

Изменение параметров лавинообразования в ближней зоне от места проведения взрыва

© 2013 г. Е.Г. Мокров¹, Н.В. Барашев²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

²ЗАО «Северо-Западная фосфорная компания», Кировский филиал, пос. Коашва Мурманской обл.

snowaval@yahoo.com

Статья принята к печати 20 февраля 2013 г.

Взрыв, параметры лавинообразования, плотность снега, прочность снега на сдвиг, снежные лавины.
Avalanche formation parameters, explosion, snow avalanche, snow density, snow strength.

Рассмотрены результаты экспериментов по исследованию пространственного изменения параметров лавинообразования в зависимости от массы взрывчатого вещества и его местоположения. Взрывы проводились в пяти местах: на поверхности земли; в снежной толще на высоте 0,6 м от поверхности земли; на поверхности снега; на высоте 1 и 2 м над поверхностью снега. Масса взрывчатого вещества составляла 0,5, 1, 2 и 4 кг. Место эксперимента – плато Суолауйв (600 м над ур. моря) в Хибинах в марте 2012 г. Исследования показали, что нарушение структуры снега, его плотности и прочности на сдвиг в местах взрывов происходит по всей глубине снежной толщи и зависит от структуры и плотности слоёв снега, а также от массы взрывчатого вещества и места проведения взрыва.

Цель настоящего исследования – изучить изменения основных параметров лавинообразования в ближней зоне (десятки метров) от места взрыва в зависимости от массы используемого взрывчатого вещества (ВВ) и эпицентра взрыва. Мы рассмотрим результаты анализа экспериментальных данных, полученных на плато Суолауйв (600 м над ур. моря) в Хибинах в марте 2012 г. Пространственное распределение параметров лавинообразования исследовалось в зависимости от массы ВВ и глубины размещения заряда в снежной толще. Выполнены также взрывы на поверхности снега и на различной высоте от поверхности.

Исследования и результаты

В снежном покрове наблюдаются три вида воздействия взрыва на снег: 1) колебания подстилающей поверхности (сейсмический эффект); 2) прямая передача импульса в снег; 3) акустическое воздействие (ударная воздушная волна). Все три эффекта вместе отмечаются только во время профилактического спуска лавин путём подрыва ВВ в снежном покрове в зоне зарождения лавины. Сравнительная простота этого метода делает взрыв незаменимым в условиях небольшого лавиноопасного участка. Его можно использовать также при защите от лавин отдельных объектов, когда содержание специального миномётного или орудийного расчёта экономически невыгодно. В ряде случаев, когда невозможно или неэффективно использовать миномёты, артиллерию или

взрывы зарядов ВВ в верхней части склона, взрывы проводят в нижней части этого или противоположного склона [3, 5]. При этом учитывается отражающее действие отдельных скальных выступов и склонов долины.

В настоящее время при использовании обстрелов и взрывных работ сформировались два направления: 1) проверка степени устойчивости снежного покрова на склоне; 2) обрушение неустойчивых масс снега. В первом случае взрывные работы и обстрелы носят профилактический характер и могут привязываться к конкретной снежно-метеорологической обстановке. В случае неустойчивого состояния снега на склоне достаточно небольшого добавочного воздействия, чтобы вызвать сход лавины. При этом сход лавин может быть обусловлен рядом причин: разрушением связей в снежной толще и уменьшением удерживающих сил; воздействием сейсмических вибраций, нарушающих связи снежной толщи с подстилающей поверхностью (рис. 1); действием избыточного давления от ударной воздушной волны при взрыве в воздухе на снежную толщу, находящуюся на склоне.

Если же сход лавины при взрыве не происходит, то результат воздействия также будет в определённой степени положительным – устойчивое равновесие снега на склоне устанавливается путём ликвидации или перераспределения напряжений в снежной толще в области воздействия взрыва [1]. Ряд исследований проведён для определения изме-

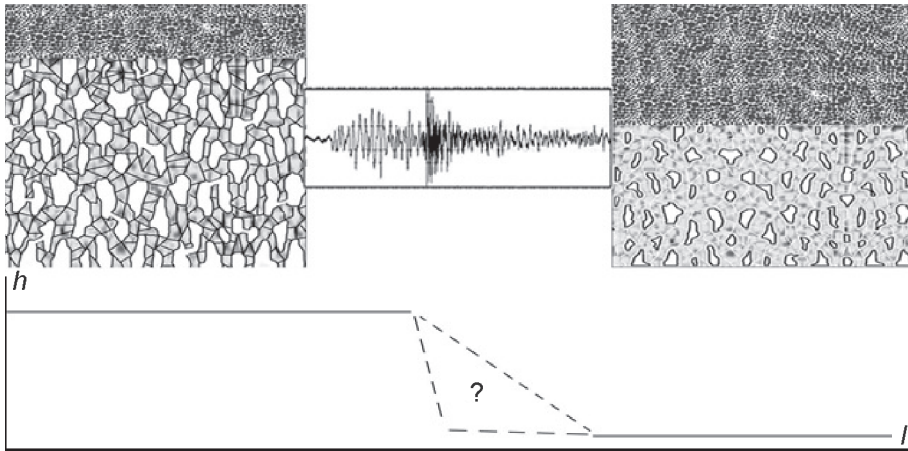


Рис. 1. Предполагаемая схема уплотнения ослабленного слоя и уменьшения сопротивления на сдвиг вследствие снижения контактов между снежными кристаллами под воздействием взрыва. Внизу – график предполагаемого изменения прочности снега на сдвиг после воздействия на него взрыва

Fig. 1. Expected scheme of sliding horizon compaction and the shear resistance reduction due to reduced contact between the snow crystals depending on the explosion influence. Down – diagram of assumed snow shearing strength changes after explosion

нений структуры и плотности снега в районах взрыва мин [1, 6]. Установлено, что влияние взрыва на плотность снежного покрова распространяется не только на область нарушенной структуры, но и за её пределы. Структура снега в местах взрывов изменяется во времени в сторону цементации беспорядочно расположенными ледяными корками (ледяным каркасом), что позволило авторам сделать вывод о закрепляющем эффекте миномётных обстрелов зон зарождения лавин. Ударная воздушная волна от взрыва создаёт дополнительную нагрузку на снежную толщу в зоне зарождения лавины. Для усиления воздействия воздушной волны используют отражающее действие скальных выступов и склонов долины [2, 3].

Процессы, происходящие в снеге при действии взрыва (смещение, выброс, изменение напряжённого состояния, структурных связей и т.д.), определяются закономерностями распространения взрывных волн, характером их угасания с расстоянием от эпицентра взрыва, а также параметрами снежного покрова. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что общая качественная картина действия взрыва в снегу аналогична действию взрыва в мягких грунтах [4]. При измерении параметров взрывных полостей (радиус и глубина воронки, зона трещин и т.д.) для зарядов, масса которых менялась на порядок, установлено, что структуры полостей подобны и их размеры пропорциональны линейной массе заряда. Как и в грунтах, передний фронт взрывной волны на близких расстояниях представляет собой ударную волну; на далёких расстояниях разрыв на фронте волны исчезает.

Чтобы понять действие взрыва на параметры снежной толщи, рассмотрим два типа взрыва: 1) в воздухе над снежной толщей; 2) внутри снеж-

ного покрова. Взрыв заряда, расположенного на поверхности снега, по своему воздействию можно отнести как к взрыву в снежной толще, который также вызывает образование ударной воздушной волны. На фронте ударной волны скачкообразно изменяются плотность, давление и температура. По мере распространения ударной волны её интенсивность уменьшается, с одной стороны, за счёт увеличения площади волнового фронта, с другой – в результате процесса диссипации и отдачи энергии снежному покрову. В итоге она трансформируется в акустическую волну – упругую волну меньшей амплитуды, которая состоит из фазы избыточного давления и последующей фазы пониженного давления. Влияние взрывных волн на снежную толщу в значительной степени зависит от рельефа местности и строения снежного покрова.

Эксперимент проводился 9 апреля 2012 г. в северо-восточной части плато Суолауйв (510 м) в Хибинах на снежном поле юго-восточной экспозиции с углом наклона 10° и площадью 30 тыс. м^2 в непосредственной близости от зон зарождения лавин при температуре воздуха $-3,2^\circ\text{C}$. До начала эксперимента в пяти точках снежной толщи (четыре – по контуру и одна – в центре) было проведено шурфование. В среднем высота шурфа составляла 120 см (рис. 2). Плотность снега измерялась при помощи взвешивания на электронных весах бюксы со снегом определённого объёма. Прочность снега на сдвиг устанавливалась с использованием стандартного динамометра и рамки 10×10 см. Проведено 17 взрывов ВВ массой 0,5; 1; 2 и 4 кг: на поверхности земли, в снегу на высоте 0,6 м от поверхности земли, на поверхности снега и на высотах 1 и 2 м от поверхности снега. Взрывчатое вещество – аммонит 6ЖВ патроны (200 г), тротиловый эквивалент – 1:1.

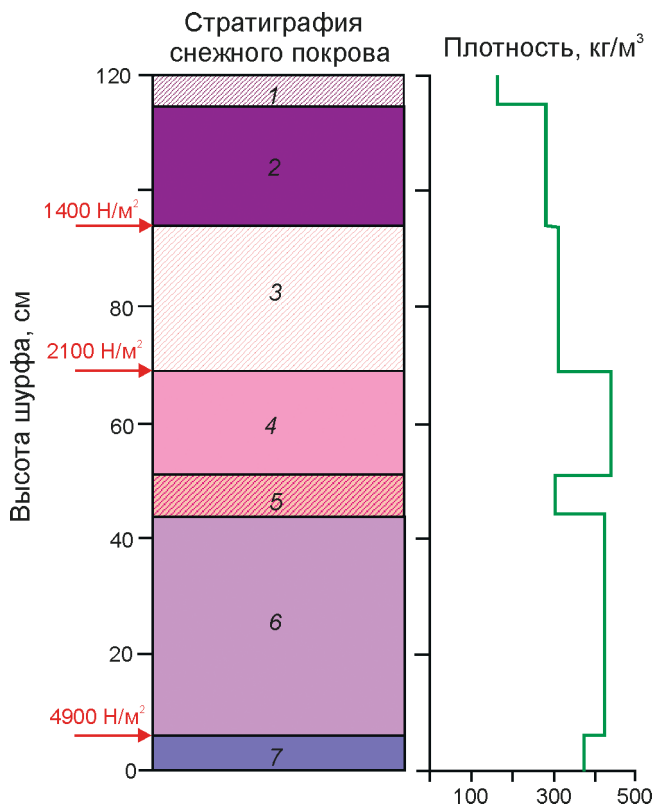


Рис. 2. Осреднённые данные шурфования снежной толщи на плато Сулайв (9 апреля 2012 г.) до начала экспериментов:

1 – свежий метелевый снег; 2 – уплотнённый метелевый снег; 3–6 – среднекристаллическая глубинная изморозь; 7 – крупнокристаллическая глубинная изморозь

Fig. 2. Averaged data of snow cover structure on the Suolayv plateau (09.04.2012) before the experiments:

1 – newly-deposited snow; 2 – deposited packed snow; 3–6 – medium crystal depth hoar; 7 – large crystal depth hoar

Шурфование выполнялось до взрыва и сразу после него. Шурфы в снежной толще после взрывов делались таких размеров, чтобы можно было вскрыть области с нарушенной и ненарушенной структурами. При этом исследовались: стратиграфический разрез снежной толщи как в пределах видимой воронки, так и вне её; плотность слоёв снега; прочность снега на сдвиг в слоях.

Взрывы существенно изменяют структуру и текстуру снега, его прочностные характеристики и поле напряжений. Изменения в структуре и текстуре особенно велики в зонах пластических деформаций и трещин. Прохождение волны деформаций в снежной толще изменяет плотность снега на фронте волны. В зонах пластических деформаций и трещин эти изменения необратимы и поэтому могут быть зарегистрированы после взрыва. В результате прохождения взрывной волны нарушаются кристаллический скелет и контакты между

частицами. В дальнейшем контакты восстанавливаются, но число их становится другим в связи с полным нарушением текстуры и структуры снега в месте взрыва, что способствует трансформации прочностных характеристик снега. В разрезе воронки от взрыва хорошо различаются четыре зоны: собственно воронка; зона полного разрушения и дробления; зона раздавливания; зона трещин и сдвигов. Диаметр воронки соответствует известной зависимости (рис. 3) $d_b = k^3 G^{0,5}$, где k – коэффициент, м/кг^{1/3}; G – масса заряда, кг.

Сильнее всего на прочностные характеристики снежной толщи влияют взрывы на поверхности снега. Так, при взрыве с массой ВВ 0,5 кг на поверхности снега плотность *верхнего свежего метелевого снега* увеличилась со 160 до 260 кг/м³ на расстоянии 0,5 м от оси воронки (диаметр воронки 0,8 м); при массе ВВ 4 кг плотность снега в 1,5 м от оси воронки (диаметр воронки 2,1 м) составила 400 кг/м³ (рис. 4, I). Ненарушенная структура верхнего свежего метелевого слоя наблюдалась с расстояния 2,5 м при взрыве 0,5 кг ВВ и с 6 м – при взрыве 4 кг ВВ.

Плотность *уплотнённого метелевого снега* возросла с 280 до 350 кг/м³ на расстоянии 0,5 м от оси воронки при взрыве с массой ВВ 0,5 кг и составила 420 кг/м³ на расстоянии 1,5 м от оси воронки (диаметр воронки 2,1 м) при массе ВВ 4 кг. При этом прочность снега на сдвиг при взрыве с массой ВВ 0,5 кг на расстоянии 0,5 м от оси воронки уменьшилась с 1400 до 100 Н/м², а при взрыве 4 кг ВВ на расстоянии 1,5 м от оси воронки – до 100 Н/м²

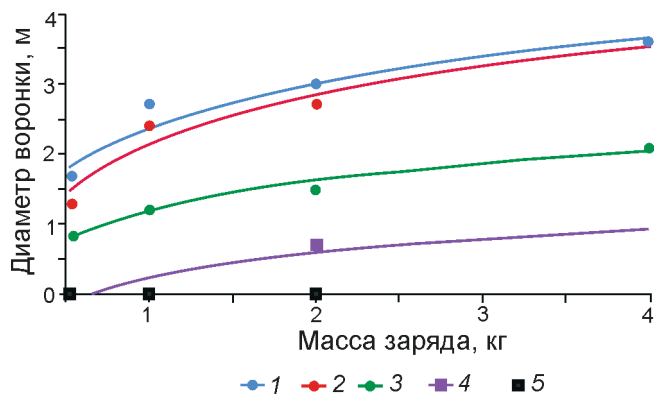


Рис. 3. Зависимость диаметра воронки от массы заряда:

1 – поверхность земли; 2 – 60 см от земли; 3 – поверхность снега; 4 – высота 1 м; 5 – высота 2 м

Fig. 3. Crater diameter dependence on charge mass of explosive material mass:

1 – on the ground surface; 2 – in the snow at a height of 0.6 m above ground; 3 – on the snow surface; 4 – at a height of 1 m above snow; 5 – at the height of 2 m above snow

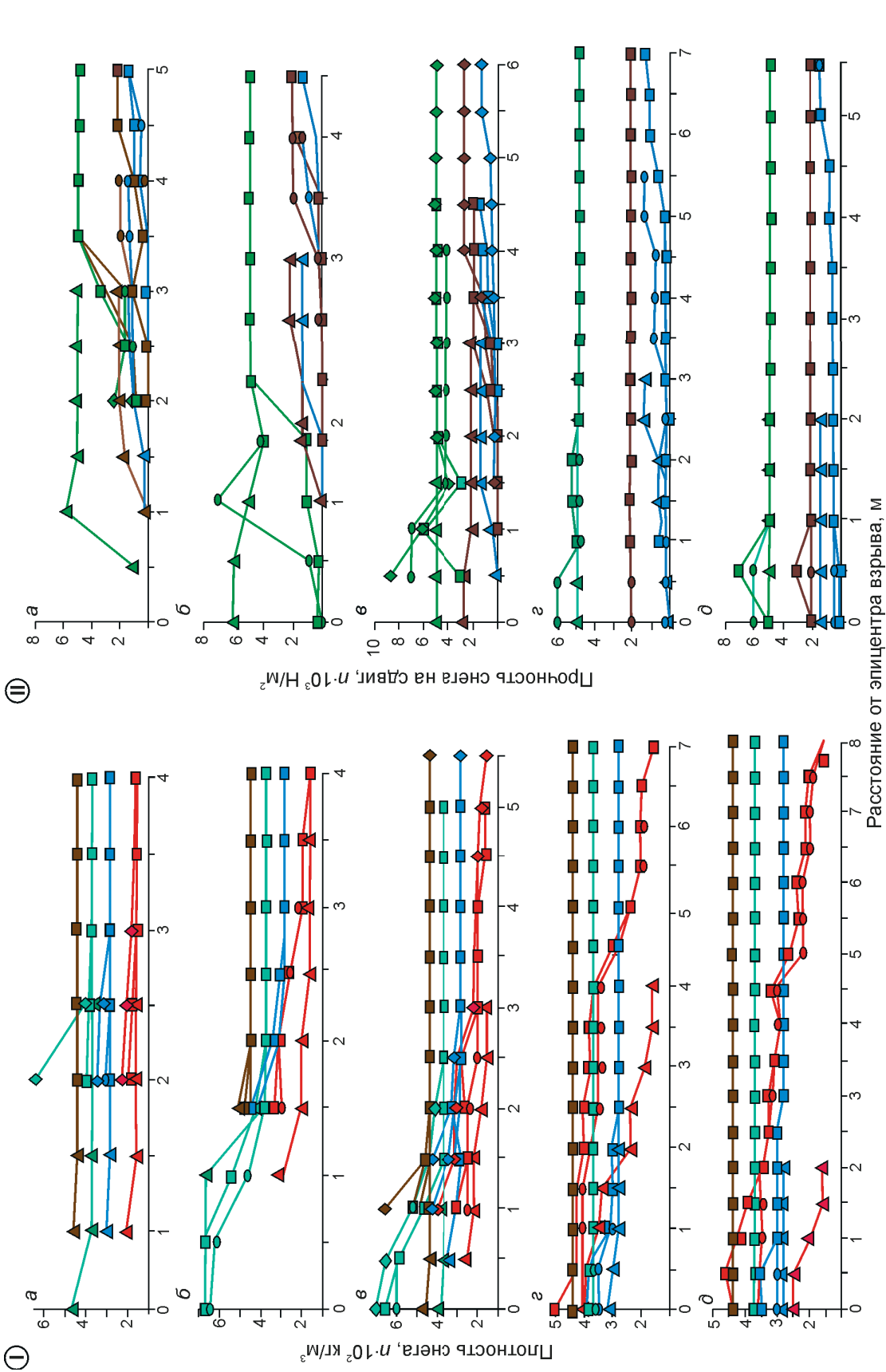


Рис. 4. Изменения плотности снега (I) и прочности снега на сдвиг (II) по слоям в зависимости от массы взрыва и расположения эпицентра взрыва: *a* – в снегу на поверхности земли; *б* – в снегу на высоте 0,6 м от поверхности земли; *в* – на высоте 1 м от поверхности снега; *г* – на высоте 2 м от поверхности снега (красный – свежий метелевый снег, синий – уплотнённый метелевый снег, коричневый – среднекристаллическая глубинная изморозь, зелёный – крупнокристаллическая глубинная изморозь). Маркеры массы взрывающих веществ: треугольник – 0,5 кг, квадрат – 1 кг, круг – 2 кг, ромб – 4 кг

Fig. 4. Snow density changes (I) and snow shearing strength changes (II) in layers depending on the explosive material mass and the place of explosion: *a* – in the snow on the ground surface; *б* – in the snow at a height of 0.6 m above ground; *в* – on the snow surface; *г* – at a height of 1 m above snow; *д* – at a height of 2 m above snow (red – newly deposited snow; blue – deposited packed snow; brown – medium crystal depth hoar; green – large crystal depth hoar). Markers: triangle – 0.5 kg, square – 1 kg, circle – 2 kg, rhomb – 4 kg

(см. рис. 4, II). Ненарушенная структура уплотнённого метелевого слоя наблюдалось с расстояния 2,5 м при взрыве 0,5 кг ВВ и с 6 м – при взрыве 4 кг ВВ.

Плотность *среднекристаллической* *глубинной* *изморози* в середине снежной толщи (см. рис. 2), в слое, где измерялась прочность снега на сдвиг, увеличилась с 440 до 460 кг/м³ на оси воронки (под взрывом) при взрыве ВВ с массой 0,5 кг, а при взрыве 4 кг ВВ на расстоянии 1 м от оси воронки (диаметр воронки 2,1 м) плотность снега составляла 650 кг/м³. При этом прочность снега на сдвиг при взрыве 0,5 кг ВВ на оси воронки возросла с 2100 до 2700 Н/м², а при взрыве 4 кг ВВ на расстоянии 1,5 м от оси воронки уменьшилась до 300 Н/м². Ненарушенная структура слоя *среднекристаллической* *глубинной* *изморози* наблюдалось с расстояния 0,5 м при взрыве 0,5 кг ВВ и с 2 м – при взрыве 4 кг ВВ.

Плотность слоя *крупнокристаллической* *глубинной* *изморози*, лежащей на почве (см. рис. 2), увеличилась с 370 до 390 кг/м³ на оси воронки (под взрывом) при взрыве ВВ с массой 0,5 кг; при взрыве ВВ с массой 4 кг на оси воронки (диаметр воронки 2,1 м) плотность снега составляла 690 кг/м³. При этом прочность снега на сдвиг в случае взрыва с массой 0,5 кг на оси воронки увеличилась с 4900 до 5000 Н/м², а при взрыве 4 кг ВВ на расстоянии 0,5 м от оси воронки – до 8500 Н/м². Ненарушенная структура слоя *крупнокристаллической* *глубинной* *изморози* наблюдалась с расстояния 0,5 м от оси воронки при взрыве 0,5 кг ВВ и с 2,5 м – при взрыве 4 кг ВВ.

Выводы

Изменение основных параметров лавинообразования – плотности снега и прочности снега на сдвиг в лавинообразующих слоях – зависит прежде всего от массы взрывчатого вещества и положения эпицентра взрыва. Избыточное давление от ударной воздушной волны и непосредственное давление в снежной толще, создаваемое при взрыве на поверхности снега, наиболее эффективно при воздействии на снежную толщу на склоне с целью формирования лавины. Види-

мое нарушение структуры снега, его плотности и прочности на сдвиг в местах взрывов происходит по всей глубине снежной толщи и зависит от структуры и плотности слоёв, а также от массы взрывчатого вещества и места проведения взрыва. Плотность снега около центра взрыва достигает более 700 кг/м³, тогда как в ненарушенной снежной толще она равна 350–400 кг/м³. Изменения прочности снега на сдвиг прослеживается на расстоянии 6 м от места проведения взрыва.

Литература

1. Аккуратов В.Н. Устранение снеголавинной опасности путем обстрела лавиноопасных склонов // Снег и лавины Хибин. М.: изд. МГУ, 1967. С. 258–268.
2. Максимов Н.В., Красносельский Э.Б. Опыт искусственного устранения лавинной опасности в высокогорных районах Тянь-Шаня // Тр. ГГО. 1964. Вып. 160. С. 148–156.
3. Максимов Н.В., Щербаков М.П., Вернер Е.Ф. Лавины и борьба с ними на территории Киргизии. Фрунзе: Кыргызстан, 1965. 120 с.
4. Матвиенко В.С., Гербер А.Р. Взрыв в снежном покрове // Вопросы проектирования и строительства железных дорог в Сибири. Новосибирск: изд. НИИЖТ, 1971. С. 75–85.
5. Моргунов Ю.Л. Использование особенностей распространения воздушных волн, возникающих при взрывах, для обрушения лавин // Тр. СНИИГМИ. 1980. Вып. 78. С. 41–47.
6. Пермяков Р.С. Особенности разработки нагорных месторождений Заполярья. Л.: Наука, 1969. 234 с.

Summary

Spatial variation of avalanche formation parameters in relation with the explosive mass and its location has been experimentally studied. The charges were installed in five locations: on the ground, in the snow layer at a height of 0.6 m above the ground, on the snow surface, at a height of 1 m and 2 m above the snow surface. Mass of explosive was 0.5, 1, 2 and 4 kg. The experiments were in March 2012 on the Suoluayv plateau (600 m a.s.l.) in the Khibiny Mountains. Studies have shown that at explosion sites the disturbance of snow structure, its density and shear strength occurs throughout the whole depth of snow cover, depending on the structure and density of snow layers as well as the explosive mass and its location.