

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 551.578.48

ОБРУШЕНИЕ ГОРНЫХ СКЛОНОВ И ОБРАЗОВАНИЕ ДАЛЬНЕПРОБЕЖНЫХ КАМЕННЫХ ЛАВИН ПРИ КРУПНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВАХ

В. В. Адушкин

*Институт динамики геосфер РАН, E-mail: adushkin@idg.chph.ras.ru,
Ленинский проспект, 38, к. 1, 119334, г. Москва, Россия*

Представлены результаты регистрации дальнепробежных каменных лавин при проведении крупномасштабных подземных взрывов в массивах горных пород. Установлены критические условия их образования в зависимости от параметров динамического воздействия, объема обрушения, высоты и крутизны склона. Показано, что основным условием образования подвижных каменных лавин является их объем свыше $106 - 108 \text{ м}^3$. Дополнительным фактором для развития лавин в случае относительно небольших объемов обрушения в диапазоне $106 - 107 \text{ м}^3$ служит наличие участка разгона в основании склона и отсутствие встречного склона. Приведены зависимости дальности распространения фронта лавин от их объема и высоты обрушения. Отмечена дальность распространения лавин от их материального состава, в частности повышенная подвижность в случае каменно-ледяных или каменно-снежных лавин, начиная с объемов $\sim 105 \text{ м}^3$. Дан краткий обзор теоретических и модельных работ, посвященных объяснению снижения трения при движении крупных лавин.

Обрушение, оползень, горный склон, каменная лавина, подземный взрыв

DOI: 10.15372/FTPRPI20190604

Результаты наблюдений за процессами обрушения горных склонов и образованием дальнепробежных каменных лавин получены при регистрации развития внешних явлений в эпицентральной зоне мощных подземных взрывов в горном массиве Новоземельского полигона в 1970-х гг. [1]. При осуществлении подземных взрывов в условиях горного рельефа происходили процессы интенсивного обрушения склонов. Регистрация развития внешних явлений, в том числе процессов обрушения склонов, проводилась методом кино съемки с вертолета и специально оборудованных наземных оптических пунктов. Велась также аэрофотосъемка до и после проведения взрыва разрушенных участков горного массива и образовавшихся каменных лавин. Материалы аэрофотосъемки обработаны на картографическом предприятии. Основные размеры области обрушения на склоне и каменных лавин определены геодезическими методами, а также путем проведения инструментальных измерений непосредственно на местности. Местоположе-

ние области обрушения и образовавшихся каменных лавин нанесено на топографическую карту в масштабе 1 : 1000 и 1 : 5000. В результате совместной обработки материалов кинорегистрации, аэрофотосъемки и геодезических измерений установлены объемы и линейные размеры каменных лавин, а также размеры области обрушения на склоне.

ТИПЫ ОБРУШЕНИЙ СКЛОНОВ

Процессы обрушения горных склонов в разных масштабах происходили при всех штольневых взрывах. Обрушение склона при каждом взрыве обладало своими особенностями в зависимости от рельефа поверхности склона, геолого-тектонического строения и параметров механического воздействия. Все подземные взрывы групповые, т. е. в каждой штольне размещали по несколько зарядов, что также находило отражение на внешней картине разрушения и обрушения склона. По общему виду разрушенного склона, характеру и объемам обрушения, линейным размерам области обрушения и ее расположению на склоне выделены четыре основных типа обрушения горных склонов в зависимости от объемов обрушающейся горной массы.

I тип обрушений — группа обрушений небольших объемов, возникавших локально в отдельных местах склона. К ним относятся следующие типы участков: крутой, в виде ложбины, отвесная стена на краю разлома и другие неровности рельефа. Иногда подобные локальные обрушения происходили в условиях невысоких параметров воздействия волны сжатия. В таких случаях масса горной породы, пришедшая в движение, составляла сотни и тысячи кубометров (рис. 1а). Обрушился отвесный участок склона, находившийся в верхней части при крутизне около 50°, в стороне от эпицентра на расстоянии около 700 м, где параметры волны сжатия составляли 1–3 м/с. Обрушившийся объем породы продвинулся вниз по склону до дна оврага и перегородил его. В ряде других подобных локальных обрушений движение каменных масс сопровождалось образованием на склоне разрозненных осыпей, пылевых облаков и отдельных скоплений разрушенной горной породы в основании склона. Аналогичные локальные обрушения наиболее крутых участков склона становились в некоторых случаях опасными, заваливая входные порталы штолен и расположенные на приустьевых площадках различного рода объекты и аппаратурные комплексы.

II тип обрушений. Часто при штольневых взрывах интенсивно формировался камнепад в виде движения вниз по склону сплошной каменной массы по всей поверхности горного массива как в области эпицентральной зоны, так и наиболее крутых участков склона. Такое интенсивное обрушение поверхности склона совместно с объемным обрушением отдельных более крупных участков или оврагоподобных ложбин происходило на протяжении 1–2 км. Объемы этих поверхностных обрушений большие (10^4 – 10^5 м³). После взрыва протяженные участки поверхности склона покрывались сплошным слоем каменных глыб различного размера, оползших или скатившихся с верхней части склона, и выглядели сильно разрушенными (рис. 1б). Однако толщина обрушенной поверхности не превышала первых метров, и для образования лавиноподобного движения не доставало каменной массы на единицу поверхности склона. В некоторых случаях эта масса сползала к основанию склона. Наиболее интенсивное движение каменной массы происходило вдоль ложбин и саев, расположенных на поверхности склона в области движения каменной массы.

III тип обрушений. Опыт наблюдений показал, что иногда подземный взрыв вызывал обрушение не наиболее крутого участка склона и не в самой интенсивной области воздействия. Такой участок подготовлен к обрушению особенностями геологического и тектонического строения склона, а также гидрогеологического режима, наличием напряженного состояния, подходящей слоистостью или системой разломов. В этом случае достаточно только сейсмического толчка от взрыва и определенная часть горного склона большого объема обрушалась под действием силы тяжести. Данный тип отличается от первого тем, что объемы обрушений составляют сотни тысяч

кубометров. В качестве примера на рис. 1*в, г* изображен оползень объемом $5 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, образовавшийся в нижней части склона при подземном взрыве в штольне А-17. Это обрушение возникло в стороне от эпицентральной области и не получило признаков лавинообразного движения. Более того, оно появилось на пологом участке склона с наклоном поверхности $15-20^\circ$ при невысоких параметрах волны сжатия с массовой скоростью $2-3 \text{ м/с}$. Решающую роль в оползневом обрушении сыграло присутствие тектонического разлома мощностью $0.2-0.5 \text{ м}$, вскрытого при проходе штольни на расстоянии около 500 м от устья. Разлом разделял массив прочных коренных пород от менее прочных у основания склона. Плоскость разлома наклонена под углом $50-60^\circ$ в сторону вершины горы и располагалась нормально к направлению движения волны сжатия. После обрушения части склона обнажилась поверхность обрыва и стало видно, что разлом заполнен льдом. Присутствие льда в разломе создало напряженное состояние в окружающем массиве. В результате совместного действия отраженной от поверхности склона волны разрежения и напряженного состояния в разломе обрушились части склона на протяжении около 500 м и высотой по склону $200-250 \text{ м}$. Передняя часть обрушения продвинулась вниз по склону примерно на 100 м за 15 с . Так как оползнеобразное обрушение произошло в основании склона и не было условий для его разгона, каменная лавина не смогла сформироваться.

IV тип обрушений. При проведении штольневых взрывов в ряде случаев возникали обрушения больших объемов на уровне 10^5-10^8 м^3 . Процесс обрушения подобных объемов горной породы превращался вначале в движущийся по склону огромный оползень и заканчивался образованием каменных лавин, которые распространялись от основания склона на расстояние нескольких сотен метров, а иногда свыше 1 км . По причине появления подобных дальнепробежных лавин этот тип обрушения склонов представляет наибольший интерес для данного исследования. На рис. 2 показана каменная лавина, сформировавшаяся при проведении подземного взрыва в штольне В-1.

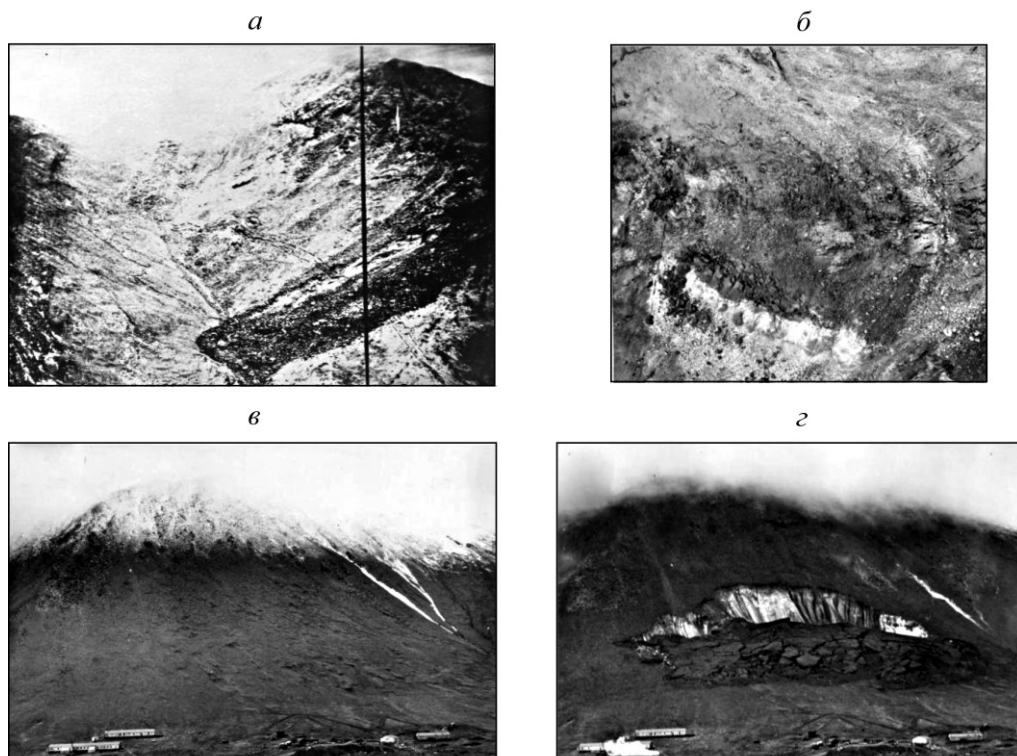


Рис. 1. Пример локального обрушения склона (I тип обрушения) (*а*); массовое обрушение поверхности склона в области эпицентра (II тип обрушения) (*б*); чрезвычайное обрушение склона (III тип обрушения): вид склона до обрушения (*в*), склон после обрушения (*г*)

КАМЕННЫЕ ЛАВИНЫ

Процессы образования каменных лавин зарегистрированы при восьми штольневых взрывах. Все они камуфлетные и характеризовались приведенной глубиной заложения зарядов $80 - 120 \text{ м/кт}^{1/3}$, максимальной скоростью подъема в эпицентре $10 - 40 \text{ м/с}$ и максимальной высотой подъема поверхности склона $5 - 80 \text{ м}$. Крутизна склонов в области обрушения изменялась от 30 до 50° . Область обрушения располагалась на высоте $200 - 800 \text{ м}$ с зоной эпицентра или вблизи эпицентральной зоны взрыва, где находились наиболее крутые участки склона. Под действием силы тяжести поднятые волной сжатия объемы разрушенной на склоне при отколе горной породы начинали оползать вниз, скорость их движения постепенно нарастала и при выходе на пологий участок склона достигала $40 - 90 \text{ м/с}$. В результате на поверхности вблизи основания склона формировались каменные лавины из достаточно компактной горной массы. Дальность их распространения зависела от высоты расположения области обрушения и объема обрушения или каменной лавины.

Результаты измерений объемов каменных лавин, их линейные размеры и дальность распространения фронта лавин, образовавшихся при проведении восьми подземных штольневых взрывов, представлены в табл. 1. Данные по размерам каменных лавин и дальности их распространения приведены в порядке уменьшения объема каменных лавин, точность определения которых заключена в пределах $10 - 20 \%$. Указанными объемами характеризуют не только лавины, но и области обрушения на склоне, не вводя коэффициент разрыхления.

ТАБЛИЦА 1. Основные размеры каменных лавин

Номер штольни	$V, \text{ м}^3$	$S, \text{ м}^2$	$H, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	L/H
В-1	$8 \cdot 10^7$	$3.5 \cdot 10^6$	400	1900	4.75
А-8	$2 \cdot 10^7$	$7.5 \cdot 10^5$	350	900	2.57
А-6	$8 \cdot 10^6$	$4.0 \cdot 10^5$	450	1200	2.67
А-10	$5 \cdot 10^6$	$2.2 \cdot 10^5$	350	900	2.57
А-2	$2 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^5$	300	700	2.33
А-9	$5 \cdot 10^5$	$6.5 \cdot 10^4$	350	750	2.14
А-3	$1 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^4$	430	900	2.10
А-12	$4 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^4$	300	500	1.83

Примечание: V — объем; S — площадь; H — высота центра тяжести породы; L — максимальная дальность распространения фронта лавины от проекции центра тяжести на поверхность, на уровне которой расположена лавина

Самая крупная каменная лавина объемом 80 млн м^3 сформировалась при подземном взрыве в штольне В-1 (рис. 2). Размеры лавины указаны в первой строке табл. 1. Процесс образования и движения лавины зарегистрирован при съемке с вертолета на высоте 300 м . В момент взрыва по всей высоте склона образовался купол диаметром около 500 м . Начальная скорость подъема купола 40 м/с , высота подъема $\sim 80 \text{ м}$. Через $2 - 3 \text{ с}$ после взрыва стало заметным оседание всей массы купола, а через $10 - 15 \text{ с}$ верхняя половина склона очистилась от разрушенной породы. Обрушение охватило всю высоту склона, вытянулось вдоль него на 1.5 км , и верхняя граница области обрушения достигла высоты 800 м . На столовой поверхности горного массива образовались две провальные воронки диаметром около 400 и 200 м . Эпицентральной зоной взрыва располагалась на склоне на высоте $200 - 600 \text{ м}$, в пределах области обрушения на самом крутом участке с наклоном $40 - 45^\circ$.

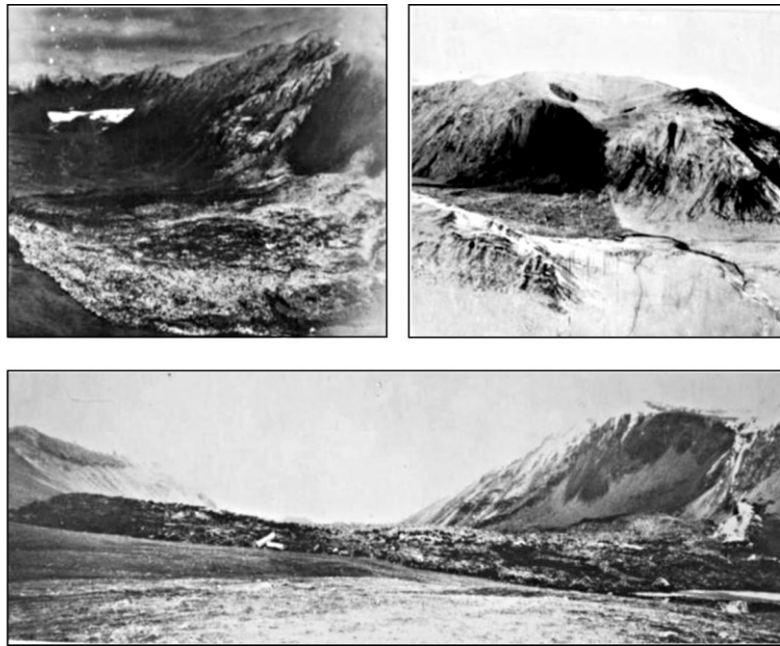


Рис. 2. Пример обрушения склона с образованием дальнотрассовой каменной лавины объемом 80 млн м³ при взрыве в штольне В-1 (IV тип обрушения)

Верхние слои горной породы в области обрушения перемещались по нижним так, что фронт движущейся массы содержал породу из верхней части склона. Постепенно процесс оползания разрушенной породы привел к появлению каменной лавины, фронт которой сформировался на расстоянии 300–500 м от основания склона и через 25 с достиг скорости 60 м/с. Ширина фронта лавины к этому времени достигла максимума в 2.2 км (при ширине области обрушения 1.7 км) и в дальнейшем не изменялась. Движение лавины закончилось через 60 с после взрыва. На топографической карте района взрыва показаны размещение области обрушения на склоне и конечное положение каменной лавины (рис. 3). Длина ее тыловой части в нижней зоне области обрушения до фронта составила 1.6 км. Фронтальная масса лавины после остановки содержала куски породы и ледника с верхней части склона. Перемещения разрушенной породы и перестройки фронта лавины при движении не происходило. Из схемы каменной лавины видно, что скальная порода “растеклась” по дневной поверхности в основании склона в виде слоя со средней толщиной 20–50 м в центральной части лавины и 5–15 м на периферии. Поверхность лавины оказалась неровной, выделялись крупные борозды и цепи холмов. В процессе движения лавины осуществлялась активная сепарация каменного материала по размерам кусков, в результате которой наиболее крупная фракция находилась в поверхностном слое и на периферии.

Необычная лавина объемом 5 млн м³ в виде двух огромных языков образовалась в результате обрушения горного склона при подземном взрыве в штольне А-10. Общая картина состояния горного массива до взрыва и после обрушения склона примерно через 1.3 ч приведена на рис. 4. В правой нижней части снимка после взрыва около основания склона видны отложения обрушения и сошедшая масса горной породы. Механическое воздействие взрыва на горный массив настолько значительно, что изменились очертания верхнего контура горы и переднего склона не только в области расположения лавины, но и в центральной части склона, где возникла интенсивная каменная осыпь. На вершине горы появилась обширная провальная воронка диаметром свыше 1 км и глубиной 50–70 м, окруженная зоной вспученной породы шириной не менее 0.5 км. На снимке горы после взрыва виден шлейф газа, выходящего из дна провальной воронки.

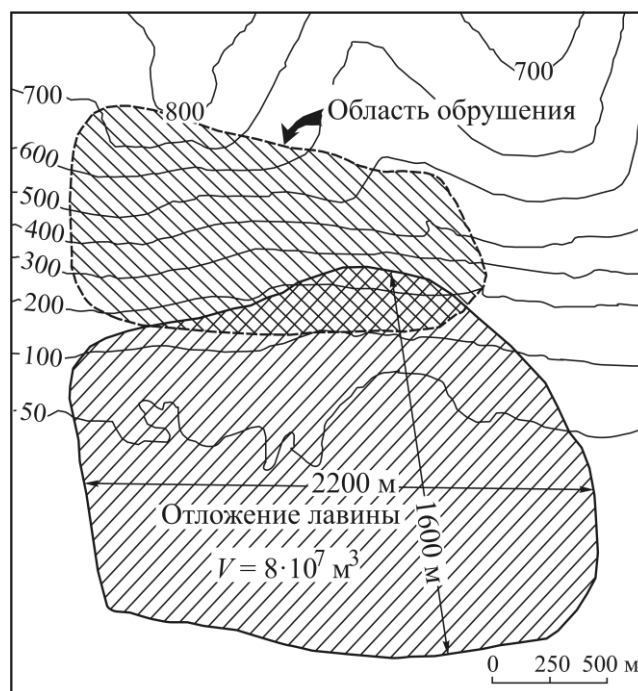


Рис. 3. Расположение области обрушения на горном склоне и отложений лавины на поверхности в основании склона при взрыве в штольне В-1

Воздействие взрыва на верхней части склона, где образовалась провальная воронка, характеризовалось массовой скоростью 25–28 м/с, зафиксированной размещенными датчиками и методом оптической регистрации с применением световых реперов. В области максимального воздействия на верхней части данного склона зарегистрированы начальная откольная скорость 50–55 м/с и максимальная высота подъема поверхности склона на 150 м. Обрушение не захватило верхнюю часть склона и произошло ниже этой эпицентральной области на наиболее крутом обрывистом участке 40–45° между отметками 270–530 км. Область обрушения протяженностью вдоль склона около 600 м ограничена с одной стороны массовой скоростью 8–10 м/с, с другой — 10–25 м/с, снизу 10–14 м/с.

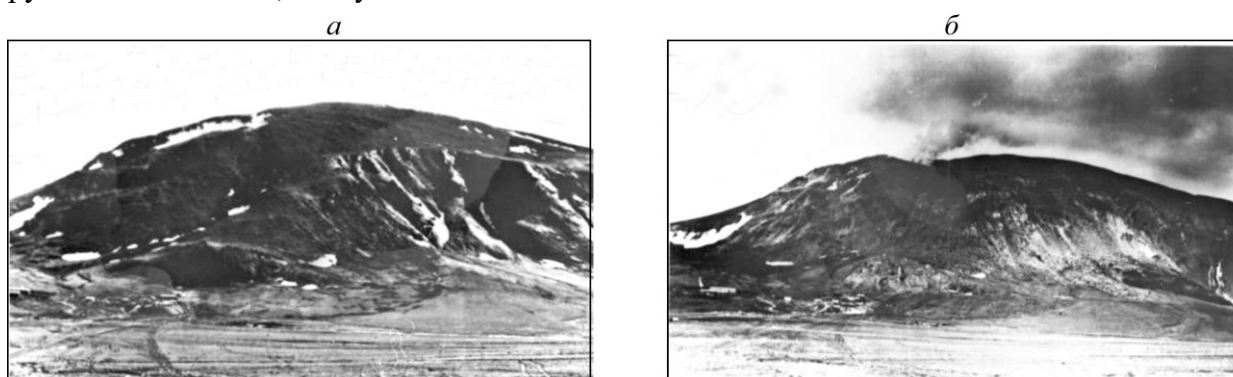


Рис. 4. Обрушение склона с образованием каменной лавины объемом 5 млн м³ при взрыве в штольне А-10: а — склон горы до взрыва; б — после взрыва (лаваина видна справа внизу в основании склона)

Процесс обрушения склона с самого начала имел оползневый характер без заметного подъема его крутой части. Фронт лавины обозначился в нижней части склона и, пройдя путь свыше 500 м, через 15 с после взрыва достиг скорости 40 м/с. Дальнейшее движение лавины продол-

жалось по местности с наклоном $10-15^\circ$ вплоть до остановки ее фронта на поверхности с наклоном $5-7^\circ$. Полное время процесса обрушения склона и движения основной массы лавины составило 30 с. Особенность данной лавины заключается в том, что в процессе движения уже сформировавшейся каменной лавины после выхода с крутого участка склона на более пологий произошло ее разделение на две части с соотношением объемов $1:4$. На топографической схеме показаны контуры области обрушения и окончательное расположение обеих частей лавины в основании склона (рис. 5а). На рис. 5б представлена фотография обеих лавин со стороны лавины 1 меньшего объема. Основные размеры обеих частей лавины при штольневом взрыве А-10 приведены ниже:

Параметр	$V, \text{м}^3$	$S, \text{м}^2$	$h, \text{м}$	$H, \text{м}$	$L, \text{м}$	$l, \text{м}$	L/H
Лавина 1	10^6	$6.0 \cdot 10^4$	10	350	900	600	2.57
Лавина 2	$4 \cdot 10^6$	$1.6 \cdot 10^5$	25	350	800	500	2.30

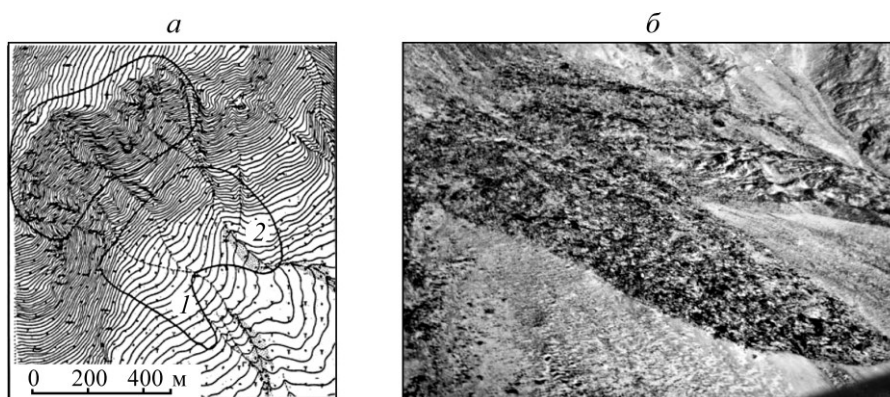


Рис. 5. Расположение области обрушения и каменной лавины на топографической схеме при взрыве в штольне А-10 (цифрами отмечены составные части лавины: 1 — объем 1 млн м^3 , 2 — объем 4 млн м^3) (а); общий вид каменной лавины при взрыве в штольне А-10 (на переднем плане лавина 1, на заднем — лавина 2) (б)

Две каменные лавины в разных местах склона образовались при подземном взрыве в штольне А-2. Одна объемом 2 млн м^3 имела ширину около 600 м, длину 300–450 м, толщину от 10 м ближе к фронту лавины и до 20 м у основания склона. Область этого обрушения расположена ниже эпицентра взрыва, где массовая скорость достигала 15 м/с. Верхняя отметка области обрушения 570 м, нижняя 250–380 м. Вторая лавина, завалившая устье штольни А-2, имела форму вытянутой гряды длиной 500 м, шириной 50–100 м и толщиной 3–7 м. Область ее обрушения находится на отметках 320–470 м, где параметры волны сжатия достигали 8–12 м/с. Движение каменной лавины шло вдоль оврага, прорезавшего склон по всей высоте.

При взрыве в штольне А-8 произошло интенсивное обрушение склона, в результате которого образовалась каменная лавина объемом 20 млн м^3 . Лавина имела форму трех сомкнутых обширных языков общей шириной 1.5 км и длиной 500–700 м. Характерная толщина лавины 15–25 м. Область обрушения захватила всю высоту склона от основания до отметки 580 м и вытянулась вдоль склона на 1.3 км. Обрушение возникло на наиболее крутой части склона $40-45^\circ$ и не распространилось на зону максимального воздействия выше по склону на более пологом участке.

При подземном взрыве в штольне А-6 сформировались две каменные лавины: крупная объемом 8 млн м^3 и небольшая объемом около 1 млн м^3 . Область обрушения этих лавин общая, однако из-за расположенного в нижней части выступающего участка на склоне оползания породы разделилась на два потока. Длина крупной части лавины составила 600–700 м, ширина 400–500 м, толщина отложений в лавине от 20 м в тыльной части до 10 м в передней. Область

обрушения находится на склоне ниже эпицентра взрыва и в стороне от эпицентра между отметками 300 и 800 м на крутом участке склона. Граница области обрушения по своему контуру соответствует параметрам поля массовой скорости 6–9 м/с при средней крутизне склона 40°.

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБРУШЕНИЙ СКЛОНОВ

Рассмотренные примеры наиболее крупных обрушений с образованием каменных лавин и материалы других взрывов из табл. 1 свидетельствуют о том, что одной интенсивностью воздействия на склон не удастся описать условия его обрушения. Только при двух подземных взрывах в штольнях А-2 и В-1 область обрушения включала зону эпицентра, где параметры волны сжатия были наибольшими. При остальных взрывах обрушение склона происходило вне зоны максимального воздействия и область обрушения тяготела к крутым участкам склона. Следовательно, существенное значение для обрушения горного склона имеет не только интенсивность воздействия взрыва, но и крутизна склона. В связи с этим проведен совместный анализ данных по распределению параметров волны сжатия на склоне и углов наклона его различных участков в области обрушения и вне этой области, но оставшихся на склоне. В результате анализа по совместному влиянию параметров воздействия взрыва и крутизны склона установлено эмпирическое соотношение между критической массовой скоростью U_* , при превышении которой происходило обрушение склона, и его крутизной, характеризующейся углом наклона α :

$$U_* = \frac{5.2}{\operatorname{tg}(\alpha - 25^\circ)} \quad \text{при } \alpha > 25^\circ. \quad (1)$$

Здесь угол наклона поверхности склона 25° принят в качестве предельного в отношении обрушения разрушенной породы, которая соответствует углу естественного откоса. Такой угол наклона для разрушенной массы горной породы находит подтверждение в результатах наблюдений ряда взрывных работ в условиях склонов различной крутизны.

Установленная зависимость (1) получена для крупномасштабных подземных взрывов, когда объемы обрушения достигали сотни тысяч и нескольких миллионов кубических метров и линейные размеры области обрушения сотни и тысячи метров. При снижении масштабов взрывных работ значимы некоторые индивидуальные аспекты строения горного массива, связанные с геологическим и тектоническим строением, наличием разломных зон, состава типов пород, уровнем его блочности и трещиноватости. В условиях крупного масштаба и определенной однородности строения отмеченные факторы менее существенны, интегральная прочность горного массива становится ниже, а важную роль играет только блочно-иерархическая структура. О крупном масштабе рассматриваемых процессов обрушения горных склонов свидетельствуют данные табл. 2, в которой наряду с объемами обрушений V приведены размеры площади обрушения S , средняя глубина области обрушения h , средняя протяженность области обрушения вдоль склона b и ее размер поперек склона c .

ТАБЛИЦА 2. Основные размеры лавин 1 и 2 при штольневом взрыве А-10

Параметр	В-1	А-8	А-6	А-10	А-2	А-9	А-3	А-12
V , м ³	$8.0 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^6$	$5.0 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^6$	$5.0 \cdot 10^5$	10^5	$4 \cdot 10^4$
S , м ²	$1.4 \cdot 10^6$	$5.6 \cdot 10^5$	$3.2 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^5$	$4.5 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^4$	10^4
h , м	57	36	25	24	16	11	5.5	4
s/h	20.9	20.8	22.6	19.2	22.1	19.3	24.4	25
b , м	1700	1300	950	600	560	200	120	200
c , м	1000	650	480	420	330	100	200	120

Из данных табл. 2 следует, что протяженность области обрушения вдоль склона в 1.4–2.0 раза выше, чем поперек склона. Исключение составило только обрушение при взрыве в штольне А-3, при котором область обрушения вытянута сверху вниз в соответствии с расположением крупного оврага на склоне. Кроме того, при увеличении объема обрушения систематически росли площадь и глубина области обрушения, причем их изменение происходило таким образом, что отношение S/h с разбросом в пределах 10% оставалось постоянным. Это свидетельствовало о внутренней связи основных размеров каждой области обрушения. Зависимости площади и глубины обрушения от ее объема соответствовали эмпирическим формулам:

$$s = 7.7V^{\frac{2}{3}}, \quad h = 0.13V^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

Полученные зависимости (2) позволяют по площади обрушения оценить объем оползающей горной породы, а по объему — среднюю глубину области обрушения. Из сопоставления глубины области обрушения с линией наименьшего сопротивления следует, что глубина области обрушения составляет 5–10% этой величины. Оценки показали, что средняя глубина области обрушения в 2–3 раза меньше высоты подъема поверхности склона в области эпицентра в случаях ее образования в этой области.

ДАЛЬНОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАМЕННЫХ ЛАВИН

Согласно материалам наблюдений процессов обрушения горных склонов под действием подземных взрывов, каменные лавины формировались только при восьми крупных обрушениях объемом свыше $10^4 - 10^5 \text{ м}^3$ (табл. 1). Условия рельефа местности в основании склонов для этих взрывов идентичны: обрушившаяся порода могла беспрепятственно двигаться вниз по склону и далее распространяться по местности со слабым уклоном $2 - 5^\circ$ вплоть до горизонтальной поверхности. В таких условиях фронт лавины продвигался на большее расстояние, чем можно ожидать при движении разрушенной горной породы в соответствии с законом сухого трения. Каменная лавина равномерно “растекалась” по поверхности так, что площадь и ширина лавины стали больше площади и ширины области обрушения соответственно в 1.2–2.5 и 1.1–1.3 раза. Только при взрыве в штольне А-10 размеры лавины оказались близкими к размерам области обрушения на склоне, что связано с вогнутой формой области обрушения на склоне, и расширения потока разрушенной породы не произошло. Чем больше объем обрушения, тем дальше распространялся фронт лавины и равномернее “растекание” породы. Лавины небольшого объема (менее 10^6 м^3), пройдя беспрепятственно расстояние 500–900 м, заканчивали свое движение на поверхности с углом наклона $7 - 15^\circ$. Более крупные лавины с объемами свыше 10^6 м^3 проходили расстояние 1–2 км и останавливались на горизонтальных участках местности. При увеличении масштабов обрушения движение разрушенной массы горной породы приобретает новые черты, похожие на движение вязкой жидкости.

Указанные свойства каменных лавин иллюстрируют зависимости относительной дальности распространения фронта лавины (рис. 6а) и средней толщины отложений (рис. 6б) от объема лавины. Относительная дальность распространения возрастает от $L/H \approx 2$ для объемов $10^4 - 10^5 \text{ м}^3$ до $L/H \approx 3 - 5$ для объемов лавин $10^7 - 10^8 \text{ м}^3$. Именно в этой области объемов лавин происходят изменения в характере движения каменной массы и начинается прогрессирующее снижение коэффициента трения за счет либо развития деформационных процессов внутри движущейся массы разрушенной породы, либо взаимодействия отдельных фрагментов разрушенной породы, снижая сцепление между ними и нагрузку на подстилающую поверхность. Подобный эффект качественного изменения в характере движения каменной лавины проявляется не только в дальности распространения, но и в стабилизации толщины лавинных отложений при увеличении объема свыше $10^7 - 10^8 \text{ м}^3$ (рис. 6б). Средняя толщина лавины в диапазоне объемов от $10^4 - 10^5 \text{ м}^3$ постепенно растет по мере увеличения ее объема, но уже в диапазоне

объемов $10^7 - 10^8 \text{ м}^3$ рост толщины прекращается и стабилизируется на уровне 20–25 м. Такая стабилизация толщины в отложениях лавины совместно с повышенной дальностью ее распространения при увеличении масштаба обвально-оползневого процесса носит название масштабного эффекта. Его необходимо учитывать при прогнозе лавинообразования.

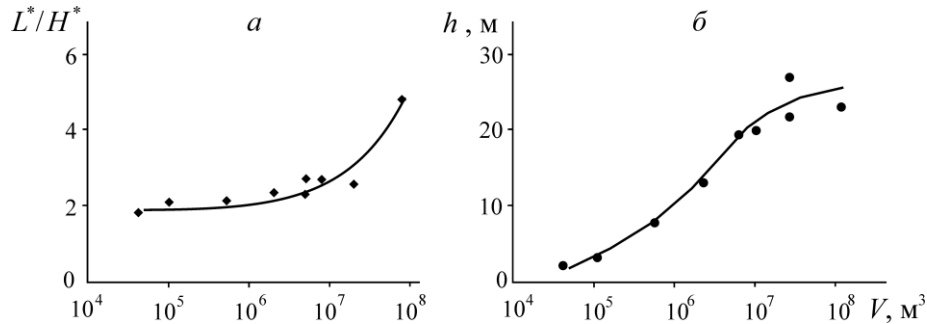


Рис. 6. Зависимость дальности распространения фронта каменных лавин (а) и толщины лавинных отложений (б) от объема лавин, образовавшихся при штольневых взрывах

К анализу особенностей движения более крупных объемов обрушения привлечены известные данные о ряде наиболее крупных каменных лавин, возникавших в природных условиях под действием землетрясений или техногенной деятельности (табл. 3) [2–4].

ТАБЛИЦА 3. Крупные каменные лавины в природных условиях под действием землетрясений или техногенной деятельности

Событие	Страна	$V, \text{ м}^3$	$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	L/H
Эльм	Швейцария	10^7	1700	550	3.1
Мадисон	США	$2.80 \cdot 10^7$	1600	400	4.0
Франк	Канада	$3.70 \cdot 10^7$	3200	920	3.5
Голдау	Швейцария	$3.90 \cdot 10^7$	1670	560	3.0
Джангей	Перу	$5.70 \cdot 10^7$	15200	3050	5.0
Айни	Таджикистан	10^8	3000	600	5.0
Хаит	Таджикистан	$5.00 \cdot 10^8$	6000	850	7.0
Флимс	Швейцария	$1.25 \cdot 10^{10}$	16200	1220	13.3
Сейдмарч	Иран	$2.10 \cdot 10^{10}$	14500	920	15.9

Из табл. 3 следует, что в природных условиях отмечены факты образования каменных лавин при обрушении крупных объемов горной породы 10 млрд м^3 (10^{10} м^3), дальность распространения которых в условиях беспрепятственного распространения в 13–16 раз превышала высоту расположения области обрушения. Некоторые каменные лавины естественного происхождения из табл. 3 имели объем $10^7 - 10^8 \text{ м}^3$, соответствующий размерам наиболее крупных лавин на Новоземельском полигоне.

К анализу привлечены также данные о каменных лавинах, возникавших при обрушении горных склонов крупных вулканов под воздействием мощных взрывоподобных извержений [5]. В табл. 4 приведены данные о размерах ряда таких каменных лавин, дальность распространения фронта которых на порядок превышала высоту обрушения.

ТАБЛИЦА 4. Размеры каменных лавин при извержении вулканов

Вулкан	Страна	$V, \text{ м}^3$	$L, \text{ км}$	$H, \text{ км}$	L/H
Шивелуч	Россия	$1.6 \cdot 10^9$	15	1.7	9
Безымянный	Россия	$8.0 \cdot 10^9$	15–18	2.0	7–9
Камень	Россия	10^9	23	2.5–2.8	8–9
Сент-Хеленс	США	$2.7 \cdot 10^9$	20	1.7–2.0	10–12

Интересные особенности обрушений отвалов горных пород с образованием каменных лавин зарегистрированы на Центральном руднике в Хибинах [6]. Отсыпка отвалов проводилась на склонах плато Расвумчорр на отметках 900–100 м. Крутизна склонов 30–50°. По мере накопления горной породы происходили внезапные обрушения этих отвалов, состоящих из смеси горной породы со льдом и снегом. Ряд таких обрушений с объемами 10^5 – 10^6 м³, высотой расположения отвалов H и дальностью распространения L , сформированных при обрушении каменно-ледяных лавин, приведены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Обрушения отвалов из смеси горной породы со льдом и снегом

Номер лавины	V , м ³	L , м	H , м	L/H
1	$2.0 \cdot 10^6$	1100	400	2.7
2	$7.0 \cdot 10^5$	400	250	1.6
4	$1.5 \cdot 10^6$	1000	400	2.5
5	$1.3 \cdot 10^6$	500	250	2.0
6	$2.4 \cdot 10^6$	1100	400	2.7
8	$2.6 \cdot 10^6$	900	370	2.4
9	$6.0 \cdot 10^6$	3000	650	4.6
15	$3.0 \cdot 10^5$	240	170	1.4
17	$4.0 \cdot 10^6$	1600	500	3.2

В некоторых случаях процессы обрушения горных склонов происходят в условиях узких каньонов или крутых изгибов горных рек, когда распространение обрушающейся массы породы ограничено противоположным склоном [7, 8]. В табл. 6 приведены некоторые примеры крупных обрушений в условиях ограниченного распространения. Кроме того, образовывались завальные плотины, длина которых вдоль каньона отмечена буквой L .

ТАБЛИЦА 6. Крупные обрушения в условиях ограниченного распространения

Событие	Страна	V , м ³	L , м	H , м	L/H
Вайонт	Италия	$2.5 \cdot 10^8$	400–600	200–400	1.5–2.5
Ирхот	Таджикистан	10^9	4000	1000	4.0
Усои	Таджикистан	$2.2 \cdot 10^9$	5000	1200–1500	3–4

На основании данных табл. 1–5 построена зависимость относительной дальности распространения фронта каменных лавин от объема обрушения (рис. 7). Даны зависимости трех типов: лавины I типа — скальные лавины, образовавшиеся при обрушениях горных склонов в условиях их беспрепятственного распространения, II типа — каменно-ледяные лавины, сформированные при обрушении отвалов, состоящих из смеси разрушенных горных пород, льда и снега, III типа — обрушения в каньоны горных рек при наличии противоположного склона. Сплошная кривая I типа проведена по группе точек, представляющих каменные лавины на Новоземельском полигоне (табл. 1, рис. 6а), и природные каменные лавины из табл. 3, имевшие возможность свободно распространяться после спуска со склона, а также каменные лавины, появившиеся при взрывоподобных мощных извержениях вулканов (табл. 4). В диапазоне небольших объемов обрушения (10^4 – 10^6 м³) относительная дальность распространения фронта лавины растет медленно и составляет $L/H \approx 2$. При возрастании объемов обрушения свыше 10^6 м³ наблюдается быстрый рост дальности распространения лавины, так что при объемах лавин свыше 10^7 м³

относительная дальность распространения фронта лавин $L/H \geq 3$, а при объемах 10^8 м^3 — $L/H \geq 5$. Зависимость относительной дальности распространения лавины от объема (кривая I типа) описывается эмпирической зависимостью:

$$\frac{L}{H} = 0.13V^{0.2}, \quad V \geq 10^6 \text{ м}^3, \quad (3)$$

которая представляет дальность распространения фронта лавины от точки проекции центра тяжести области обрушения породы, когда она располагалась на склоне. В области объемов обрушения свыше 10^8 м^3 положение точки отсчета (проекция центра тяжести или от основания склона) для оценки дальности распространения фронта лавины становится несущественным.

На рис. 7 выделяются более высокой подвижностью каменно-ледяные лавины (кривая II типа), образовавшиеся при обрушении отвалов в Хибинах. Присутствие льда и снега снижает сопротивление движению лавины, уменьшая силы трения внутри и при ее движении по замерзшей поверхности грунта, увеличивая тем самым дальность распространения при объемах обрушения $V \geq 10^5 - 10^6 \text{ м}^3$. Кривая II типа показывает роль состава обломков пород, участвующих в процессах лавинообразования.

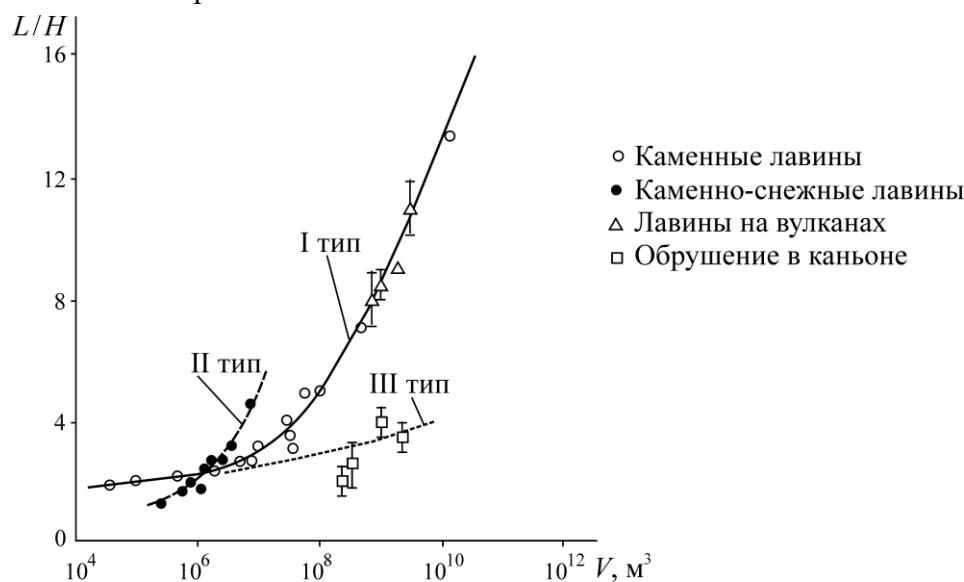


Рис. 7. Зависимость дальности распространения фронта каменных лавин от их объема: I тип — в условиях беспрепятственного распространения; II тип — каменно-ледяные лавины; III тип — обрушение в каньон, длина лавины вдоль каньона

От кривой I типа отличаются данные крупных обрушений в тех случаях, когда горная порода со склона обрушается в узкий каньон (рис. 7). Тогда отсутствуют условия для неограниченного распространения оползающей массы породы по причине крутого противоположного склона или резкого изгиба каньона, которые препятствуют формированию нормальной лавины. В таких условиях обычно возникают естественные каменные завалы значительной высоты и плотной упаковки, создавая водоупорные плотины и завальные озера [7, 9]. Этот случай на рис. 7 представлен данными из табл. 7, и по ним проведена пунктирная кривая III типа. За дальность продвижения горной массы у таких завалов принята их протяженность вдоль каньона.

Полученные эмпирические зависимости (1)–(3) и кривые I–III типов обрушения на рис. 7 позволяют прогнозировать последствия обрушений горных склонов, определять условия образования каменных лавин и оценивать их размеры и дальность распространения в зависимости от объема обрушения, высоты распространения и рельефа местности. Особого внимания заслужи-

вают обрушения объемом свыше 10^6 – 10^7 м³, поскольку процесс их развития сопровождается своеобразным масштабным эффектом, приводящим к аномально высокой подвижности горной массы и соответствующему увеличению дальности ее распространения.

Начало изучения этого явления связано с именем геолога Альберта Хейма, который объяснил высокую подвижность оползня Эльм в Швейцарии за счет смазки подстилающей поверхности в виде насыщенной водой почвы [10]. В дальнейшем последовали многочисленные объяснения этого эффекта, начиная от теории воздушной подушки и флюидизации каменного потока за счет захваченного в начале движения воздуха или за счет водяного пара при испарении воды, содержащейся в теле лавины, до снижения трения в лавине из-за плавления породы и разложения известняка при нагревании [11–15]. Наиболее популярны среди исследователей теория механической флюидизации и механизм акустической флюидизации [16–20]. В [21] развита теория “самосмазки” в основании тела лавины, возникающей при высокой скорости движения разрушенной каменной массы. Предложен новый закон трения [22]. Эффект аномально низкого трения, обнаруженный при изучении динамических воздействий на горный массив, обсуждался в [23]. Этот эффект получил объяснение с позиций нелинейной геомеханики [24–26]. Несмотря на успехи в аналитическом подходе, лучший инструмент для решения задач движения обрушающейся массы большого объема и ее лавинообразного распространения — разработка компьютерных моделей.

ВЫВОДЫ

Описаны основные особенности обрушения горных склонов под воздействием крупномасштабных подземных взрывов. Сформулированы условия образования каменных лавин, в том числе дальнепробежных, во время обрушения склонов при динамических воздействиях на горный массив. Продемонстрирован эффект повышенной дальности распространения каменных лавин и “растекания” лавинных отложений при объемах обрушения свыше 10^6 – 10^8 м³. Отмечена обусловленность этого эффекта присутствием льда и снега в лавинных отложениях. Установлены критические условия возникновения крупномасштабных обрушений при динамических воздействиях с учетом крутизны склона и параметров волны сжатия. Получена зависимость дальности распространения каменных лавин от объема и высоты обрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шемякин Е. И. О подвижности больших оползней // ДАН. — 1993. — Т. 331. — № 6. — С. 742–744.
2. Солоненко В. П. Землетрясения и рельеф // Геоморфология. — 1973. — № 4. — С. 13–18.
3. Болт Б. А., Хорн У. Л., Макдональд Г. А., Скот Р. Ф. Геологические стихии. — М.: Мир, 1978. — 439 с.
4. Адушкин В. В. Об инициировании взрывом созидательных процессов в природе // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36. — № 6. — С. 21–30.
5. Апродов В. А. Вулканы. — М.: Мысль, 1982. — 367 с.
6. Краносельский Э. Б., Калабин Г. В. Отвалы на горных склонах. — Л.: Наука, 1975. — 150 с.
7. Агаханиянц О. Е. Сарез: озеро на Памире. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 112 с.
8. Мюллер Л. Оползень в долине Вайонт // Проблемы инженерной геологии. — М.: Мир, 1967. — С. 21–26.
9. Садовский М. А., Адушкин В. В. Плотины, созданные взрывом // Природа. — 1985. — № 11. — С. 3–13.
10. Heim A. Burgsturz und Mencheleben, English translation by N. Skemer, Bitech Publisher, Vancouver, 1932. — P. 196.

11. **Kent P. E.** The transport mechanism in catastrophic rock fall, *J. of Geol.*, 1966, Vol. 74. — P. 79–83.
12. **Krumdiech A.** On the mechanism of large landslides, *Proc. of 4th Int. Symp. on Landslides*, Toronto, 1984, Vol. 1. — P. 539–544.
13. **Pautre A. F.** L'effect d'echolle dans les acoulements de Falaise, *Proc. of 3rd Congr. of Int. Soc. for Rock Mech.*, 1974, Vol. 28. — P. 859–864.
14. **Habib P.** Production of gaseous pore pressure during rock slides, *Rock Mech.*, 1975, Vol. 7. — P. 193–197.
15. **Erismann T. H.** Mechanisms of large landslides, *Rock Mech.*, 1979, Vol. 12. — P. 15–46.
16. **Howard K. A.** Avalanche mode of motion: implication from lunar examples, *Science*, 1979, Vol. 180. — P. 1052–1055.
17. **Melosh H. J.** The physics of very large landslides, *Acta Mech.*, 1986, Vol. 64. — P. 89–99.
18. **Sheidegger A. E.** On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides, *Rock Mech.*, 1973, Vol. 5. — P. 213–236.
19. **Voight B.** *Introduction Rockslides and Avalanches*, Elsevier Sci. Publ., 1978, Vol. 1, No. 4. — P. 138–143.
20. **Melosh H. J.** Giant rock avalanches, *Nature*, 1990, Vol. 348. — P. 483–484.
21. **Campbell C. S.** Self-lubrication for long runout landslides, *J. Geol.*, 1989. — P. 653–665.
22. **Григорян С. С.** Новый закон трения и механизм крупномасштабных горных отвалов и оползней // *ДАН СССР*. — 1979. — Т. 224. — № 4. — С. 846–849.
23. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах // *ФТПРПИ*. — 1997. — № 1. — С. 3–16.
24. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 1. // *ФТПРПИ*. — 1999. — № 3. — С. 3–18.
25. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 2. // *ФТПРПИ*. — 2000. — № 4. — С. 3–21.
26. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосферах геосредах. Ч. IV. // *ФТПРПИ*. — 2016. — № 1. — С. 3–49.

*Поступила в редакцию 11/X 2019
После доработки 11/XI 2019
Принята к публикации 27/XI 2019*