

УДК 511.311.21.(234.9)



Познанин В.Л.

## Пространственно-временной эталон экзогенных геологических процессов: пробивание ледников крупными обвалами горных пород

Познанин Валентин Львович, доктор географических наук, главный научный сотрудник отдела инженерно-геологических исследований Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ) МПР-РАН.

В статье обсуждается проблема использования универсального пространственно-временного и энергетического эталона активности экзогенных геологических процессов при исследовании механизма пробивания теплых ледников крупными обвалами горных пород ( $10^8$  кг). Установлено ударное высокоскоростное (150 м/с) раздавливание твердым сферическим обвалом поверхностного слоя льда и мгновенное ( $10^{-4}$  с) возникновение термоактивационно самовоспроизводящегося жидкокристаллического слоя под давлением  $10^{14}$ – $10^8$  Па. Выявлена сущность механизма пробивания ледников как непрерывное проваливание обвала в жидкокристаллический слой. Выполнен количественный анализ протекания процесса с оценками падения энергии, скорости и давления по глубине пробиваемого ледника, установлены стимулирующие и тормозящие эффекты, определены глубины проникновения обвалов в ледник. Рассмотрен реальный сценарий развития процесса в зонах абляции и питания теплых горных ледников.

**Ключевые слова:** ледник, теплый ледник, обвал, механизма пробивания, ледниковая катастрофа.

### Введение

Предлагаемое исследование одного из самых сложных экзогенных геологических процессов ударного взаимодействия горных пород с ледниковыми массами является элементом реализации многолетнего инициативного проекта «Прогноз природных катастроф», разрабатываемого с целью создания универсального подхода к оперативному предупреждению опасности возникновения широкого спектра естественных катастроф – от оползней, эрозии, селей до наводнений и пожаров регионального уровня.

Положенная в основу разработки идея пробивания горных ледников крупными обвалами горных пород была высказана в связи с исследованием механизмов селевой катастрофы при срыве ледника Колка в 2002 г.<sup>1</sup>. Суть идеи заключается в том, что при ударах крупных высокоскоростных обвалов поверхностные слои ледника практически мгновенно переходят в жидкокристаллическое состояние, обеспечивая непрерывное погружение обвального тела. Однако почему и как происходит скачкообразная смена состояния льда при высокоэнергетических ударах, каков механизм проникновения обвалов в ледниковые тела и чем он контролируется, осталось неизвестным. Решение этой проблемы, а также ряда других сущностных проблем экзогеодинамики возможно только при наличии некоего универсального показателя сравнимости разных по генезису и масштабу проявления экзогенных геологических процессов – эталона активности.

Воспользуемся принципом простоты: в качестве пространственного, временного и энергетического эталона экзогенных процессов любого класса предлагается использовать  $1 \text{ м}^3$  льда плотностью  $900 \text{ кг/м}^3$  при нормальных условиях – температуре  $0^\circ \text{С}$  и атмосферном давлении  $760 \text{ мм рт. ст.}$

Такой эталон характеризуется фундаментальными энергетическими параметрами – теплотой плавления и испарения льда ( $3 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^3$  и  $2 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$ ). Он предельно прост пространственно ( $1 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$ ) и обоснован физически: лед имеет тройную точку (пар – жидкость – твердое тело), может одновременно находиться в трех состояниях во всех природных средах, проявляет главное свойство экзогенных геологических процессов – подвижность: лёд способен течь. Предлагаемый эталон весьма наглядно отражает пределы пластичности (течения) и

<sup>1</sup> Познанин В.Л. Механизм селевых ледниковых катастроф: Колка 2002. М.: ИМГРЭ, 2009. 180 с.; 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.

прочности (разрыва) материала в виде пространственной координаты – толщины слоя льда 11 м и 110 м или давления 0,1 и 1,0 МПа. Давление, в свою очередь, имеет энергетическую сущность – 1 МПа составляет  $10^6$  Дж/м<sup>3</sup>, что соответствует строго определенным долям теплоты плавления (испарения) льда.

Временной аспект эталона вытекает из соотношения энергетических параметров 1 м<sup>3</sup> льда: отношение объемной теплоемкости к теплопроводности льда характеризует теоретическое «время полного остывания» данного объема до 0 К, равное в данном случае  $1,7 \cdot 10^6$  с.

Универсальность любого вида энергии аксиоматична. Энергия прямо и косвенно отражает все основные физические единицы – массу, длину, время, температуру, количество структурных единиц вещества (моль), электрический заряд, светимость. Поэтому предлагаемый эталон является универсальным. Он характеризует любые комбинации параметров для количественных оценок активности возникновения, развития и затухания экзогенных геологических процессов на всех уровнях организации вещества литосферы (горных пород). Идея применения энергетического эталона в качестве меры активности (потенциала, мощности) процессов рельефообразования была сформулирована еще в 1991 г. и использована автором в исследованиях механизмов эрозионных, селевых, гляциальных и криогенных процессов<sup>1</sup>.

Решение поставленной проблемы возможно получить в рамках определенных условий, характеризующих взаимодействующие объекты (среды) по граничным, пороговым и критическим значениям параметров. Для обвалов горных пород, используя энергетический эталон, была определена критическая масса ( $10^8$  кг) в виде шара с радиусом 23 м, который падает вертикально с высоты 1150 м и в момент касания ледника достигает скорости 150 м/с. Ледник имеет толщину 150 м, сложен замороженным льдом с концентрацией обломков горных пород 100 кг/м<sup>3</sup>, что дает среднюю величину плотности ледника по разрезу 1000 кг/м<sup>3</sup>. Это соответствует фактическим данным выбранного типа теплых ледников<sup>2</sup>. Принято, что плотность «чистого» льда при температуре 0° С равна 900 кг/м<sup>3</sup>, а обломки горных пород, одинаковые по размерам и форме, равномерно распределены по толще ледника.

Используя принцип поэтапного усложнения решения задачи, исследован механизм пробивания ледника с момента касания ледяной поверхности и проникновения сферического обвала в верхние слои льда, до глубины 1–2 радиусов и до глубины полной остановки обвального тела.

### 1. Ударно-вибрационный механизм возникновения жидкокристаллического очага при пробивании ледника. Проблема давления

Поверхность ледника, на которую падает сферический обвал горных пород массой  $10^8$  кг со скоростью 150 м/с, представлен в виде горизонтальной «абсолютно» ровной плоскости чистого льда с температурой +0°С. Поверхность льда покрыта многослойной пленкой воды толщиной от  $10^{-8}$  м (квазижидкий слой) до  $10^{-4}$  м (вода полислойной адсорбции и гравитационная вода)<sup>3</sup>. Для рассмотрения взаимодействия сред в таких условиях необходима реальная оценка момента времени – нулевого отсчета. Время преодоления водных пленок составляет  $10^{-6}$  с. Они адекватно реагируют на удар сферы, поскольку имеют стандартную плотность и способны передавать давление<sup>4</sup>.

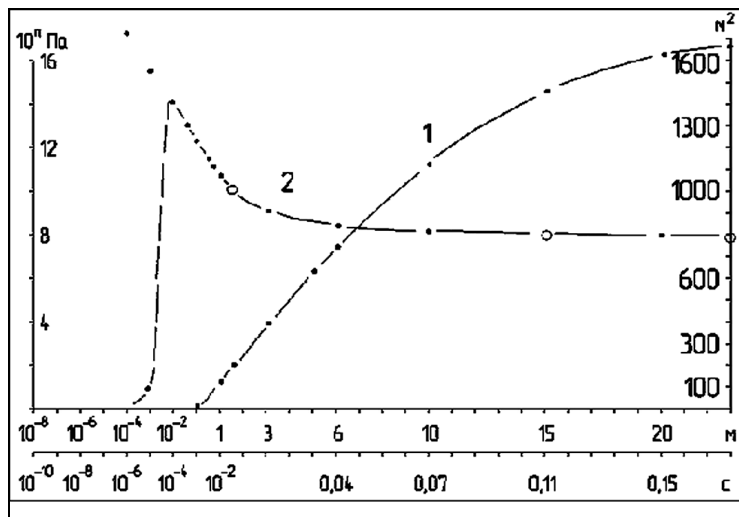


Рис. 1. Пространственное и временное изменение площади лобового сопротивления (1) и давления (2) сферического обвала горных пород при внедрении в верхние слои ледника.

Однако расчетная площадь контакта составляет только  $2,2 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>, т.е. около 2 дм<sup>2</sup>, а для квазижидкого слоя – всего 2 мм<sup>2</sup> при времени  $10^{-10}$  с. Количественная оценка величины «давления» колеблется в интервале  $3 \cdot 10^{17}$ – $3 \cdot 10^{25}$  Па, что явно выпадает из области реального восприятия (рис. 1).

Возникает вопрос: с какого момента времени (и соответствующих этому моменту глубины проникновения и площади лобового сопротивления сферы) следует реально оценивать величину давления?

Самый логичный выход – использовать эталон. Его площадь в горизонтальной плоскости равна 1 м<sup>2</sup>. Такую величину площади сегмента ударяющая сфера имеет при погружении в лед на глубину около 7 мм за время  $0,5 \cdot 10^{-4}$  с. Реальной эталонной площади соответствует вполне реальное давление сферы  $2 \cdot 10^{14}$  Па. Это «всего» на 4–5 порядков превышает величину сопро-

<sup>1</sup> Там же; Познанин В.Л. Закономерности гидротермического взаимодействия водных потоков с мерзлыми грунтами // Денудация в криолитозоне. М.: Наука, 1991. С. 62–73.

<sup>2</sup> Познанин В.Л. Механизм селевых ледниковых катастроф...; Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Исследование пульсирующего ледника Колка. М.: Наука, 1983. 169 с.

<sup>3</sup> Мазно Н. Наука о льде. Пер. с яп. М.: Мир, 1988. 231 с.; Чеведев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов. М.: Научный мир, 2005. 234 с.

<sup>4</sup> Чеведев В.Г. Указ. соч.

тивлений сжатия и смятия льда, т.е. сдвига частиц<sup>1</sup>. Именно сдвиг частиц льда друг относительно друга характеризует проявление экзогенного геологического процесса на точечном уровне организации вещества<sup>2</sup>.

Корректность такого заключения достаточно очевидна. Поэтому вполне допустимо для количественных оценок взаимодействия сред использовать протяженность – более 1 см ( $10^{-2}$  м), площадь – более 1 м<sup>2</sup> и давление – менее  $10^{14}$  Па, а все параметры, находящиеся за пределами указанных границ (см. рис. 1), – не использовать. Тогда с нулевого отсчета времени ( $10^{-4}$  с) и пространства ( $10^{-2}$  м) можно достаточно надежно оценить изменение давления сферы по глубине методом послойного уменьшения кинетической энергии за счет преодоления сферой силы лобового сопротивления льда.

Хотя именно здесь, в области параметров ниже граничных (см. рис. 1), целесообразно рассмотреть, что происходит со льдом толщиной 7 мм на площади 1 м<sup>2</sup> в течение  $0,5 \cdot 10^{-4}$  с. Поверхность льда на контакте с квазижидкой пленкой представлена слоем молекул с частично разорванными связями. Чтобы связи разрушить и дальше, необходима энергия выше  $2 \cdot 10^4$  Дж/моль или  $10^9$  Дж/м<sup>3</sup>, т.н. энергия активации. Такой энергии соответствует давление  $10^9$  Па, а у нас в слое толщиной около 1 см давление составляет  $10^{14}$  Па. Следовательно, энергии более чем достаточно для разрушения молекулярных связей во льду, смены состояния и перехода льда из твердого в квазижидкое, или проще – жидкокристаллическое.

Казалось бы, все ясно с возникновением жидкокристаллического льда. Однако, мгновенное ( $10^{-4}$  с) появление давления величиной  $2 \cdot 10^{14}$  Па в контактном 7-миллиметровом слое необычно тем, что при таких условиях лед должен быть совершенно иным – модифицированным. Известно, что при давлении более  $2 \cdot 10^9$  Па лед I находится в модификации VII, для которой характерны кубическая сингония, плотность 1490 кг/м<sup>3</sup> и температура плавления от +20–80° С до +400° С и выше в зависимости от величины давления<sup>3</sup>. Лед VII имеет двойную структуру, образованную парой одинаковых подрешеток, которые вложены одна в другую, но не имеет между собой водородных связей<sup>4</sup>. Мгновенная трансформация льда I в лед VII должна сопровождаться скачком температуры в тонком, контактирующем с пробивающей сферой слое вещества, имеющего разорванные молекулярные связи. Возникающие при ударе термические эффекты постоянно поддерживаются мощным трением, тепловая энергия которого частично расходуется на разрыв межмолекулярных связей льда I на фронтальной поверхности жидкокристаллического слоя.

Быстрое падение давления с  $10^{14}$  Па до  $10^9$  Па на глубине 3 м в течение 0,02 с, сменяемое затем его медленным уменьшением до  $10^8$  Па за 0,16 с на глубине радиуса сферы (см. рис. 1), указывает на то, что контактный (буферный) слой вещества находится в состоянии термобарического равновесия. Можно полагать, что при падении давления в буферном слое (линзе, очаге) протекает последовательная смена модификаций жидкокристаллического льда по термобарической кривой контакта «жидкость – лед VII – лед I» (кроме льда II)<sup>5</sup>.

По мере погружения сферы на глубину, равную ее радиусу, происходит закономерное 2-х актовое падение давления: очень быстрое (0,02 с) до глубины 3,0 м падение от  $10^{14}$  Па до  $10^9$  Па и, медленное (0,16 с) до глубины 23 м – всего на порядок до  $10^8$  Па. Первая часть кривой P(h) характеризует появление на поверхности льда эмбрионального слоя жидкокристаллического льда толщиной ~7 мм и площадью ~1 м<sup>2</sup>. Эмбриональный слой в течение  $10^{-3}$  с трансформируется в реально воспринимаемый жидкокристаллический очаг толщиной 5–10 см и площадью 10–15 м<sup>2</sup>. На глубине 3 м и более очаг увеличивается до 435 м<sup>2</sup> и более, но давление снижается до  $10^9$  Па, что соответствует величине удельной энергии активации. Дальнейшее уменьшение давления (и энергий) по глубине, казалось бы, делает невозможным разрушение межмолекулярных связей во льду и возрастание площади жидкокристаллического очага до 3320 м<sup>2</sup> на глубине радиуса сферы.

Однако, отмеченное выше существование в очаге динамического термобарического равновесия возможно только при наличии ударно-вибрационных нагрузок. При погружении сферы на глубину более 3 м со скоростью менее 148 м/с происходит возрастание площади ударного давления по выпуклой кривой (см. рис. 1). Это давление в процессе движения сферического тела непрерывно концентрируется жидкокристаллической линзой в ее апикальной части на границе с твердым льдом. Это процесс фокусировки ударной нагрузки. Он непрерывно активизирует частичный разрыв межмолекулярных связей во льду и стремительное продвижение пробивающей сферы. Этот источник силовых импульсов исчезает на глубине радиуса сферы. Параллельно действует второй источник импульсов, обусловленный эффектами «раздавливания» кристаллов льда и бурной сменой соотношения различных модификаций льда и жидкости вдоль термобарической кривой<sup>6</sup>. Такая кривая в реальности, скорее всего, выглядит не как отрезки прямых линий, а как некая зона (область) непрерывных скачков точек P(T) в окрестности термобарической кривой. Собственно это и есть проявление динамического, пульсирующего термобарического равновесия жидкокристаллического состояния льда в течение чрезвычайно коротких промежутков времени менее  $10^{-4}$  с.

Существует еще один весьма мощный источник ударно-вибрационных нагрузок в очаге жидкокристаллического льда. Он возникает на глубине 1 м при внедрении сферы в мореносодержащий лед. Концентрация обломков

<sup>1</sup> Войтковский К.Ф. Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 255 с.; Гляциологический словарь / Под ред. чл.-кор. АН СССР В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 528 с.

<sup>2</sup> Познанин В.Л., Геворкян С.Г. Элементы иерархии и формализация структурной сложности процессов криогенного растрескивания и термоэрозии // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. М.: ВИНТИ. 2000. № 3. С. 55–62; Познанин В.Л., Мионов Н.А., Вдовина О.К. Теоретические основания пространственной дифференциации геологической среды для построения картографических моделей экзогенных геологических процессов // Инженерная геология. М.: ПНИИИС. 2006. С. 17–22.

<sup>3</sup> Гляциологический словарь...

<sup>4</sup> Маэно Н. Указ. соч.;

<sup>5</sup> Там же; Гляциологический словарь...

<sup>6</sup> Гляциологический словарь... С. 200.

горных пород принята  $100 \text{ кг/м}^3$  или  $0,04 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  льда. Длина стороны кубовидного обломка составляет  $0,34 \text{ м}$  при площади лобового сопротивления около  $0,12 \text{ м}^2$ . Учитывая равномерное распределение обломков по толщине ледника, их количество по слоям толщиной  $1 \text{ м}$  увеличивается пропорционально возрастанию площади лобового сопротивления (см. рис. 1) – от 141 в приповерхностном слое льда до 1660 в слое на глубине радиуса сферы.

Число столкновений пробивающей сферы с обломками морены в верхнем 23-х метровом слое возрастает также пропорционально увеличению площади. Эти столкновения происходят на скорости от  $150 \text{ м/с}$  в верхних слоях ледника до  $114 \text{ м/с}$  на глубине радиуса и, естественно, генерируют нарастающие ударно-вибрационные нагрузки (импульсы) в слое активного взаимодействия сред. Последняя мощность импульсов сопоставима с мощностью лобового сопротивления сферы по глубинам. Именно эти ударно-вибрационные нагрузки поддерживают постоянно напряженно-пульсирующие и колебательное состояние жидкокристаллического очага. Частота таких колебаний, например, в  $10$  метровом слое в интервале глубин  $10\text{--}20 \text{ м}$  превышает  $10^5 \text{ Гц}$ , т.е. лежит на границе ультразвука. Помимо акустического давления при огромном числе ударов возникает плотный, но ограниченный по глубине проникновения электромагнитный поток за счет пьезоэлектрических свойств льда и минералов горных пород.

Следовательно, наличие сложного комплекса термоактивационных (ударно-вибрационных, тепловых и электромагнитных) колебаний на контакте пробивающей лед сферы весьма убедительно объясняет возникновение жидкокристаллического очага, его пульсационное состояние и разрастание до некоторого предела, ограниченного площадью любого сопротивления и толщиной фрикционной зоны. Причина мгновенного превращения твердого льда в жидкокристаллический очаг обусловлена процессом фокусировки очагом термоактивационных нагрузок и их концентрацией на фронтальной части очага.

## 2. Глубина и механизм пробивания ледника, динамические параметры процесса

Механизм пробивания ледника сферическим обвалом горных пород критической массы основан на изложенных выше доказательствах существования жидкокристаллического очага, возникающего при высокоскоростном взаимодействии тел. Взаимодействие рассматривается исходя из следующих условий.

Сферический обвал горных пород массой  $10^8 \text{ кг}$  радиусом  $23 \text{ м}$  и скоростью  $150 \text{ м/с}$  рассматривается как почти абсолютно твердое тело, поскольку его прочность примерно в  $100$  раз выше прочности льда. Лед, напротив, оценивается как почти абсолютно пластичное тело в силу того, что часть его объема при ударе мгновенно переходит в жидкокристаллическое состояние (очаг). При этом взаимодействии поверхность ледника неровная, лед сплошной, его плотность –  $900 \text{ кг/м}^3$ , температура около  $0^\circ\text{C}$ , а по глубине он содержит обломки горных пород. Куски морены распределены по ледяной толще равномерно в виде кубовидных блоков объемом  $0,04 \text{ м}^3$  с площадью поперечного сечения  $0,12 \text{ м}^2$  в количестве  $100 \text{ кг}$  на  $1 \text{ м}^3$  льда. Среднюю плотность ледниковой толщи можно считать равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Плотность жидкокристаллического очага также можно принять равной  $1000 \text{ кг/м}^3$  в силу динамической скоростной неопределенности свойств вещества в очаге.

Особенность пробивания пластического тела ледника твердой сферой горных пород заключается в том, что в момент мощного удара (около  $10^{14} \text{ Вт}$ ) на поверхности шара мгновенно возникает жидкокристаллический очаг, в который непрерывно «проваливается» горнопородное тело, обладающее колоссальным импульсом силы, равным  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ Н}\cdot\text{с}$ . При этом площадь возникающего отверстия больше площади лобового сопротивления сферы на величину, равную произведению максимальной длины окружности сферы на ширину контактной фрикционной зоны. Ширина этой зоны, скорее всего, сопоставима с толщиной очага. Высокоскоростное «проваливание» сферы сопровождается лобовым сопротивлением пробиваемой среды плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$  и непрерывным высокоскоростным сдвигом и выталкиванием обломков морены в боковую фрикционную зону на расстояние около  $0,8 R$  ( $\sim 18 \text{ м}$ ). Процесс проникновения сферы в ледник сопровождается непрерывной потерей кинетической энергии, скорости и давления. Он будет продолжаться до тех пор, пока величина давления горнопородного тела не уменьшится до собственного давления мореносодержащего льда на некоторой, неизвестной глубине от поверхности.

Примерную глубину пробивания ледника обвальной сферой можно определить без учета затрат энергии на выталкивание обломков по отношению кинетической энергии в момент касания ледника к силе лобового сопротивления среды, равной произведению ее плотности ( $1000 \text{ кг/м}^3$ ) на площадь сечения сферы ( $1660 \text{ м}^2$ ) и на квадрат скорости взаимодействия сред в нулевой момент времени с учетом величины коэффициента сопротивления шара равного  $0,5$ . Очевидно, что глубина пробивания ледника не зависит от скорости взаимодействия, а определяется только отношением пробивающей массы ( $10^8 \text{ кг}$ ) к произведению площади сечения сферы на плотность пробиваемой среды. При указанных условиях примерная глубина пробивания составит  $120 \text{ м}$ , а фактическая должна быть меньше. Следовательно, ледник толщиной  $150 \text{ м}$  не пробивается критической массой обвальной сферы в  $10^8 \text{ кг}$  при скорости  $150 \text{ м/с}$ .

Использованное значение массы соответствует нижнему пределу в градации процессов «крупный обвал». Реально обвалы могут превосходить установленную по энергетическому эталону массу в  $10$  и более раз<sup>1</sup>. В этом случае – при массе  $10^9 \text{ кг}$  и скорости  $150 \text{ м/с}$  с учетом возрастания радиуса сферы (до  $46 \text{ м}$ ) при одинаковой плотности горных пород, максимальная глубина пробивания ледникового льда достигнет  $300 \text{ м}$ , что вдвое превышает толщину ледника. Следовательно, при возрастании массы обвала на  $1$  порядок ледник будет пробит, а горнопородное тело жестко ударит по скальному ледниковому ложу.

<sup>1</sup> Познанин В.Л. Механизм селевых ледниковых катастроф...; Познанин В.Л., Геворкян С.Г. Импактный механизм подготовки ледника Колка к селевой катастрофе...

Полученные оценки глубины пробивания ледника сугубо ориентировочны и физически некорректны без учета скоростей. Сокращение квадратов скоростей в предложенном отношении характеризует развитие и протекание крайне медленного во времени процесса погружения горнопородной сферы в ледник за счет ее веса и пластичности льда. Полученные оценки интересны лишь с позиций их сравнения с реальными значениями глубины пробивания ледника.

Реальные оценки глубины пробивания ледника обвальным телом сделаны на основе послойных расчетов потери кинетической энергии, скорости и уменьшения давления на мореносодержащую толщу льда с учетом сил сопротивления пробивающей сферы и выталкивания обломков по глубинам: 1, 3, 6, 10, 15, 20, 23, 30 м и далее через каждые 15 м (рис. 2).

Кинетическая энергия обвала в момент касания поверхности ледника достигает  $1,125 \cdot 10^{12}$  Дж. Потери энергии в верхнем 1 м слое ледника, обусловленные лобовым сопротивлением пробивающей сферы и затратами на выталкивание обломков были примерно одинаковы – по  $0,5 \cdot 10^9$  Дж. На глубинах 3, 6, 10, 15, 20 и 23 м их соотношение сместилось в сторону второго слагаемого: энергия выталкивания обломков превысила энергию лобового сопротивления уже в 2,7 раза – суммарно до  $2,2 \cdot 10^{10}$  Дж на 1 м глубины в слое 20–23 м.

Обнаруженное смещение затрат энергии в сторону выталкивания обломков относительно лобового сопротивления сферы объясняется опережающим ростом площади шарового сегмента по отношению к росту площади лобового сопротивления с возрастанием глубины, т.е. чисто геометрической причиной. Суммарные послойные потери энергии последовательно вычитались из величины начальной энергии предыдущего слоя – фиксировалась величина остаточной энергии процесса по глубине ледника (см. рис. 2, кривая 5). По величине остаточной энергии рассчитывалась скорость движения горнопородной сферы при ее постоянной форме и массе. Полученное распределение скоростей по глубине, представленное в равновеликих линейных координатах, имеет вогнуто-выпуклый характер (см. рис. 2, кривая 4).

Распределение давления мореносодержащего льда по глубине ледника в степенных координатах характеризуется стремительным возрастанием параметра в эталонном слое, плавно-выпуклым характером кривой в более глубоких слоях 3 – 10 – 20 м и слабым, почти линейным возрастанием величины давления до глубины 150 м, что соответствует росту веса столба льда (см. рис. 2, кривая 1).

Напротив, распределение давления сферического обвала в чистом и мореносодержащем льду, имея почти зеркальное отражение с кривой веса самого льда, весьма показательна для процесса пробивания ледника в целом. Если кривая 2, характеризующая падение давления пробивающей сферы в чистом льду, имеет почти зеркальное отражение с кривой 1, за исключением участка глубин 20–40 м, что собственно и должно быть, то кривая 3 резко деформирована в виде трех «полок» на разных глубинах (см. рис. 2).

Первый участок резкого падения давления пробивающей сферы от поверхности ледника до глубины 10–15 м (первая полка) вызван тем, что на глубине около 12 м скорость увеличения площади лобового сопротивления превышала 10 тыс.  $\text{м}^2/\text{с}$ , а на глубинах 12–23 м составила всего около 300  $\text{м}^2/\text{с}$  при примерно одинаковой кинетической энергии обвала –  $9 \cdot 10^{11}$  Дж и  $6,5 \cdot 10^{11}$  Дж – с соответствующим падением скорости пробивания 150–135 м/с и 135–114 м/с. Обращает на себя внимание глубина примерного «перелома событий» – около 12 м, что соответствует длине суммы ребер куба льда и близко пределу пластичности льда, равному 11 м, т.е. пространственному эталону  $1 \text{ м}^3$  льда.

Второй участок резкого падения давления (вторая полка) расположен на глубине 23–30 м и характеризуется постоянной площадью лобового сопротивления и лобового контакта шарового сегмента – полусферы, падением давления с  $1,3 \cdot 10^8$  до  $4,4 \cdot 10^7$  Па при уменьшении энергии пробивающей сферы с  $6,5 \cdot 10^{11}$  до  $5,1 \cdot 10^{11}$  Дж и падении скорости со 114 до 100 м/с. Падение давления на этом участке объясняется эффектом самоорганизации процесса пробивания при вхождении сферы в цилиндрическое отверстие с затратами части энергии на расширение этого отверстия. Ширина такой фрикционной зоны, можно полагать, мало отличается от толщины жидкокристаллического очага, которая судя по характеру изгиба кривой  $P(h)$  на глубине 1–3 м (см. рис. 1) должна составлять около 1,5 м. Однако, учитывая тот факт, что при погружении сферы с 23 до 30 м давление на высокоскоростном участке контакта сферы с пробиваемым цилиндром резко падает, вероятно, ниже  $10^5$  Па, по отношению к внутриочаговому (5–6)  $\cdot 10^{11}$  Па, толщина фрикционной зоны не должна превышать 0,1 м, иначе произойдет рекристаллизация жидкокристаллического вещества.

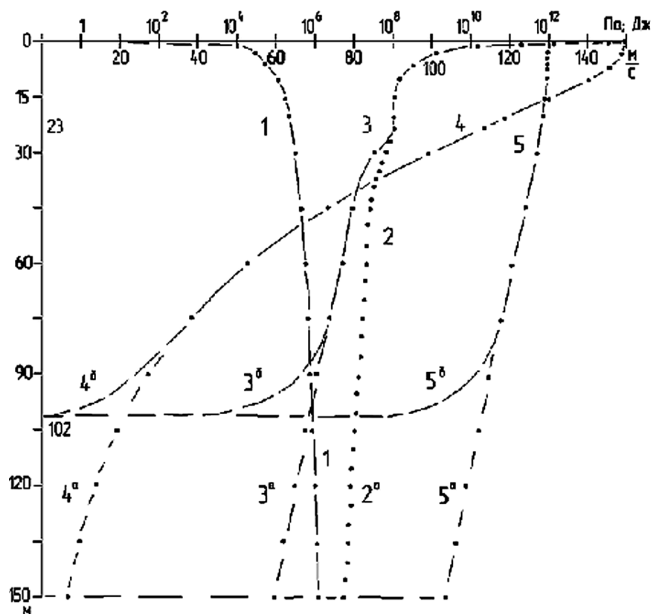


Рис. 2. Изменение основных параметров процесса пробивания ледника крупным обвалом горных пород: 1 – давление мореносодержащего льда; 2–3 – давление обвала в чистом (2) и мореносодержащем (3) льду; 4–5 – уменьшение скорости (4) и энергии (5) обвала по глубине ледника; а – расчетные значения параметров; б – ожидаемое распределение параметров в окрестности точки равенства давлений льда и обвала.

Описанное изменение соотношения динамических параметров процесса (см. рис. 1, 2) невольно наталкивает на мысль о том, что погружение сферы на глубину более ее диаметра (46 м) приводит к совершенно необычному движению пробивающего тела. Оно происходит в жидкокристаллической оболочке. Толщина такой оболочки на фронтальном участке, возможно, как раз и соответствует указанному выше значению в 1,5 м. В зоне бокового высокоскоростного движения (фрикционной зоне) она не превышает 0,1 м, чего вполне достаточно для выталкивания обломков морены.

Тыловая часть сферы, мгновенно заполняясь жидкокристаллическим льдом, испытывает торможение за счет вынужденного формой образования вихрей в слое толщиной вряд ли более 3 м (см. рис. 1), на внешней границе которого идет непрерывная рекристаллизация льда – своеобразное «запечатывание» пробиваемого сферой цилиндра.

Если такие соображения считать верными, – пробивающая сфера с глубины около 50–60 м движется в жидкокристаллической оболочке со скоростью 60–30 м/с, – то кривая падения давления глубже 50–60 м должна иметь более пологий характер, чем на глубине 10–25 м, что действительно имеет место быть (см. рис. 2). Причем кривая должна отражать быстрое падение скорости и энергии за счет вихреобразования в тыловой части жидкокристаллической оболочки, т.е. характер кривых скорости, энергии и давления должен иметь вогнутый характер, а сами кривые – выклиниваются на некоторой глубине предельного пробивания сферы.

В качестве предельной глубины логично выбрать уровень, соответствующий окрестности точки пересечения двух кривых давления: давления за счет собственного веса мореносодержащего льда и давления сферы в мореносодержащем льду – кривые 1 и 3 пересекаются на глубине 102 м (см. рис. 2), что почти на 20% меньше предварительных грубых оценок (120 м). Перегиб кривой  $P(h)$  на глубине 85–102 м отражает третью «полку» падения давления пробивавшей лед сферы. Процесс останавливается.

Следовательно, механизм пробивания ледника сферой горных пород представляет собой непрерывное проваливание обвала в слой жидкокристаллического льда, возникающий на контакте сред при огромном давлении в виде постоянно пульсирующего вихревого термоактивационного «кипения» вещества. Пробивание характеризуется потерей энергии и скорости тела по глубине, скачкообразным уменьшением давления сферы при ее погружении на глубину диаметра, после чего она движется в жидкокристаллической оболочке, тормозясь лобовым сопротивлением, выталкиванием обломков и вихреобразованием в тыловой части тела вплоть до прогрессивного падения давления до величины, равной давлению окружающего льда на определенной глубине.

### 3. Реальный сценарий пробивания ледников крупными обвалами горных пород

Предлагаемый сценарий пробивания горных ледников крупными обвалами горных пород представляется максимально близким к реальным условиям взаимодействия сред в силу выявленных выше закономерностей и знания обобщенного строения горнопородного и ледникового тел, которые резко отличаются, прежде всего по прочности материала – около 100 МПа и 1 МПа соответственно. Поэтому обвалы рассматриваются как твердые тела, а ледники – как пластические.

Крупные обвалы горных пород периодически возникают на высоких крутых стенках ледниковых цирков с перепадом высот до 1000 м и более и уклонах поверхности до  $60^\circ$  и более, например, в цирке ледника Колка<sup>1</sup>. Объем самых крупных обвалов превышает 40–50 тыс. м<sup>3</sup> при массе больше критической –  $10^8$  кг. Обвалы срываются за счет самых разных причин, включая и сейсмические толчки. Их движение начинается в виде соскальзывания и опрокидывания блоков горных пород, которые при падении по обрывистым склонам почти теряют сцепление с подстилающей поверхностью и разгоняются до 100–160 м/с. При движении обвалов отчетливо проявляется свойство самоорганизации горных пород<sup>2</sup>: они приобретают компактное сложение в виде удлиненной каплевидной массы. В такой каплевидной компактной массе, представленной скоплением блоков с поперечником до нескольких метров, всегда присутствует бесчисленное множество мелких обломков вплоть до щебня, песка и пыли, которые заполняют промежутки между основными блоками и вытягиваются в виде шлейфа в тыловой части обвала. Фронтальная часть крупных обвалов обычно четко выражена, иногда имеет близкую к полусфере поверхность. Возьмем для исследования именно такой обвал с промежутками между основными блоками 0,1–0,5 м при стандартно критической массе каплевидного объема и принятой скорости падения (150 м/с) перед ударом о ледник.

Ледник представим в виде наклоненной неровной поверхности с перепадом высот 1–3 м, покрытой остатками фирна, единичными обломками горных пород и ручейками талой воды при активной абляции льда. Толщина ледника составляет 150 м, по глубине он относительно равномерно насыщен обломками горных пород принятых ранее массы и размеров, относится к типу теплых ледников. Помимо морены внутри ледниковой толщи расположены многочисленные полости разнообразной формы и размера: трещины, колодцы, каверны, линзы, каналы стока, которые частично заполнены водой в соответствии с гидравлической структурой таких ледников<sup>3</sup>. При скважности (пористости) ледника 10–15% можно считать, что по глубине ледника относительно равномерно расположены горизонтальные плоские полости высотой 3 м, наполовину заполненные водой. Их число составляет около 7, четыре из которых расположены в слое 0–100 м, т.е. на глубине пробивания заморенного льда критической массой горных пород.

<sup>1</sup> Познанин В.Л. Механизм селевых ледниковых катастроф...; Познанин В.Л., Геворкян С.Г. Импактный механизм подготовки ледника Колка к селевой катастрофе...; Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Указ. соч.

<sup>2</sup> Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.

<sup>3</sup> Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 247 с.; Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Указ. соч.

Рассмотрим взаимодействие представленных тел при изложенных условиях, учитывая особенности распределения динамических параметров по глубине ледника (см. рис. 1, 2). Тогда ключевые участки пробивания представим в виде логической последовательности глубин взаимодействия тел:

- 1) поверхностные слои ледника до глубины 3 м;
- 2) слои до глубины, превышающей радиус обвала (примерно до 40 м);
- 3) слои ледника глубже 40 м.

Этим глубинам соответствуют три стадии развития процесса.

Момент касания угловатой поверхностью сфероидного компактного скопления обломков – обвалом, – ноздреватой коры таяния льда и неровной с углублениями поверхности ледника, представляется чрезвычайно сложным. Касание выступа ледяной поверхности равновероятно любым крупным блоком, который ударяет плоскостью, ребром или углом. Это вызывает мгновенное ( $10^{-3}$  с) сжатие коры таяния льда и появление на площади контакта около  $10\text{ м}^2$  жидкокристаллического очага с перепадом давлений в диапазоне  $10^{12}\text{--}10^{18}$  Па на отрезке длиной около 3 м. Возбужденное разрывом молекулярных связей термоактивационное состояние вещества взрывообразно усиливается асинхронными непрерывными скачками давления в течение  $10^{-6}\text{--}10^{-8}$  с величинами горизонтальных градиентов до  $10^{12}$  МПа на 1 м. Восприятие состояния такого вещества лежит за рамками реальности, хотя в такой термобарический «котел» следует добавить огромное число акустических упругих ударов и плотный электромагнитный «бульон» эмиссии при сжатии и разрушении частиц льда и горных пород. Описанное состояние жидкокристаллического очага в первые мгновения удара, вероятно, ближе к реальности, чем весь сценарий пробивания ледника горным обвалом. Тем не менее, попробуем последовательно проследить этот процесс, понимая сверхсложность взрывоподобного состояния вещества в очаге.

Касание неровной поверхностью обвала нескольких выступов на поверхности ледника вызывает асинхронное появление нескольких участков жидкокристаллического льда, которые через  $10^{-2}$  с при глубине понижений между выступами в 1–3 м мгновенно войдут в соприкосновение. При слиянии отдельных слоев жидкокристаллического льда действуют дополнительные горизонтальные взрывоподобные силы слияния и возникновения единого очага площадью около  $400\text{ м}^2$  (см. рис. 1). Можно полагать, что именно суммарные силы дополнительной активации объединенного очага способны обеспечивать высокоскоростное разрушение твердого ледникового льда и его непрерывный переход в жидкокристаллическое состояние, а, следовательно, быть главной причиной падения обвала внутрь ледника.

При вхождении в верхний 3-метровый слой ледника проявляются первые изменения параметров самого обвала, когда его скорость уменьшается всего на 1 м/с. В течение 0,02 с (см. рис. 1) происходит инерционное схлопывание 6–30 промежутков между отдельными блоками горных пород в каплевидной части обвала. Это вызывает те самые ударно-вибрационные нагрузки в очаге, мощные акустические звуковые удары в воздушной среде (грохот), эмиссионный выброс электромагнитного излучения в радиочастотном диапазоне и эффекты перегрева на контактах блоков обвала, раздавливающих мелкие обломки между ними (характерный запах гари хорошо знаком полевикам при падении обвалов). Все эти эффекты образуют специфический фон при ударе обвала, когда на поверхности ледника в течение около 0,4–0,6 с формируются мощные горизонтальные потоки вещества. Выбросы кусков разбиваемого льда и обломков горных пород из периферийной части обвала радиально устремляются вместе с обгоняющей их звуковой волной в виде ударного вала вещества со скоростью до 150 м/с, который формируется вокруг отверстия в леднике. Этот признак соответствует переходу процесса из первой во вторую стадию.

Принципиально важным моментом второй стадии развития процесса является прохождение обвалом глубины, большей радиуса его каплевидной части, когда стабилизируется величина падения давления, а площадь жидкокристаллического очага достигает максимума (см. рис. 1, 2). Главное здесь – соотношение тормозящих и стимулирующих эффектов.

Тормозящие эффекты при падении реального обвала в отличие от движения сплошной сферы обусловлены наличием, хоть и сжатых ударом, промежутков между блоками каплевидного тела обвала. При погружении такого не сплошного тела в ледник возникают и развиваются эффекты расклинивания блоков за счет внедрения между ними жидкокристаллического вещества при лобовом сопротивлении. Поперечник лобовой части обвала должен увеличиваться, а пробиваемое отверстие в леднике – расширяться. Это неизбежно приводит к усилению выдавливания жидкокристаллического вещества вверх по контактной фрикционной зоне и торможению обвала.

Стимулирующим эффектом движения обвала выступает раздавливание горизонтальных, наполовину заполненных водой полостей в толще ледника. При их толщине 3 м и плановых размерах больших площади лобового сопротивления, обвальное тело, хоть и незначительно, но ускоряется. Его движение мгновенно (0,01 с) сжимает воздух и, оказывая огромное давление на водяной слой и смешивая его с веществом жидкокристаллического очага, ударяет в ледяное дно полости. Восстановившийся и активированный ударом жидкокристаллический очаг обеспечивает дальнейшее движение обвала. Ясно, что при таком протекании событий должны иметь место огромные перепады давления, мгновенная смена состояний и соотношений вещественных сред.

Соотношение тормозящих и стимулирующих протекание процесса пробивания эффектов пока не поддается количественному описанию, что заставляет высказать предварительное предположение об их взаимной компенсации, хотя интуитивно следует ожидать преобладания торможения в силу прерывистости ледниковой среды и гидравлической связи всех ледниковых полостей – открытости системы в целом.

Третья стадия развития процесса на глубине более 40 м характеризуется эффектом «схлопывания» отверстия в леднике и угасающим движением обвала в жидкокристаллической оболочке. Схлопывание, за-

купорка пробиваемого в леднике цилиндрического отверстия обусловлена затягиванием в него кусков льда, фирна с поверхности и материалом обвального шлейфа горных пород. Затягиваемый в отверстие поток вещества сталкивается с фронтом выдавливаемой вверх по краям обвала жидкокристаллической массы, которая при резком падении давления плотно кольматирует встречный поток вещества рекристаллизационным льдом – формируется пробка ледово-каменной брекчии. Такие отложения характерны для обвальной зоны, например, ледника Колка<sup>1</sup>.

Гидравлическая связь большинства внутренних полостей теплых ледников<sup>2</sup> – открытость системы «пробивающий обвал – ледник» – должна существенно сказаться в средних слоях ледового массива на глубине 60–100 м. Если в верхнем 20–50-метровом слое ледника высокая скорость обвала (120–170 м/с) определяет малое время пробивания полостей (0,025–0,04 с), когда давление в очаге не успевает значительно упасть и вновь скачком восстанавливается, то ниже скорость пробивающего тела уменьшается до 50–25 м/с, время возрастает до 0,06–0,12 с, и давление падает более существенно. На глубине 75–85 м обвалу достаточно пробить очередную полость при скорости около 35 м/с и давление скачком упадет на  $0,3–0,7 \cdot 10^7$  Па, т.е. ниже давления окружающего льда (см. рис. 2). Процесс пробивания начнет резко замедляться, и обвал остановится по более пологой кривой.

Особо отметим, что раздавливание водонапорной полости на глубине 75–85 м, гидравлически связанной с дневной поверхностью, может привести к фонтанированию воды в любой части ледника, или к прорыву емкостей воды по каналам стока при гидравлическом ударе силой не менее 1 МПа и, как следствие, – к селевому потоку у фронтальной части ледника.

Реальные случаи пробивания горного ледника Колка крупными обвалами горных пород массой до  $0,7 \cdot 10^{10}$  кг в 2002 г. описаны в связи с Геналдонской катастрофой<sup>3</sup>. Проведенное исследование позволяет совершенно по-новому оценить состоявшееся событие, но полностью подтверждает и расшифровывает суть ударного проникновения крупных обвалов на ледниковое ложе. Дело в том, что в реальных условиях крупные обвалы, разгоняясь до 150 м/с, внедряются в зоне питания ледников, легко прорезают водонасыщенные фирновые толщи, слои молодого льда малой плотности и более плотные слои придонного заморенного льда: энергии таких обвалов хватает даже для того, чтобы выбросить огромные объемы горной породы на противоположный борт ледниковых цирков<sup>4</sup>.

Следовательно, рассмотренный в статье механизм отражает наиболее сложные, жесткие условия развития процесса и может быть использован для исследования взаимодействия крупных обвалов горных пород с любыми ледниками. В этом кроется суть использования предложенного автором универсального энергетического эталона возникновения и развития экзогенных геологических процессов.

### Заключение

В заключении целесообразно сформулировать ряд принципиально новых выводов, которые подводят итог выполненному исследованию и позволяют использовать полученные результаты для изучения других видов экзогенных геологических процессов при взаимодействии природных сред и горных пород.

1. Для решения сложных проблем развития экзогенных геологических процессов впервые предложен и обоснован универсальный эталон активности –  $1 \text{ м}^3$  льда при плотности  $900 \text{ кг/м}^3$ , температуре  $0^\circ \text{C}$ , нормальном атмосферном давлении. Эталон отражает фундаментальные свойства природных сред – пространственные ( $1 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$ ), временные ( $1,7 \cdot 10^6 \text{ с}$ ) и энергетические ( $3 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^3$ ) на всех уровнях организации вещества литосферы – от точечного до глобального. Эталон использован для исследования одного из самых сложных процессов ударного взаимодействия крупных обвалов горных пород с теплыми ледниками.

2. При ударе крупного сферического обвала по поверхности однородной толщи льда, скачком возникает давление более  $10^{14}$  Па, которое превышает энергию разрушения молекулярных связей и прочностные параметры льда на 4–8 порядков. Ударное раздавливание поверхностного слоя льда вызывает мгновенное ( $10^{-4} \text{ с}$ ) изменение его состояния и возникновение жидкокристаллического очага. В быстро разрастающемся очаге ( $10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ ) происходит фокусировка термоактивационных эффектов и их концентрация на фронтальной части, что вызывает непрерывное самовосстановление жидкокристаллического слоя.

3. Механизм пробивания ледника сферическим обвалом критической массы ( $10^8 \text{ кг}$ ) представляет собой непрерывное проваливание тела в самовоспроизводящийся очаг. Движение пробивающей сферы с импульсом силы  $10^{10} \text{ Н.с}$  испытывает лобовое сопротивление  $10^{10}–10^8 \text{ Н}$ , что вызывает быструю потерю энергии ( $\sim 10^{12} \text{ Дж/с}$ ), скорости (150–30 м/с) и давления ( $10^{10}–10^6 \text{ Па}$ ). Процесс продолжается до тех пор, пока давление обвала на лед не уменьшится до  $10^6 \text{ Па}$  – величины статического давления льда на глубине 102 м от поверхности.

4. Реальный сценарий пробивания теплых ледников крупными обвалами максимально приближен к натуре: обвал представлен каплевидным скоплением блоков и обломков горных пород, падающий со скоростью 150 м/с в разные ледниковые зоны – абляции, сложенную плотным льдом с малым числом пустот, и питания, сложенную толщей водонасыщенного фирна и молодого льда. Возможность обвального пробивания ледниковых зон определяется соотношением стимулирующих и тормозящих эффектов, возникающих при ударе. Стимулирующие эффекты обусловлены проваливанием обвала в пустые полости ледника и действием смазки водонасыщенных фирново-ледяных толщ. Тормозящие силы, вызванные лобовым

<sup>1</sup> Познанин В.Л. Механизм селевых ледниковых катастроф...; Познанин В.Л., Геворкян С.Г. Импактный механизм подготовки ледника Колка к селевой катастрофе...

<sup>2</sup> Голубев Г.Н. Указ. соч.

<sup>3</sup> Познанин В.Л. Механизм селевых ледниковых катастроф...; Познанин В.Л., Геворкян С.Г. Импактный механизм подготовки ледника Колка к селевой катастрофе...

<sup>4</sup> Познанин В.Л. Механизм селевых ледниковых катастроф... С. 46.

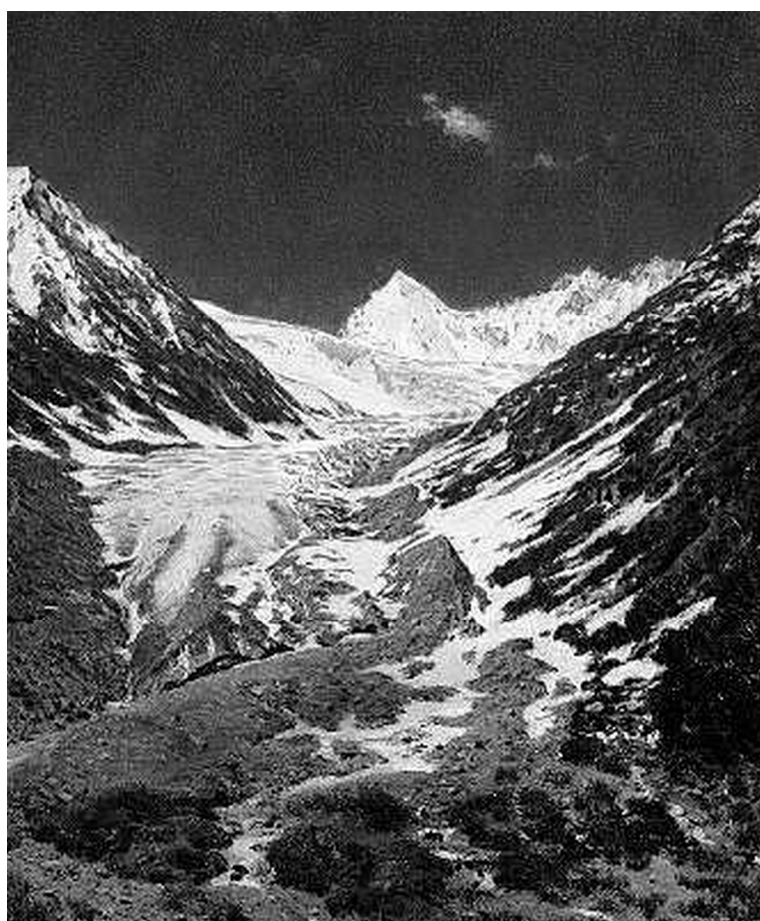


сопротивлением льда, дополняются расклиниванием обвального тела по межблочным промежуткам веществом жидкокристаллического очага, вихреобразованием в тыловой части обвала и самозакупориванием входного отверстия пробиваемого ледника.

5. В зонах абляции пробиваемых ледников доминируют тормозящие силы и обвалы с критической массой, теряя энергию, останавливаются на глубинах 80–120 м от поверхности, а в зонах питания – значительны стимулирующие эффекты: крупные обвалы не просто пробивают толщу ледника на глубину до 300 м, но и выбрасываются инерцией на противоположный борт ледникового ложа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.
2. Войтковский К.Ф. Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 255 с.
3. Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 247 с.
4. Гляциологический словарь / Под ред. чл.-кор. АН СССР В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
5. Маэно Н. Наука о льде. Пер. с яп. М.: Мир, 1988. 231 с.
6. Познанин В.Л. Закономерности гидротермического взаимодействия водных потоков с мерзлыми грунтами // Денудация в криолитозоне. М.: Наука, 1991. С. 62–73.
7. Познанин В.Л. Механизм селевых ледниковых катастроф: Колка 2002. М.: ИМГРЭ, 2009. 180 с.
8. Познанин В.Л., Геворкян С.Г. Элементы иерархии и формализация структурной сложности процессов криогенного растрескивания и термоэрозии // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. М.: ВИНТИ. 2000. № 3. С. 55–62.
9. 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.
10. Познанин В.Л., Миронов Н.А., Вдовина О.К. Теоретические основания пространственной дифференциации геологической среды для построения картографических моделей экзогенных геологических процессов // Инженерная геология. М.: ПНИИИС. 2006. С. 17–22.
11. Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Исследование пульсирующего ледника Колка. М.: Наука, 1983. 169 с.
12. Чеверев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов. М.: Научный мир, 2005. 234 с.



*Ледник по дороге из Кашира в Ладакх. Этюд. Фрагмент.  
Художник В.В. Верещагин. 1875*