зона, способная аккумулировать 6–7 млн м<sup>3</sup> воды и пропускать до 20 тыс. м<sup>3</sup>/с при скорости 1 м/с.

2. Накопление воды в очаге протекало неравномерно, скачками, за счет ряда источников: воды тыловой части ледникового тела, воды рухнувших масс фирновых полей, воды растаявшего при импактах льда, воды от таяния льда при адиабатичес-

ком сжатии воздуха; и все это происходило на фоне относительно устойчивого стока с площади водосбора селевого очага.

3. Пористый слой на ложе ледника, как особый динамический (транзитный) коллектор системы, возникал и развивался скачками при падении крупных обвалов, приводивших к дроблению льда сферическими упругими волнами реакции скального основания на вогнутых участках ложа. Между крупными обвалами объем пористого слоя сокращался ввиду компрессии, что меняло структуру раздавливаемых полостей и каналов стока. Близкое к максимальному развитие водопроводящего слоя произошло 19–20 сентября при парных обвалах, обусловивших подъем уровня воды в очаге до критического (около 200 м), что привело к частичному всплыванию края ледниковой преграды и заполнению водой возникшего промежутка.

4. Напорное внедрение воды по контакту лед–грунт обвалов было столь стремительным, что в момент заполнения трещин и каверн на границе с пористым слоем вызвало мощный гидравлический удар расширения, в результате чего вода очага под давлением более 2,6 МПа, стремительно заполняя этот слой и перемешиваясь с дробленным льдом, изменила турбулентный режим прорыва на субламинарный с аномальными скачками скорости водно-ледовой массы в эфемерных каналах стока с последующей их закупоркой кусками льда и проявлением слабых (фоновых) гидравлических ударов силой ±0,5 МПа.

5. Фильтрационное напорное дозаполнение пористого слоя протекало при постоянном компенсационном выравнивании скорости и давления водоледяной смеси с активным поглощением зажатых объемов воздуха, на фоне чего закономерно возникали мощные гидравлические удары (20–40 МПа) при “мгновенной” закупорке каналов стока в местах их слияния, сужения и изгибов. Гидравлические удары, работая на расширение, облегчали и интенсифицировали дозаполнение пористого слоя, что вызывало уменьшение временных промежутков между силовыми импульсами, которые приобрели лавинообразный характер. Последний удар силой 40 МПа возник через 26 мин 38 с после начала внедрения воды в пористый слой, сработал на сжатие напорной гидравлической системы в момент прорыва воды из-под языка ледника. Отрыв ледникового тела от ложа (пористого слоя) произошел в силу того, что давление сжатия на площади 1 км<sup>2</sup> примерно в 50 раз превышало силу, необходимую для срыва ледника.

6. Ледник перешел в особое состояние, которое характеризуется отсутствием сцепления с ложем при окончании заполнения водой пористого слоя, его несжимаемостью, а также постоянным действием сдвигающей силы около 40 млн кН (как составляющей веса ледникового тела, направленной вниз

по уклону). Это особое состояние временного (1–2 с) покоя огромной массы льда и горных пород сменилось выравниванием бокового перекося справа налево и соскальзыванием ледника вниз с плавным набором скорости. Таким образом, механизм отрыва ледника от ложа имеет напорно-ударную гидравлическую природу, а начало срыва – гравитационную.

### Литература

- Голубев Г.Н.** Гидрология ледников. Л., Гидрометеиздат, 1976, 248 с.
- Десинов Л.В.** Пульсация ледника Колка в 2002 году // Вестн. Владикав. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 72–87.
- Десинов Л.В., Котляков В.М.** Ледник Колка в 2002 году: от активизации до катастрофы // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 98, с. 146–154.
- Котляков В.М., Роготаева О.В., Десинов Л.В. и др.** Катастрофические последствия грандиозной подвижки ледника Колка на Северном Кавказе // Изв. РАН. Сер. геогр., 2003, № 1, с. 45–54.
- Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.** Теоретическая гидромеханика. Ч. I. М., Гостехтеоретиздат, 1948, 535 с.
- Лебедева И.М., Роготаева О.В.** Климатический фактор катастрофической подвижки ледника Колка в 2002 году // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 98, с. 155–161.
- Муравьев Я.Д.** Газовое извержение в цирке – возможная причина развития подвижки ледника Колка по катастрофическому сценарию // Там же, с. 44–55.
- Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Лурье П.М.** Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 году // 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.** Механизм селевых прорывов моренного озера Кахаб-Росопа в Дагестане // Материалы гляциол. исслед., 1979, вып. 36, с. 218–222.
- 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 года // 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.
- Чугаев Р.Р.** Гидравлика (Техническая механика жидкости). Л., Энергия, 1975, 599 с.

*Поступила в редакцию  
25 апреля 2007 г.*