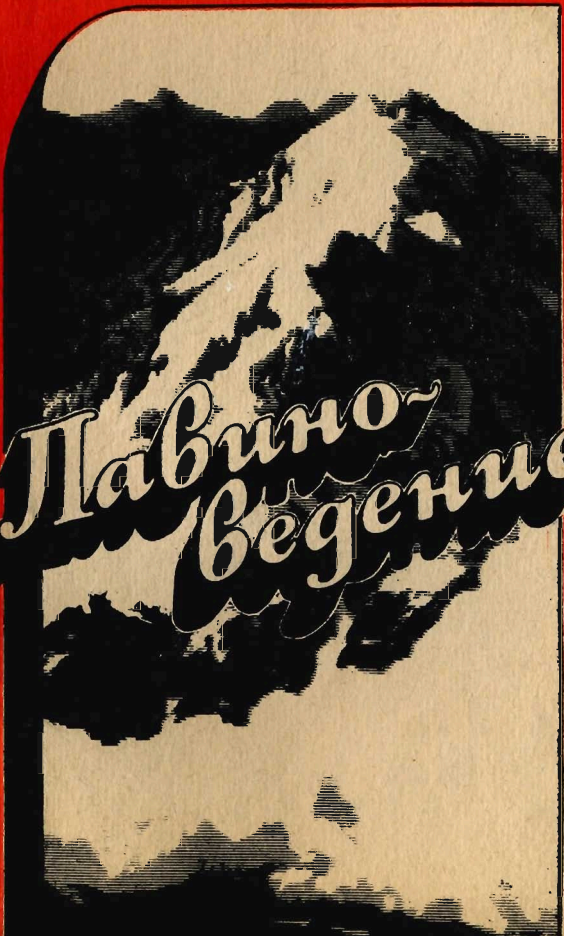


К. Ф. ВОЙТКОВСКИЙ



Павино- ведение

К. Ф. ВОЙТКОВСКИЙ

Лавино- ведение

Издательство
Московского
университета 1989

ББК 26.82
В65
УДК 551.578.48

Рецензенты:

доктор географических наук *Н. А. Граве*,
кандидат географических наук *Н. А. Володичева*

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Московского университета

Войтковский К. Ф.

В65 Лавиноведение: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГУ,
1989. — 158 с.: ил.
ISBN 5—211—00447—7.

В книге описаны особенности формирования снежного покрова в горах, физические и механические свойства снега. Рассмотрены показатели устойчивости снежного покрова, причины возникновения лавин и закономерности их движения. Приведены сведения о лавинной опасности на территории СССР. Изложены способы наблюдений за снежным покровом и лавинами и прогнозирования лавинной опасности. Дана характеристика профилактических и инженерных мероприятий для защиты от лавин. Изложены правила ведения работ в лавиноопасных районах и основы проектирования противолавинных сооружений.

Для студентов-географов, специализирующихся в области гляциологии, а также для широкого круга специалистов, выполняющих работы в лавиноопасных районах.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Снежный покров на склонах гор в определенных условиях теряет устойчивость и под действием сил тяжести начинает двигаться вниз по склону. Пришедшая в движение масса снега может захватывать на своем пути и вовлекать в движение новые его порции и низвергаться до более пологих участков склона или до противоположного склона долины. Такая движущаяся снежная масса называется лавиной.

Снежные лавины — широко распространенное природное явление, которое существенно усложняет хозяйственное освоение горных районов и представляет угрозу для жизни людей. Это определило необходимость детального изучения закономерностей нарушения устойчивости снежных масс на горных склонах, зарождения и движения лавин, разработки способов прогнозирования лавинной опасности и совершенствования способов защиты от лавин, что в свою очередь привело к формированию нового научного направления — лавиноведения.

Лавиноведение сформировалось на базе комплексного использования научных основ и методов, разработанных в ряде научных направлений, и прежде всего в гляциологии, физической географии, метеорологии, физике, механике и строительстве инженерных сооружений. Первый курс лекций по лавиноведению был составлен и прочитан для студентов географического факультета МГУ профессором Г. К. Тушинским в 1969 г. Курс включен в учебные программы подготовки специалистов по криолитологии и гляциологии и постоянно обновляется с учетом результатов новейших исследований процессов лавинообразования и совершенствования способов защиты от лавин.

В данном пособии изложены основные вопросы лавиноведения, необходимые для овладения приемами оценки лавинной опасности в различных физико-географических условиях и осуществления комплекса мероприятий по защите людей и народнохозяйственных объектов от разрушительного действия лавин.

В 1805040300(4309000000)—030 119—89
077(02)—89

ББК 26.82

ISBN 5—211—00447—7

© Издательство Московского университета, 1989

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЛАВИНОВЕДЕНИЯ

1.1. ЛАВИННЫЕ КАТАСТРОФЫ

В январе 1976 г. во время интенсивного снегопада в Приэльбрусье с северного склона горы Чегет сошли мощные лавины, перекрывшие автомобильную дорогу десятиметровым слоем снега. Из лавинных завалов торчали стволы столетних сосен и искореженные мачты линии электропередачи. Многочисленные туристы вынуждены были томиться в гостиницах, где им было предложено оставаться до ликвидации лавинной опасности. Группа туристов, нарушившая этот запрет, была застигнута лавиной. Обильные снегопады, продолжавшиеся с небольшими перерывами более 10 дней, вызвали мощные лавины в ряде горных районов Кавказа. Повышенная снежность в 1976 г. наблюдалась и в других горных системах, газеты сообщали о лавинных завалах в Татрах и гибели людей под лавинами в Альпах. Степень лавинной опасности определяется объемами накопившегося на лавиноопасных склонах снега и его состоянием. Опасность резко увеличивается во время продолжительных интенсивных снегопадов и метелей. Сравнивая зимы по снеговинному режиму, можно установить своеобразное чередование зим малой, средней и большой лавинной активности. Повышенная лавинная активность и массовый сход лавин на Кавказе наблюдались в 1932, 1956, 1958, 1973 и 1984 гг., а в 1976 г. было зарегистрировано рекордное количество крупных лавин. В горах Средней Азии наиболее крупные лавины сходили в 1969, 1973, 1976 и 1984 гг.

Особо опасная лавинная ситуация сложилась в зиму 1986/87 г. в горах Средней Азии, Кавказа, Закарпатья и даже Крыма. На южных склонах Большого Кавказского хребта толщина снежного покрова в ряде мест превысила 5 м и количество лавин превзошло своеобразный рекорд 1976 г. Мощные лавины сходили даже со склонов, где ранее они не наблюдались. В Киргизии лавинная ситуация была усугублена землетрясением, которое увеличило количество сошедших лавин. Сотрудники учреждений Гидрометслужбы заблаговременно выдавали предупреждения о лавинной опасности. Это позволило провести ряд профилактических мероприятий по защите от лавин. Тем не менее процессы лавинообразования настолько превысили ожидаемые масштабы, что не обошлось без повреждения линий связи и электропередачи, разрушения жилых домов и построек, гибели животных. Горные дороги были блокированы снежными завалами. К сожалению, были и человеческие жертвы.

В настоящее время уже во многих странах проводятся систематические наблюдения за снежными лавинами и ведется учет причиняемого ими ущерба. Наиболее древняя летопись лавинных катастроф имеется для Альп. Первые письменные сведения о лавинах встречаются в сочинениях римского историка Полибия при описании перехода войск Ганнибала через Альпы в ноябре 218 г. до н. э. Согласно этим сведениям, в горы вошло 80 тыс. пехотинцев и 12 тыс. всадников, а через 33 дня в долину Северной Италии с гор спустилось только 20 тыс. пехотинцев и 6 тыс. всадников, остальные погибли, и большая часть от снежных лавин, метелей и холода.

Достаточно подробные сведения о снежных лавинах и гибели людей от лавин в Альпах можно найти в летописях. Обзор этих сведений изложен В. Фляйгом (1960), где имеются описания многих катастроф. Так, после обильных снегопадов в начале февраля 1689 г. сошли мощные лавины, в результате которых только в 7 селениях в долине Монтафоне погибло 120 человек и было разрушено 119 домов. Многочисленные трагические случаи произошли в Альпах во время первой мировой войны. За три года военных действий (1915—1918 гг.) между Австро-Венгрией и Италией обе воюющие стороны потеряли в лавинах более 40 тыс. человек.

Много лавинных катастроф произошло в Альпах в январе 1951 г. В завершение бушевавших в течение недели снежных бурь во многих районах сошли лавины, которые по объему и дальности выброса намного превзошли все ранее зафиксированные. Были разрушены дома, построенные за сто и более лет до этого в местах, считавшихся лавинобезопасными. Только в Швейцарских Альпах за зиму 1950/51 г. была зафиксирована 1301 причинившая ущерб лавина, погибло 98 человек, было ранено 62 человека, уничтожено около 200 га леса и разрушено более 1000 домов и хозяйственных построек. На территории Австрии за ту зиму в лавинах погибло 135 человек и 188 ранено, разрушены десятки жилых и промышленных зданий, мостов, подвесных канатных дорог и сотни других построек. Всего в Альпах в течение января—февраля 1951 г. погибло около 300 человек.

Прошло лишь три года после лавинных катастроф 1951 г., и снова начался обильный продолжительный снегопад, перемежаемый ураганными ветрами. И снова огромная территория Альп была охвачена лавинами, многие селения были отрезаны ими, и снова были человеческие жертвы и разрушения.

Краткий обзор альпийских трагедий показывает, что снежные лавины угрожают людям в горах каждую зиму. Однако на общем фоне лавинной опасности выделяются кратковременные периоды, когда сходят особо мощные лавины, которые достигают мест, считавшихся безопасными. Такая ситуация характерна не только для Альп, она справедлива для всех горных территорий, где достаточно снега для образования лавин.

Жители Кавказа знакомы с лавинной опасностью с древних времен. В высокогорных районах встречаются развалины горных селений, которые были покинуты в результате участвовавших многоснежных зим и повышения лавинной опасности в XIII—XIV вв. Большое количество лавинных катастроф зафиксировано во время строительства и эксплуатации дорог через перевалы Главного Кавказского хребта. На Военно-Грузинской дороге некоторые лавинные очаги получили собственные имена в память о лавинных катастрофах. Например, известна лавина «Персидская», которая была так названа после гибели там персидской делегации, ездившей в Россию после убийства русского посла в Персии А. С. Грибоедова. В том же районе есть противополавиная галерея «Солдатская», там под лавиной погибла группа солдат.

Лавинными катастрофами называют случаи схода лавин, приведшие к материальному ущербу и гибели людей в тех местах, которые до этого считались лавинобезопасными. По мере освоения гор количество лавинных катастроф обычно увеличивается, и иногда создается впечатление, что лавинная опасность в последнее время возрастает. В некоторых случаях она действительно увеличивается из-за неправильной хозяйственной деятельности, например при вырубке леса на склонах. Однако в большинстве случаев мы имеем дело с кажущимся нарастанием лавинной опасности. Люди без особой надобности не посещают зимой лавиноопасные районы и не фиксируют сход лавин, а в летнее время следы лавин не всегда видны. Обманчивое впечатление часто возникает и в первые годы освоения горного района, если они не совпадают с годами повышенной лавинной опасности. Лавины в некоторых местах сходят с перерывом в десять и более лет, и порой бывает даже трудно предположить, что данная живописная поляна в лесу или лесной участок могут стать ареной разгула снежной стихии. И лишь спустя много лет после начала освоения горного района наступает лавинная катастрофа, когда разрушаются уже возведенные постройки, сооружения и линии электропередач. Причины катастрофы легче объяснить повышением лавинной опасности, чем сознаться в недостаточной компетентности в вопросах защиты от лавин.

В начале 30-х годов началось освоение апатитовых руд в Хибинах. Строились рудники, дороги, линии связи, поселки, возник г. Кировск. Строители в те годы мало знали о коварных свойствах лавин и не имели опыта защиты от них. 5 декабря 1935 г. после снегопада и сильной метели сошли лавины, которые разрушили несколько жилых домов, снесли линии электропередачи и связи, сбросили с путей паровоз, засыпали дорогу. Погибли десятки людей.

Известны лавинные катастрофы во многих странах — в США и Канаде, Перу и Чили, Исландии, Швеции и Норвегии, Индии и Японии и в других странах. Однако и приведенных

сведений достаточно для характеристики лавин как опасного природного явления, с которым необходимо считаться при освоении горных территорий.

1.2. ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАВИН

Началом научных исследований лавин считаются наблюдения И. Г. Коля, который в 1851 г. опубликовал в Германии книгу «Альпийские путешествия». В ней впервые были изложены результаты разносторонних наблюдений за снежным покровом и лавинами и заложены основы лавиноведения.

В 1855 г. русский инженер Б. Н. Статковский впервые разработал способ картографического изображения лавинной опасности. На составленной им карте Главного Кавказского хребта в районе Крестового перевала были указаны места схода лавин и отображена сравнительная лавинная опасность отдельных участков Военно-Грузинской дороги. В последующие годы Б. Н. Статковский исследовал причины снежных завалов и провел ряд обследований лавиноопасных районов в связи с проблемой обеспечения зимней эксплуатации горных дорог на Кавказе.

В 1868 г. в Швейцарских Альпах под руководством лесного инспектора И. Коаца была проведена первая инженерная застройка зон зарождения лавин снегоудерживающими стенами и рядами столбов. И. Коац составил лавинные карты некоторых горных районов Альп. В 1881 г. он опубликовал книгу «Лавины Швейцарских Альп».

В 1871 г. в Швейцарии был принят «Федеральный закон о выделении федеральных средств на строительство защитных сооружений вблизи природных водных источников и на устройство лесонасаждений в высокогорных местностях». Этот закон способствовал расширению наблюдений за снежным покровом и лавинами, разработке способов защиты от лавин и строительству противополавиновых сооружений.

За период с 1876 по 1938 г. в Швейцарии было построено около 1000 км снегоудерживающих сооружений, главным образом массивных стен из камня и высоких стенок в сочетании с террасами. Во всех местах, где это было возможно, одновременно со строительством снегоудерживающих сооружений проводились лесопосадки. Широкое распространение получили также противополавиновые галереи на дорогах.

Первый этап изучения лавин характеризовался отрывочными наблюдениями, частными обобщениями результатов наблюдений и опробованием различных практических способов защиты от лавин.

Начиная с 30-х годов XX в. проводятся планомерные исследования лавин, изучаются закономерности их зарождения и движения, совершенствуются способы прогнозирования лавинной опасности и вырабатываются научно обоснованные спосо-

бы защиты от лавин. В 1932 г. в СССР была опубликована книга П. Н. Чирвинского «Снег и снегозадержание», в которой были приведены и обобщены обширные сведения о свойствах снега и связанных с ним явлениях. В том же году на Кавказе были начаты стационарные работы по исследованию лавин работниками Закавказского института сооружений. На основании их была опубликована серия интересных и важных в практическом отношении работ. Среди них можно отметить работы А. Г. Гоффа и Г. Ф. Оттена (1936, 1938, 1939, 1941) по изучению свойств снежного покрова, закономерностей движения лавин и определению силы удара лавины о препятствие. Не потеряла значения до настоящего времени работа Г. Т. Саатчяна (1936), в которой были впервые разработаны способы расчета лавинных нагрузок на сооружения.

В 1936 г. в Хибинах была организована снежно-метеорологическая служба комбината «Апатит» с горнолавиной станцией «Юкспор». Эта служба, переименованная позже в цех противолавинной защиты (ЦПЗ), уже в течение полувека ведет наблюдения за снежными лавинами и обеспечивает защиту населенных пунктов и производственных объектов от лавин. В ЦПЗ накоплен большой статистический материал о факторах лавинообразования и лавинах, впервые были обоснованы и практически применены статистические методы прогноза лавинной опасности на основе метеорологических наблюдений, разработана генетическая классификация лавин (автор В. Н. Аккуратов), освоен способ профилактического обрушения снежного покрова с лавиноопасных склонов минометным обстрелом.

Наряду с выполнением систематических наблюдений и работ по защите от лавин работниками ЦПЗ проводились разносторонние исследования лавин, результаты которых опубликованы в работах В. Н. Аккуратова, Б. М. Беленького, А. В. Бобрышева, А. А. Дементьева, Ю. Л. Зюзина, И. К. Зеленого, В. А. Иткина, Б. Н. Ржевского, П. А. Черноуса и др.

Большую роль в развитии советского лавиноведения сыграли работы Г. К. Тушинского (1949, 1957, 1960).

В 1964 г. на географическом факультете МГУ была организована проблемная лаборатория снежных лавин и селей. Коллективом сотрудников лаборатории под руководством профессора Г. К. Тушинского подготовлена и издана книга «Лавиноопасные районы Советского Союза» (1970), в которой описаны условия лавинообразования и особенности лавинного режима во всех горных районах СССР. Там же были изложены методические основы составления «Карты лавиноопасных районов СССР» (1971), которая была разработана совместно с работниками Гидрометслужбы и принята в качестве нормативного документа для проектирования сооружений в лавиноопасных районах (Указания по расчету ..., 1975). Сотрудниками лаборатории выполнен большой комплекс научно-исследовательских

работ по оценке лавинной опасности в различных горных районах, изучению закономерностей лавинообразования и разработке методов картографирования лавин. Достигнуты значительные успехи в изучении физико-механических свойств снега, процессов нарушения устойчивости снежного покрова на склонах гор и совершенствовании инженерных способов защиты от лавин. Совместно с механико-математическим факультетом и Институтом механики МГУ выполнен цикл работ по изучению динамики лавин, по разработке математических моделей для вычисления параметров лавин и по определению силы удара лавины о препятствие.

Начиная с 60-х годов систематические исследования снега и лавин ведутся в Высокогорном геофизическом институте (Нальчик) и Закавказском НИИ (Тбилиси) Госкомгидромета СССР. Сотрудниками этих институтов проведены разносторонние натурные и экспериментальные исследования снежного покрова и лавин на Кавказе.

Главным научным учреждением по изучению и разработке методов прогнозирования лавинной опасности является Среднеазиатский НИИ им. В. А. Бугаева в Ташкенте. Коллектив этого института возглавил составление «Руководства по снеголавиным работам» (1965), которое до настоящего времени используется в практической работе многочисленных организаций, проводящих снеголавиновые изыскания. Институт издал также первое «Практическое пособие по прогнозированию лавинной опасности» (1979). Известны работы сотрудников института по вопросам оценки лавинной опасности, картографирования лавиноопасных районов, изучения закономерностей движения и определения дальности выброса лавин.

Большой объем снеголавиновых работ и исследований выполняется снеголавиными станциями и партиями Госкомгидромета СССР в Средней Азии, на Кавказе, в Карпатах, на трассе БАМ, Сахалине и в ряде других горных районов. Исследованиями закономерностей распространения лавин и оценкой лавинной опасности горных территорий занимаются также сотрудники учреждений Академии наук СССР и других ведомств.

Значительных успехов в изучении метелевого снегопереноса, исследовании взаимодействия снежного покрова и лавин с сооружениями и совершенствовании способов защиты железных дорог от снежных заносов и лавин достигли специалисты кафедры изысканий, проектирования и постройки железных дорог и научно-исследовательской лаборатории по борьбе с лавинами и заносами Новосибирского института инженеров железнодорожного транспорта.

Результаты снеголавиновых исследований публикуются в специализированных сборниках статей и монографиях. Много статей опубликовано в «Материалах гляциологических исследований», регулярно издаваемых Институтом географии Академии наук СССР. Там же имеются краткие аннотации всех работ по

лавиноведению за период с 1956 по 1980 г. (Аннотированная библиография..., 1983). В популярной форме основы лавиноведения изложены К. С. Лосевым (1983). С научными основами лавиноведения можно ознакомиться в работе А. Н. Божинского, К. С. Лосева (1987).

7 марта 1978 г. было принято постановление Совета Министров СССР «О мерах по улучшению защиты населенных пунктов, предприятий, других объектов и земель от селевых потоков, снежных лавин, оползней и обвалов». В нем указывалось на необходимость разработки и осуществления неотложных мероприятий по защите населенных пунктов, мест отдыха трудящихся, других объектов и земель от снежных лавин. Это постановление способствовало расширению снеголавинных исследований и совершенствованию противолавинных мероприятий. В соответствии с ним, в частности, была разработана «Инструкция по проектированию и строительству противолавинных защитных сооружений (СН 517-80)», утвержденная Госстроем СССР в качестве нормативного документа для проведения снеголавинных изысканий и проектирования противолавинных сооружений.

Лавиноведение успешно развивается в Швейцарии, Франции, США, Японии и других странах.

В Швейцарии в 1931 г. была основана Федеральная комиссия по изучению снега и лавин, которая способствовала организации снеголавинных исследований. В 1936 г. группа ученых приступила к систематическим исследованиям снежного покрова и лавин на склонах горы Вейсфлюйох в районе Давоса. На базе этих исследований в 1942 г. был организован Швейцарский федеральный институт исследований снега и лавин, который в настоящее время занимает ведущее положение в ряде направлений лавиноведения. Особых успехов институт добился в разработке научных основ и практических рекомендаций по искусственному удержанию снега на лавиноопасных склонах. На основании этих рекомендаций были разработаны многочисленные типы снегоудерживающих сооружений с опорными поверхностями в виде решеток и сеток, которые нашли широкое применение как в Швейцарии, так и в ряде других стран. В институте выполнено много интересных работ по оценке и прогнозированию лавинной опасности, картографированию лавиноопасных районов, изучению процессов метаморфизма снежного покрова, механике снега и лавин, посадке леса на склонах и совершенствованию способов защиты от лавин. Сотрудники института проводят регулярные наблюдения за снежным покровом и составляют ежегодные сводки с характеристиками лавин на всей территории Швейцарии.

Во Франции создана Национальная ассоциация по изучению снега и лавин, координирующая исследования и работы по защите от лавин. Французские лавиноведы достигли успехов в экспериментальных и теоретических исследованиях динамики

лавин, в прогнозировании лавинной опасности и совершенствовании способов защиты.

В США лавины начали изучать с 1945 г. Первым профессиональным специалистом по снежным лавинам стал М. Отуотер, выполняющий в течение многих лет ответственные задания по прогнозированию лавинной опасности и защите от лавин. Им было проведено много наблюдений и разработаны практические предложения в области лавиноведения. Опыт лавинных работ красочно описан в его книге «Охотники за лавинами» (1972). В США организованы снежнотавинные школы, выпускающие профессионалов-лавинщиков. В 1961 г. был издан справочник по прогнозированию и мерам контроля «Снежные лавины». Практические работы по прогнозированию лавинной опасности и защите от лавин ведутся Департаментом сельского хозяйства и лесной службы. Лавиноведы в США достигли успехов в совершенствовании профилактических противолавинных мероприятий и искусственном обрушении снега с лавиноопасных склонов.

В Японии в 1941 г. был создан Институт низких температур для фундаментальных исследований физики снега и льда. Институт провел ряд весьма углубленных исследований строения и метаморфизма снежного покрова, физических и механических свойств снега, метелей и региональных характеристик снежного покрова в Японии. Снеголавинные исследования проводятся также Национальным исследовательским центром по предотвращению природных бедствий.

Крупные центры по изучению лавин созданы в Канаде и в Австрии. Работы по изучению лавинной опасности и разработке противолавинных мероприятий ведутся в Швеции, Норвегии, Италии, Болгарии, ФРГ, Польше, Индии.

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ В ГОРАХ

2.1. ТВЕРДЫЕ ОСАДКИ

Нагреваемые у земной поверхности воздушные массы насыщаются водяными парами и поднимаются вверх, постепенно при этом охлаждаясь. При определенной температуре влажность воздуха достигает величины предельной насыщенности, и дальнейшее понижение температуры приводит к тому, что воздух становится пересыщенным. Излишки водяных паров конденсируются в виде мельчайших капель, которые в зависимости от конкретных термодинамических условий могут исчезать, расти или замерзать и превращаться в кристаллики льда.

Зародыши кристаллов льда растут вследствие конденсации на их поверхности паров воды из окружающего воздуха и замерзания этой влаги. Скорость роста кристаллов тем большая, чем ниже температура облака, в котором зарождаются эти кристаллы. Утяжеленные кристаллы льда начинают падать и при этом обрастают дополнительным слоем льда, образующимся из капель воды, которые они встречают на своем пути. Заметное падение кристаллов льда в атмосфере начинается при достижении ими размера около 50 мкм.

Кристаллы образующегося в атмосфере льда весьма разнообразны по своей форме: иглы, призмы, пирамиды, столбики, пластинки, звездочки и комбинированные фигуры. Опускаясь вниз, они претерпевают большие изменения, могут расплавляться и превращаться в капельки тумана или увеличиваться и превращаться в снежинки, ледяную крупу или град, выпадающие на поверхность земли в виде твердых осадков.

Форма и размеры достигающих земной поверхности частиц твердых осадков зависят от термодинамических условий зарождения и роста кристаллов льда в атмосфере и температуры приземных слоев воздуха. Различают 10 основных типов частиц (рис. 2.1): 1 — пластинки — тонкие плоские кристаллы, по форме близкие к шестиугольнику, с максимальным размером 0,1—4 мм; 2 — звездчатые кристаллы — тонкие плоские кристаллы в виде дендритовых звезд с лучами. Обычно они имеют 6 лучей. Иногда встречаются кристаллы с 12 и 18 лучами, их средний диаметр 0,5—16 мм; 3 — столбики — призматические кристаллы, сплошные или полые, пирамиды и комбинации пирамид и призм, максимальный размер до нескольких миллиметров; 4 — иглы — тонкие цилиндрические и иглообразные кристаллы и их сростки длиной 0,2—6 мм, диаметром 0,02—0,2 мм; 5 — пространственные древовидные кристаллы — сложные снежные

кристаллы с лучами в виде листьев папоротника, расходящимися по многим направлениям, средний диаметр кристаллов до нескольких миллиметров; 6 — увенчанные столбики — столбики со звездочками или пластинками на концах, а в ряде случаев с дополнительными пластинками в промежуточных положениях диаметром до нескольких миллиметров; 7 — неправильные кристаллы — частицы, состоящие из нескольких беспорядочно сростшихся кристаллов, размер частиц до нескольких миллиметров; 8 — крупа — снежные белые мягкие шарики или прозрачные с поверхности и белые внутри шарики диаметром 0,5—5 мм; 9 — ледяной дождь — прозрачные ледяные шарики, иногда с не-

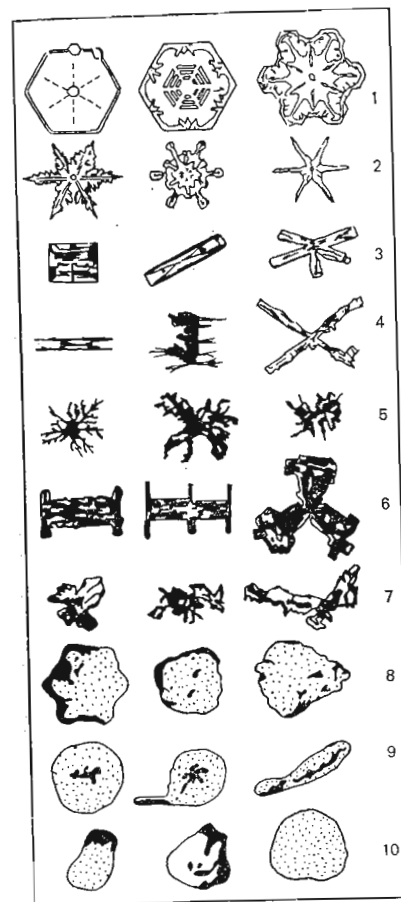


Рис. 2.1. Международная классификация снежинок (Гляциологический словарь, 1984).

кристаллы с лучами в виде листьев папоротника, расходящимися по многим направлениям, средний диаметр кристаллов до нескольких миллиметров; 6 — увенчанные столбики — столбики со звездочками или пластинками на концах, а в ряде случаев с дополнительными пластинками в промежуточных положениях диаметром до нескольких миллиметров; 7 — неправильные кристаллы — частицы, состоящие из нескольких беспорядочно сростшихся кристаллов, размер частиц до нескольких миллиметров; 8 — крупа — снежные белые мягкие шарики или прозрачные с поверхности и белые внутри шарики диаметром 0,5—5 мм; 9 — ледяной дождь — прозрачные ледяные шарики, иногда с не-

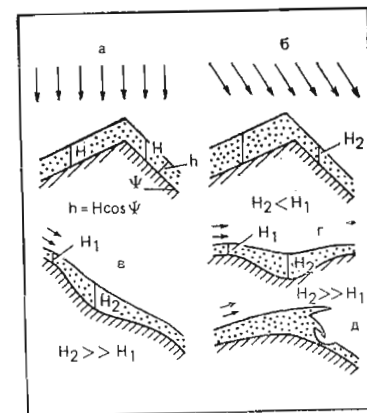


Рис. 2.2. Формирование снежного покрова:
а — при снегопаде без ветра;
б — при снегопаде со слабым ветром; в, г — при метелевом снегопереносе; д — формирование снежного карниза

замерзшим ядром, диаметром 1—3 мм; 10 — град — шаровидные ледяные образования, часто имеющие на поверхности слой прозрачного льда, иногда с острыми выступами или сложной огранкой, диаметром до 150 мм.

В количественном отношении среди выпадающего снега преобладают пластинчатые и звездчатые снежинки. Отношение толщины таких снежинок к их диаметру составляет обычно 1:50. Размер снежинок тем больше, чем выше температура приземного слоя воздуха (табл. 2.1). В безветренную погоду при

Таблица 2.1

Размеры снежинок и плотность свежеснежавшего снега в Хибинах при различной температуре воздуха и малой скорости ветра (Савельев и др., 1967)

Преобладающая форма снежинок	Температура воздуха, °С	Средний диаметр снежинок или хлопьев, мм	Плотность свежеснежавшего снега, кг/м³
Пластинки и слабо расчлененные звезды	—22,0	1—1,5	30
Мелкие дендритовые звезды	—15,6	1—2	40
Пластинки и дендритовые звезды	—14,3	до 2,5	50
Звезды, опушенные изморозью	—11,2	2—3	40
Сложные дендритовые звезды	—7,9	до 5	50
Дендритовые звезды	—5,4	6—8	60
Сложные звезды и хлопья	—4,5	5—7	50
Мелкие хлопья	—3,6	10—15	100
Крупные хлопья	—0,5	35—40	140
Очень крупные хлопья, опушенные изморозью	—0,2	10—12	170
Крупные влажные хлопья	2,4	15—20	200
Крупные мокрые хлопья с дождем	4,8	до 50	260

температуре около 0° снежинки во время падения могут соединяться и выпадать в виде крупных хлопьев. При сильном ветре, сталкиваясь в воздухе, они крошатся и выпадают в виде обломков.

2.2. ФОРМИРОВАНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Снежный покров на склонах гор характеризуется значительной пространственной неоднородностью и изменчивостью. Неоднородность высоты, плотности и строения снежного покрова образуется с самого начала выпадения снега на поверхность склонов, увеличиваясь за счет процессов перекристаллизации, уплотнения и течения снега и формирования новых слоев снежного покрова.

При выпадении снега без ветра на склонах крутизной менее 50° формируется снежный покров примерно одинаковой высоты, однако толщина покрова при этом на более крутых склонах будет меньше, чем на пологих (рис. 2.2, а). На более крутых склонах весь снег не удерживается и часть его скатывается вниз на более пологие участки, что увеличивает неоднородность снежных отложений. Выпадение снега, сопровождающееся ветром, приводит к тому, что наветренные склоны получают его

больше подветренных (рис. 2.2, б). Усиление ветра вызывает общую метель, резко меняющую условия формирования снежного покрова в зависимости от местных орографических особенностей горной поверхности.

Существенные перераспределения снега в снежном покрове происходят при низовых метелях, которые часто бывают спустя некоторое время после прекращения снегопада. Ветер поднимает в воздух ранее выпавший рыхлый снег и переносит его на другое место. Сильный ветер вырывает зерна снега даже с относительно плотного снежного покрова. Частицы снега перемещаются преимущественно перекачиванием и последовательными скачками. При ударах этих частиц о поверхность снежного покрова они выбивают из него новые частицы снега. В результате на поверхности снежного покрова образуется система «застругов».

При метелевом переносе снега может создаваться очень большая неоднородность снежного покрова вследствие перераспределения ранее отложенного снега, выдувания его на положительных формах рельефа, создания больших надувов в понижениях и образованиях снежных карнизов (рис. 2.2, в, г, д). На неровной поверхности земли с мелкими формами рельефа метелевый перенос нивелирует неровности и делает их мало заметными на снежном покрове. Вблизи от препятствий снегоперенос вызывает образование сугробов сложной формы. Плотность снежного покрова после низовой метели существенно увеличивается и может достигать 400 кг/м³.

Свежеснежавший снег под действием собственного веса уплотняется. По мере образования новых слоев снежного покрова нагрузка на предыдущие слои увеличивается, вызывая дополнительное уплотнение.

Наряду с механическим уплотнением в снежном покрове происходят интенсивные процессы изменения структуры зерен снега в результате термодинамической нестабильности поверхности кристаллов и массопереноса. Такие процессы называют метаморфизмом, в результате которого снежинки изменяют форму и размеры. Звездчатые кристаллы распадаются на части. Зубчики кристаллов испаряются, и пар конденсируется на более крупных зернах, которые при этом увеличиваются и округляются. В снежном покрове возникают слои снега из округлых зерен. Затем они могут превращаться в ограненные зерна и глубинную изморозь.

Существенные изменения снежного покрова происходят также из-за процессов таяния и испарения с поверхности, под воздействием жидких осадков и других метеорологических факторов.

В процессе формирования снежного покрова в нем могут возникать ледяные корки, слои уплотненного ветром снега, слои глубинной изморози и слои с различной структурой снега. В течение времени залегания снежного покрова различия в ха-

характеристиках соседних слоев могут нарастать или, наоборот, исчезать в зависимости от конкретных термодинамических условий их существования.

Таким образом, снежный покров не является стабильным. Все параметры, характеризующие мощность, строение, плотность и физико-механические свойства снежного покрова, не-

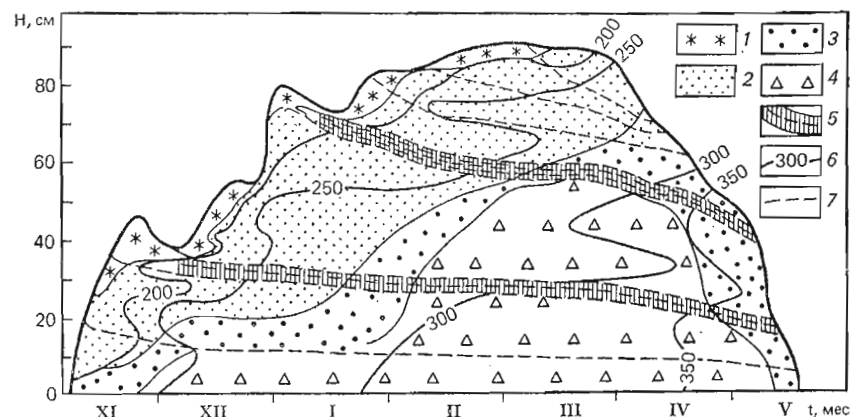


Рис. 2.3. Стратиграфический разрез снежного покрова в Хибинах (по наблюдениям Н. И. Лаптевой):
1 — свежеснежный слой; 2 — мелко- и среднезернистый; 3 — крупнозернистый; 4 — глубинная изморозь; 5 — ледяные корки; 6 — линии равной плотности ρ , кг/м³; 7 — линии, характеризующие изменение высоты H залегания слоя снега

прерывно изменяются. На рис. 2.3 показано изменение высоты H , плотности ρ и структуры снежного покрова в течение зимнего периода в долине Юкспориок Хибинского горного массива.

2.3. СТРАТИГРАФИЯ И СТРУКТУРА СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Стратиграфией снежного покрова называют последовательное чередование слоев снега с разным строением и физико-механическими свойствами, разделенных корками или иными границами. Стратиграфия характеризует первичные условия формирования и дальнейшее развитие толщи снежного покрова. Для географического обозначения стратиграфии снега выделяют следующие виды снега, корок и прослоек (рис. 2.4): 1 — свежий снег, состоящий преимущественно из пластинчатых и звездчатых кристаллов; 2 — свежий снег, состоящий преимущественно из столбчатых кристаллов; 3 — свежеснежный уплотненный метелевый снег; 4 — мелкозернистый (с поперечником зерен до 1 мм); 5 — среднезернистый (с поперечником зерен от 1 до 2 мм); 6 — крупнозернистый (с поперечником зерен

более 2 мм); 7 — угловатые зерна с плоскими сторонами; 8 — глубинная изморозь (чашеобразные угловатые кристаллы); 9 — ледяные включения; 10 — радиационные корки; 11 — ветровые корки; 12 — прослойки разрыхления.

Структура снега характеризуется формой, размерами, взаимным расположением и ориентировкой кристаллов и воздушных пор в снежной толще.

Качественные определения структуры производят визуально, рассматривая через увеличительную лупу пробы снега, взятые из шурфа в снежном покрове или с помощью снежного бура. Для более детального определения структуры делаются микрофотографии поверхностей и клиновидных срезов с образцов, шлифов и россыпи кристаллов.

Количественные методы определения структуры, пригодные для оценки прочности снега, разработаны пока только для зернистого снега (Голубев, Войтковский, 1977). С помощью микрофотографии определяют диаметры зерен снега, расстояния между центрами контактирующих зерен и диаметры ледяных связей между зернами. На основании статистической обработки этих данных и замеров плотности снега определяют величину относительной контактной поверхности снега:

$$a_k = \frac{\rho_{\text{сн}}}{\rho_{\text{л}}} k b^2 \frac{i_k}{4},$$

где $\rho_{\text{сн}}$ — плотность снега; $\rho_{\text{л}}$ — плотность льда; $k = \frac{\bar{L}}{\bar{D}}$ — показатель рыхлости структуры, определяемый как отношение среднего расстояния между контактирующими зернами $\bar{L}$ к среднему диаметру зерен $\bar{D}$; $b = \frac{\bar{d}_k}{\bar{D}}$ — показатель связности зерен, определяемый как отношение среднего диаметра связей между зернами $\bar{d}_k$ к среднему диаметру зерен; i_k — координационное число структуры (среднее число связей у одного зерна с соседними зернами; в зависимости от плотности снега и значений показателей k и b может изменяться в пределах от 3 до 12).

Физический смысл величины a_k можно представить на примере одноосного растяжения и разрыва образца снега. Она будет равна отношению суммарной поверхности разорванных контактных связей между зернами на поверхности разрыва к поперечному сечению разрываемого образца снега.

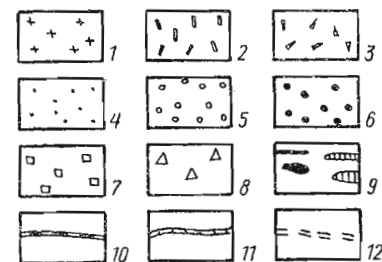


Рис. 2.4. Условные знаки стратиграфии снега

Величина относительной контактной поверхности снега — обобщенная количественная характеристика зернистого снега, которая существенно влияет на прочностные характеристики снега.

2.4. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СНЕГА

Плотность и пористость. Снег представляет собой пористую массу, состоящую из относительно прочных, но слабо связанных между собой кристаллов и зерен, между которыми содержится воздух. Отношение объема воздуха, заключенного в образце снега, к общему объему этого образца называется пористостью снега n .

Для сухого снега

$$n = 1 - \rho_{\text{сн}} / \rho_{\text{л}}, \quad (2.1)$$

где $\rho_{\text{сн}}$ — плотность снега; $\rho_{\text{л}} = 917 \text{ кг/м}^3$ — плотность кристаллов льда.

Во влажном снеге поры между кристаллами льда частично заполнены водой. Отношение объема воздуха, заключенного в снеге, к общему объему, или воздушная пористость влажного снега, составляет

$$n_{\text{возд}} = 1 - \rho' / \rho_{\text{л}} (1 - 0,083 W), \quad (2.2)$$

где ρ' — плотность влажного снега (суммарная масса кристаллов льда и воды в единице объема); W — влажность снега,

Таблица 2.2

Плотность и пористость снега (Фляйг, 1960)

Вид снега	Плотность ρ , кг/м ³	Пористость n
Свежий:		
«дикий» (рыхлый, пушистый)	10—30	0,99—0,97
порошкообразный	30—60	0,97—0,93
слабо уплотненный ветром	60—100	0,93—0,89
сильно уплотненный ветром	100—300	0,89—0,67
Старый:		
снег-плавун	200—300	0,78—0,67
сухой осевший	200—400	0,78—0,56
мокрый осевший	400—550	0,70—0,50
сухой фирнизированный	400—700	0,56—0,24
мокрый фирнизированный	600—800	0,50—0,20

определяемая как отношение массы воды к общей массе снега, включая массу кристаллов льда и воды.

Средние значения плотности и пористости различных видов снега представлены в табл. 2.2.

Воздухопроницаемость снега обусловлена тем, что воздушные поры между зернами связаны между собой. Количество воздуха, которое может проникать через снег, определяется и градиентом давления воздуха в снеге, и коэффициентом воздухопроницаемости:

$$K_v = v_v i, \quad (2.3)$$

где v_v — кажущаяся скорость воздуха в снеге, равная объему воздуха, проникающего через 1 м^2 сечения потока в 1 с (фактическая скорость потока воздуха в снеге больше кажущейся, так как суммарное сечение пор, через которые проходит воздух, меньше общего сечения); $i = \Delta P / \delta$ — градиент давления воздуха в снеге; ΔP — перепад давления на расстоянии δ , исчисляемый в метрах водяного столба.

По мере увеличения плотности снега воздухопроницаемость уменьшается. В снежном покрове одновременно проявляются две тенденции в изменении коэффициента воздухопроницаемости — его уменьшение по мере естественного уплотнения снега и возрастание по мере увеличения размеров зерен и пор между ними в процессе метаморфизма. В результате наблюдается большой разброс значений коэффициента воздухопроницаемости K_v в пределах 0,2—15 м/с в зависимости от пористости и структуры снега.

В снежном покрове обычно перемещается не чистый воздух, а воздух с некоторым содержанием водяного пара. Содержание пара близко к величине полной влагонасыщенности воздуха при заданной температуре. При меньшем содержании влаги происходит возгонка льда с поверхности зерен, а при движении пересыщенного воздуха излишки водяного пара намерзают на зернах.

Воздухопроницаемость мокрого снега уменьшается по мере заполнения пор водой и уменьшения воздушной пористости.

Водоудерживающая способность и водопроницаемость. Поверхность зерен снега обладает адсорбционными свойствами, т. е. снег способен впитывать воду. Если нижнюю часть образца снега залить водой, то она поднимется по капиллярам между зернами на некоторую высоту над свободным уровнем воды, называемую высотой капиллярного поднятия. Высота капиллярного поднятия воды в снеге колеблется в пределах 0,1—1,0 м в зависимости от его пористости и структуры.

Вода обволакивает зерна снега пленками, которые могут перемещаться под действием молекулярных и менисковых сил в капиллярах между зернами. При низкой температуре снега пленочная вода замерзает на зернах, повышая их температуру. Поэтому при насыщении снега водой его температура обычно близка 0°. Наибольшее количество пленочной и капиллярно-подвешенной воды, которую удерживает снег, называется его максимальной водоудерживающей способностью.

Водоудерживающая способность снега зависит главным образом от величины эффективной поверхности зерен снега (величины свободной поверхности зерен снега в единице объема).

Ориентировочные значения водоудерживающей способности различных типов снега представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Водоудерживающая способность снега (Кузьмин, 1957)

Вид снега	Плотность до увлажнения, кг/м³	Отношение массы воды, которая может быть удержана, к общей массе снега с водой, %
Свежевыпавший метелевый	130—210	55—35
Мелкозернистый и среднезернистый	240—320	32—25
Перекристаллизованный крупнозернистый	390—450	25—15

При влажности снега больше максимальной водоудерживающей способности вода начинает протекать через снег под действием гравитационных сил или разности давления.

Количество воды Q_v , фильтрующейся через снег в единицу времени, определяется уравнением Дарси, применяемым для описания фильтрации воды в грунтовых и пористых средах:

$$Q_v = K_f I_\omega,$$

где K_f — коэффициент фильтрации; $I_\omega = (h_1 - h_2)/l_f$ — градиент напора; $h_1 - h_2$ — падение напора или разность давлений по длине пути фильтрации l_f ; ω — площадь поперечного сечения фильтрующего потока.

Коэффициент фильтрации тем больше, чем крупнее зерна и больше пористость снега. При длительном течении воды коэффициент фильтрации увеличивается вследствие образования сквозных микроканалов в снеге. Для наиболее распространенных видов снега при естественной плотности снежного покрова коэффициент фильтрации составляет 1—5 м/с. Реальные скорости фильтрации воды, наблюдаемые в снежном покрове, обычно находятся в пределах 0,02—0,50 см/с.

Теплоемкость. Объемная теплоемкость сухого снега равна сумме теплоемкостей содержащихся в нем кристаллов льда, воздуха и водяного пара (табл. 2.4).

Удельная теплоемкость льда при понижении температуры уменьшается и выражается эмпирической формулой

$$C_l = 2117 + 7,8\theta \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad (2.4)$$

где θ — температура льда, °С.

Теплоемкости воздуха и водяного пара в снеге малы по сравнению с теплоемкостью ледяных зерен, поэтому ими обычно пренебрегают и объемную теплоемкость снега выражают в

виде произведения плотности снега на удельную теплоемкость льда ρC_l .

Мокрый снег имеет температуру 0°, а при понижении температуры содержащаяся в снеге вода замерзает. Поэтому кажущаяся теплоемкость мокрого снега, а точнее, количество тепла,

Таблица 2.4

Плотность и теплоемкость компонентов снега при 0° и нормальном атмосферном давлении

Компоненты снега	Плотность, кг/м³	Теплоемкость	
		удельная, Дж/(кг·К)	единицы объема Дж/(м³·К)
Лед	917	2117	$1,94 \cdot 10^6$
Воздух	1,293	1005	$1,3 \cdot 10^3$
Водяной пар	0,00493	2010	9,9

выделяемое при понижении температуры снега на 1°, включает в себя теплоемкость ледяного скелета и скрытую теплоту замерзания воды.

Скрытая теплота плавления и возгонки. Скрытая теплота плавления льда при 0° и нормальном атмосферном давлении равна $L_{пл} = 333,6$ кДж/кг. Тепло, требуемое для таяния сухого снега, $Q_t = L_{пл} \rho$, кДж/м³. Количество тепла, необходимое для превращения мокрого снега в воду, составляет

$$Q_t = L_{пл} \rho' (1 - W), \quad (2.5)$$

где ρ' — плотность мокрого снега; W — влажность снега.

Переход ледяных кристаллов снега в парообразное состояние может происходить или через жидкую фазу с последующим испарением воды, или, минуя ее, непосредственным превращением льда в парообразное состояние. Обратный переход водяного пара в лед также может идти двумя путями — конденсацией пара и последующего замерзания воды или, минуя жидкую фазу, превращением водяного пара непосредственно в лед.

Скрытая теплота испарения воды в зависимости от температуры определяется формулой (Кузьмин, 1957)

$$L_{исп} = 2500 - 2,4\theta, \text{ кДж/кг}, \quad (2.6)$$

где θ — температура испаряющейся воды, °С.

Скрытая теплота возгонки льда $L_{возг}$ равна сумме затрат тепла, требуемого для таяния льда и испарения воды. При 0°

$$L_{возг} = L_{пл} + L_{исп} = 2834 \text{ кДж/кг}.$$

Диффузия водяного пара. Воздух в порах снега почти полностью насыщен водяным паром и имеет температуру, близкую к температуре зерен снега. Упругость и плотность водяного пара уменьшается по мере понижения температуры, поэтому при

наличии в снежном покрове температурного градиента пар перемещается по порам в сторону, где температура снега ниже и соответственно упругость водяного пара меньше.

Плотность насыщенного пара ρ_n при нормальном атмосферном давлении и при 0° равна $0,0049 \text{ кг/м}^3$, при -10° — $0,0024 \text{ кг/м}^3$.

В снежном покрове наиболее высокая температура обычно наблюдается в нижнем слое около поверхности грунта и перемещение водяного пара происходит из нижних слоев в верхние. Непосредственно у поверхности снежного покрова направление диффузии может меняться соответственно изменениям направления температурного градиента.

Интенсивность свободной диффузии водяного пара в снежном покрове определяется формулой

$$m_n = -D_n \frac{\partial \rho_n}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y}, \quad (2.7)$$

где m_n — масса пара, проходящего через единицу площади сечения в единицу времени; D_n — коэффициент диффузии; ρ_n — плотность насыщенного пара при заданной температуре; $\partial \rho_n / \partial \theta$ — градиент плотности водяного пара в направлении потока диффузии. Коэффициент диффузии в снеге ориентировочно равен $0,20 \text{ см}^2/\text{с}$.

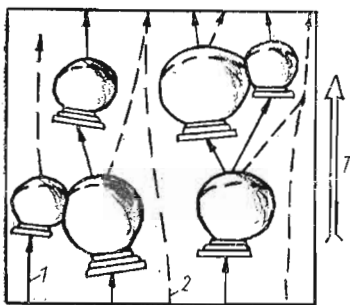


Рис. 2.5. Перенос водяного пара в снежном покрове микроскопической (1) и макроскопической (2) диффузией; T — направление потока

Перенос водяного пара в снежном покрове осуществляется не только диффузией по поровому пространству (микроскопическая диффузия), но и возгонкой льда и сублимацией пара на противоположных поверхностях зерен снега (макроскопическая диффузия). Последний вид диффузии создает впечатление, что водяной пар проникает через ледяные зерна. Возгонка льда происходит на более холодных поверхностях зерен, которые обращены в сторону понижения температуры. Пар перемещается по поровому пространству и субли-

мирует на противоположных поверхностях ближайших зерен. В результате структура ледяных зерен меняется, а их масса обновляется и перемещается в направлении, противоположном направлению диффузии (рис. 2.5).

Перенос массы диффузией относительно небольшой и мало влияет на изменение плотности снега (редко превышает 10 кг/м^3 за зимний период, т. е. незначительно превосходит предельные точности существующих методов определения плотно-

сти снега). Вместе с тем диффузия пара имеет огромное значение в процессах метаморфизма снега и передачи тепла через снег.

Теплопроводность. Передача тепла в снеге осуществляется кондукцией и термической диффузией. Количество тепла, переносимого через единицу площади, перпендикулярной к направлению теплового потока, составляет

$$Q = -\lambda_{\text{эф}} \partial \theta / \partial y, \quad (2.8)$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент теплопроводности снега, включающий оба вида передачи тепла, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\partial \theta / \partial y$ — градиент температуры, $\text{град}/\text{м}$; y — направление теплового потока. Величина эффективного коэффициента теплопроводности зависит от плотности и температуры снега. По мере увеличения плотности снега увеличивается кондуктивная теплопередача. Повышение температуры увеличивает роль теплопередачи термической диффузией.

При температуре ниже -25° теплоотдача диффузией мала по сравнению с кондуктивной теплоотдачей, и в этом случае $\lambda_{\text{эф}}$ может рассматриваться как истинный коэффициент молекулярной кондуктивной теплопередачи. По мере повышения температуры количество тепла, передаваемое термической диффузией, увеличивается, и при температуре около 0° оно достигает величины, сопоставимой с кондуктивной теплопередачей.

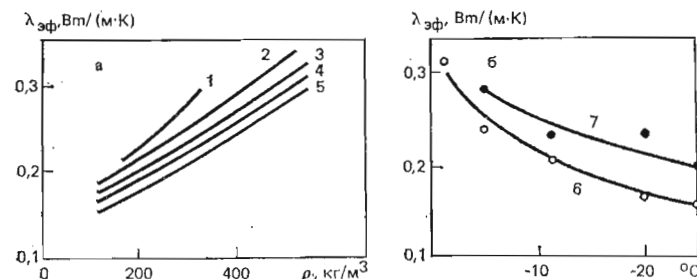


Рис. 2.6. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности снега $\lambda_{\text{эф}}$ от его плотности ρ (а), температуры (б) (по данным А. В. Павлова):
1 — $\theta > -2,5^\circ$; 2 — θ от $-2,5$ до $-7,5^\circ$; 3 — θ от $-7,5$ до -15° ; 4 — θ от -15 до -25° ; 5 — $\theta < -25^\circ$; 6 — снежный покров $\rho = 250 \text{ кг/м}^3$ в Якутске; 7 — то же в Игарке

Характер изменения $\lambda_{\text{эф}}$ в зависимости от температуры показан на рис. 2.6, б. Разные значения $\lambda_{\text{эф}}$ для снега в Якутске и Игарке в данном случае объясняются различиями в структуре снега в этих районах, несмотря на то что испытываемые образцы снега имели одинаковую плотность. Снег в Игарке характеризовался большей по сравнению со снегом в Якутске относи-

тельной поверхностью контактов между ледяными зернами, в результате чего облегчалась кондуктивная передача тепла по ледяному скелету.

На рис. 2.6, а представлены данные зависимости $\lambda_{эф}$ от плотности снега ρ при различной температуре θ .

При расчетах температурных полей в снежном покрове пользуются значением коэффициента температуропроводности снега

$$a = \lambda_{эф} / \rho C_{л}, \quad (2.9)$$

где ρ — плотность снега; $C_{л}$ — удельная теплоемкость льда.

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость изменения температуры снега в заданном месте при изменении температуры в соседнем. В условиях одномерной задачи

$$a = \frac{\partial \theta}{\partial t} \bigg/ \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}. \quad (2.10)$$

2.5. МЕТАМОРФИЗМ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Метаморфизмом снега называется совокупность происходящих в нем процессов, которые приводят к преобразованию его структуры — изменению формы, размеров и количества кристаллов льда и связей между ними.

Основными процессами метаморфизма являются: возгонка льда и сублимация водяного пара на поверхности кристаллов; перераспределение «ледяной материи» в результате термодинамической неустойчивости поверхности кристаллов; миграция жидких пленок по поверхности кристаллов и водяного пара по межкристаллическому пространству под воздействием разности температуры и разной концентрации водяного пара в различных слоях снежного покрова; спекание (смерзание) ледяных кристаллов; таяние льда и замерзание воды в снеге; разрушение и вязкие деформации ледяных связей между кристаллами; относительные перемещения кристаллов под действием собственного веса и внешних нагрузок.

Различают четыре типа метаморфизма снега: изотермический, температурогradientный, метаморфизм таяния-замерзания и динамометаморфизм.

Характерными чертами изотермического метаморфизма являются разрушение и упрощение формы первоначальных снежинок, образование округлых ледяных кристаллов и их сближение, разрушение первоначальных и создание новых связей между кристаллами. Основные механизмы этих изменений — механические разрушения снежинок и связей между кристаллами и перераспределение «ледяной материи» в результате термодинамической неустойчивости поверхности кристаллов. На выпуклых участках поверхности кристаллов

молекулы льда обладают большей свободной энергией, чем на плоских и вогнутых. Неоднородно также давление паров в межкристаллическом воздушном пространстве около поверхности кристаллов — оно тем больше, чем меньше радиус кривизны поверхности. Из-за разности давления паров и различий в распределении свободной энергии происходит удаление вещества с более выпуклых участков поверхности, перемещение этого вещества путем поверхностной диффузии или процессов возгонки — сублимации и отложения вещества на менее выпуклых и вогнутых участках. В результате такого перераспределения вещества происходит округление зерен снега и рост более крупных за счет мелких зерен (собирательная перекристаллизация). Метаморфизм начинается с того, что выпадающие на поверхность земли снежинки разрушаются и распадаются на части, после чего в результате округления и собирательной перекристаллизации снег превращается в мелкозернистую среду, состоящую из округлых, продолговатых или неправильной формы зерен примерно одинакового размера. В дальнейшем количество зерен в единице объема снега уменьшается, а средний их диаметр увеличивается. Это приводит к постепенному превращению мелкозернистого снега в среднезернистый, а затем в крупнозернистый.

Изотермический метаморфизм включает также спекание контактирующих зерен и образование ледяных шеек, которые особенно интенсивно растут в начальные периоды после соприкосновения ледяных зерен. Образование шейки происходит вследствие возгонки — сублимации льда, объемной и поверхностной диффузии.

Перераспределение «ледяной материи» при изотермическом метаморфизме ограничивается микрообластями, непосредственно прилегающими к кристаллам.

Температурогradientный метаморфизм характеризуется преобразованием структуры снега путем роста одних кристаллов за счет уменьшения и исчезновения других под действием температурного градиента. Из-за разной концентрации водяного пара в различных точках снежной толщи возникают интенсивные процессы возгонки льда, миграции водяного пара и его сублимации. Кристаллы льда испаряются с более теплых поверхностей, образовавшийся при этом водяной пар мигрирует по межкристаллическому пространству в направлении, противоположном направлению теплового градиента, и сублимируется на более холодных поверхностях ближайших кристаллов.

В результате температурогradientного метаморфизма растут новые формы скелетных кристаллов, которые постепенно заменяют обломки снежинок и зерна снега. В нижних слоях снежного покрова растут крупные кристаллы глубинной изморози в виде ограненных призм, пирамид и чашеобразных форм. Интенсивность процесса перекристаллизации тем больше, чем

больше градиент температуры и чем выше температура рассматриваемого слоя снега. Наиболее высокая интенсивность этого процесса наблюдается в начале зимы в тех случаях, когда малая толщина снежного покрова сочетается с низкой температурой воздуха. При таких условиях нижний слой свежевыпавшего снега может за одну-две недели полностью превратиться в слой глубинного инея.

Описанные два типа метаморфизма обычно действуют одновременно, и их разделение несколько условно, тем более что сублимационная перекристаллизация (перераспределение вещества через парообразную фазу), определяющая температурогradientный метаморфизм, играет важную роль и в изотермическом метаморфизме. Поэтому можно говорить лишь о преобладании того или иного типа метаморфизма. Так, первый тип метаморфизма характерен для ранней стадии диагенеза снежного покрова и изменений структуры снега в изотермических условиях, а второй тип отражает влияние температурного градиента.

Третий тип метаморфизма связан с таянием кристаллов и замерзанием воды в снеге. При проникновении воды в горизонты снежного покрова с отрицательной температурой происходит частичное замерзание водных пленок на поверхности зерен и вокруг контактов между ними. Заметные изменения в форме и величине зерен и связей между ними происходят при замерзании воды в снеге. Повторение процессов частичного таяния и последующего замерзания мокрого снега вызывает фирнизацию снега и образование различных новых структур, начиная от рыхлой структуры из округлых зерен, бусинок или полусфер, мало связанных друг с другом, и кончая снежистым пористым льдом.

Процессы изменения структуры снега, связанные с энергией напряженного состояния и деформациями снега под действием внешних механических усилий, называют динамометаморфизмом. Под действием внешних усилий на контактах между зернами снега и в самих зернах вблизи контактов возникают повышенные местные напряжения. Неоднородность напряженного состояния в ледяных зернах способствует их рекристаллизации. Менее напряженные кристаллы и их части растут за счет более напряженных участков. В результате в снеге происходит интенсивное перераспределение внутренних микронапряжений в зернах и на контактах между ними, структурная перестройка, соответствующая действующему напряженному состоянию и нарастающим деформациям снега. Работа, затрачиваемая на пластическую деформацию снега и его уплотнение, превращается в тепловую энергию, интенсифицирующую динамометаморфизм.

Динамометаморфизм снега самым тесным образом связан с метаморфизмом, происходящим из-за термодинамической нестабильности кристаллов льда и под действием потоков

тепла и диффузии водяного пара в снеге. Поэтому для оценки роли динамометаморфизма необходимо сопоставлять процессы изменения структуры снега, деформируемого под действием внешних нагрузок, с метаморфизмом такого же снега в аналогичных температурных условиях, но без нагрузок.

Динамометаморфизм вызывает существенные изменения механических свойств снега в процессе его деформации. Чаще всего он сопровождается уплотнением снега и увеличением его прочности.

При метаморфизме снежного покрова проявляются две противоположные тенденции в изменении механических свойств снега. Сублимационная перекристаллизация ведет к увеличению размеров зерен, уменьшению их количества в единице объема и структурному разрыхлению, при котором уменьшается относительная контактная поверхность и снижается прочность снега, что в свою очередь может интенсифицировать оседание снежного покрова. Последнее вызывает уплотнение снега, увеличивает количество и площадь контактов между зернами и ведет к упрочению снега. В зависимости от физико-географических и конкретных метеорологических условий могут возникать противоположные тенденции изменения данного слоя снега или снежного покрова в целом в сторону уплотнения при преобладании оседания и изменение в сторону разрыхления при быстрым росте зерен и незначительном изменении плотности.

Оседание снега происходит плавно по мере вязкого уплотнения или путем резких внезапных просадок, которые обычно связаны с нарушением первичной структуры в каком-то слое и с быстрым вытеснением воздуха из снега, сопровождаемым шумом.

В формировании и развитии естественного снежного покрова можно выделить две стадии метаморфизма—раннего диагенеза и эпигенеза (Шумский, 1955). Для первой стадии типично быстрое протекание процессов сублимационного округления зерен снега, уплотнение и сжатие их на контактах. Продолжительность этих процессов относительно невелика, порядка нескольких суток. В результате формируется мелкозернистый снег, в котором ледяные зерна с диаметром 0,1—1 мм образуют пространственную ледяную решетку.

Большое влияние на эту стадию метаморфизма оказывают условия выпадения снега и формирования снежного покрова, мощность данного слоя и вышележащих слоев, температурный режим, ветер и ряд других факторов. Так, в районах с частыми и обильными снегопадами при относительно высокой температуре создаются условия для быстрого уплотнения снежного покрова. Малое количество выпадающего снега и низкая температура благоприятны для интенсивного сублимационного округления и температурогradientного метаморфизма. В районах с сильными ветрами и резкими колебаниями погоды формируется неоднородный слоистый снежный покров с ветровыми и ледя-

ными корками, что создает различия и в интенсивности процессов метаморфизма в слоях снежной толщи.

Во второй стадии метаморфизма обычно происходит укрупнение зерен и дальнейшее уплотнение снега. Здесь также наблюдается разнообразие в интенсивности и направленности процессов изменения структуры снега в зависимости от исходной плотности, мощности и структуры, от величины нагрузки, температурных условий и ряда других факторов.

Мелкозернистый снег превращается в среднезернистый (с диаметром частиц 1—2 мм) и затем в крупнозернистый (с диаметром частиц более 2 мм). В нижних горизонтах снежного покрова при наличии температурного градиента образуются слои глубинной изморози, состоящие из крупных чашеобразных кристаллов, относительно слабо связанных друг с другом. При резком оседании вышележащих слоев снега и других механических воздействиях кристаллы глубинной изморози и связи между ними могут частично разрушиться, и тогда слой глубинной изморози может стать псевдотекучим.

Таяние снега на поверхности и замерзание воды в снежном покрове ведет к его фирнизации и уплотнению.

На склонах гор процессы метаморфизма усложняются из-за неоднородности мощности и плотности снежного покрова и действующих в нем напряжений сжатия и сдвига. Различия крутизны и ориентировки склонов и неровности рельефа приводит к тому, что процессы метаморфизма снежного покрова могут протекать по-разному даже на относительно близко расположенных друг от друга участках.

2.6. ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ТАЯНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Термический режим снежного покрова определяется преимущественно теплообменом на поверхности и в меньшей степени между почвой и снегом.

В осенне-зимний период из почвы в снежный покров поступает тепло в виде кондуктивного потока за счет охлаждения и промерзания почвы и геотермического потока, возможна также миграция водяного пара из почвы в снежный покров. В период таяния, когда температура снежной толщи приближается к 0°, возможно изменение направления потока — тепло будет поступать из снега в почву и расходоваться на повышение температуры верхнего слоя мерзлой почвы под снегом.

Величина потока тепла на поверхности снежного покрова определяется элементами радиационного баланса, турбулентным теплообменом, испарением или конденсацией, выпадением жидких осадков. Интенсивность потока непостоянная и может изменяться в широких пределах даже в течение одних суток, возможно также изменение направления потока.

Большое количество энергии поступает к поверхности снежного покрова в виде прямой и рассеянной солнечной радиации, однако лишь небольшая ее часть поглощается снегом, а

остальная отражается от поверхности снега. Альbedo снежного покрова (отношение количества отраженной радиации к количеству падающей на поверхность снега радиации) изменяется в зависимости от структуры, влажности и загрязненности снега. Для свежеснеженного снега альbedo составляет от 0,95 до 0,80. Это значит, что снежный покров может получать лишь от 5 до 20% поступающей радиации. Альbedo поверхности сухого переметенного снега колеблется от 0,80 до 0,65. Альbedo снижается по мере увлажнения снега, особенно в период его таяния. Альbedo средне- и крупнозернистого тающего снега порядка 0,60—0,40, а у загрязненного снега с водой может уменьшаться до 0,20.

Количество поступающей прямой солнечной радиации зависит от ориентации и крутизны склонов, соответственно наблюдаются большие различия термического режима снежного покрова на разных склонах.

Снег плохо пропускает радиацию, поэтому проникающая в снег часть солнечной энергии поглощается верхним слоем снежного покрова толщиной в несколько десятков сантиметров. Верхний (10 см) слой поглощает до 90% радиации. Под действием проникающей радиации может возникать парниковый эффект снеготаяния при отрицательной температуре воздуха, когда на поверхности снежного покрова образуется тонкая ледяная корка, а под ней происходит частичное оплавление кристаллов.

Много тепла снежный покров теряет в виде длинноволновой радиации. Определенную роль играют также элементы радиационного баланса, учитывающие обратную радиацию от облаков и атмосферы. Сочетание прихода тепла за счет проникающей радиации и потери путем длинноволновой радиации приводит к тому, что в ночное время радиационный баланс чаще всего имеет отрицательное значение и соответственно поток тепла направлен из снежного покрова в атмосферу, а в дневные часы наоборот.

Турбулентный теплообмен обуславливается разностью температуры воздуха и поверхности снега. Когда температура воздуха выше температуры поверхности снега, тепло от воздуха передается в снег. Если же воздух холоднее снега, то тепло поступает из снега в воздух. Интенсивность турбулентного теплообмена увеличивается по мере увеличения разности температуры поверхности снега и воздушных масс и роста скорости движения воздуха над снежным покровом.

Турбулентный теплообмен может сопровождаться выносом водных паров из толщи снега, возгонкой снега и испарением водных пленок. При определенных условиях происходит сублимация содержащихся в воздухе водяных паров на поверхности снега в виде инея. Наиболее благоприятные условия для его образования появляются в ясные холодные ночи без сильного ветра при поступлении масс влажного воздуха.

Суточные изменения температуры поверхностного слоя распространяются в снежный покров до 50 см, причем амплитуда колебаний температуры быстро уменьшается с глубиной, а температурный градиент в этой зоне может изменять направление.

На склонах гор наблюдается сильно выраженная пространственная неоднородность температурного режима снежной толщи. Даже при одинаковых температурных условиях на поверхности снежного покрова и одинаковой его высоте градиент температуры будет больше на крутых склонах, где меньше толщина покрова. Различия температурного градиента в свою очередь обуславливают различия в интенсивности процессов температурного метаморфизма.

Таяние снежного покрова начинается в приповерхностном слое за счет проникающей радиации или на поверхности за счет турбулентного теплообмена при температуре воздуха выше 0° , образовавшаяся при этом свободная вода просачивается вниз. Если средние слои снежного покрова имеют отрицательную температуру, то просачивающаяся вода замерзает в виде линз льда.

По мере усиления таяния снега зона фильтрации воды увеличивается, температура снега в ней повышается до 0° и в снеге образуются постепенно расширяющиеся микроканалы для стока воды. При наличии в снежном покрове ледяной корки вода, достигнув этой корки, может стекать далее по ней или фильтровать по нижнему слою толщи снега и образовывать подснежные каналы стока.

Фильтрация воды снижает прочность снега и является одной из причин образования лавин из мокрого снега и водоснежных потоков.

Глава 3

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СНЕГА

3.1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СНЕГА

Деформация снега складывается из суммы относительных перемещений ледяных зерен и деформации самих зерен и связей между ними. При этом часть связей может разрушаться и заменяться новыми, а остальные — претерпевать существенные изменения.

Совместное действие различных механизмов деформирования снега и разрушения связей между зернами приводит к разнообразию скоростей и величин деформации снега и его прочностных характеристик в зависимости от структуры, плотности и температуры снега, условий деформации, величин и времени действия нагрузок. Тем не менее можно проследить некоторые общие закономерности. Рассмотрим их на примере одноосного сжатия образца снега с возможностью бокового расширения.

В момент приложения к образцу нагрузки происходит упругая деформация снега, которая состоит преимущественно из упругих деформаций зерен и связей между ними. При малых нагрузках разрушение связей между зернами не происходило и количество разрушенных связей ограничено и мало влияет на начальную деформацию снега. Если же нагрузка превышает некоторый предел, при котором напряжение в снежинках свежевыпавшего снега, в зернах снега или на контактах между ними достигают предела прочности льда, то происходит частичное разрушение кристаллов льда и связей между ними. В этом случае начальная деформация включает как упругую деформацию, так и некоторое уплотнение.

Вслед за начальной деформацией, происходящей в процессе приложения нагрузки, начинается ползучесть, характеризующаяся необратимыми пластическими деформациями зерен и их

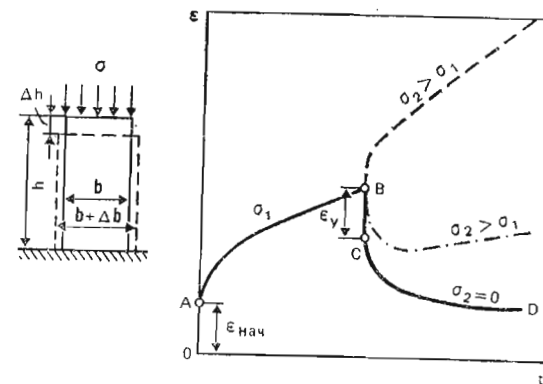


Рис. 3.1. Деформация снега ϵ при одноосном сжатии под действием постоянной нагрузки σ^1 и после изменения нагрузки от σ_1 до σ_2

относительными перемещениями, приводящими к перекомпоновке зерен и улучшению их упаковки, а также к боковому расширению сжимаемого образца. В процессе ползучести снег уплотняется и упрочняется, что в свою очередь вызывает уменьшение скорости сжатия образца (рис. 3.1). При увеличении нагрузки закономерности деформирования аналогичны описанным закономерностям деформирования после первого нагружения. При снятии нагрузки общая величина деформации образца уменьшается на величину упругой деформации, затем уменьшается еще в течение некоторого времени с меньшей скоростью. При частичной разгрузке вслед за некоторым уменьшением деформации спустя некоторое время начинается новое нарастание деформации.

На рис. 3.2 отчетливо видна первая стадия ползучести с уменьшающейся скоростью деформирования. Вторая стадия — квазивязкое течение с постоянной скоростью — наблюдается менее четко. По мере деформирования образца плотность снега увеличивается, и это приводит к уменьшению скорости ползучести, что на кривых ползучести проявляется в виде их постепенного выполаживания. Поэтому вторая стадия ползучести сливается с первой. Третья стадия — ускоряющая ползучесть — наблюдается лишь при повышенных нагрузках, когда интенсивность разрушения связей между зернами превышает интенсивность увеличения площади существующих контактов и образования новых в процессе деформирования и уплотнения образца. Более четкое разделение стадий ползучести наблюдается при растяжении снега и сдвиге.

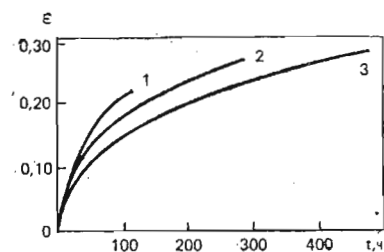


Рис. 3.2. Кривые ползучести снега при одноосном сжатии ($\theta = -10^\circ$): 1 — $\rho = 310 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 156 \cdot 10^2 \text{ Па}$; 2 — $\rho = 285 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 78 \cdot 10^2 \text{ Па}$; 3 — $\rho = 258 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 52 \cdot 10^2 \text{ Па}$

3.2. УПЛОТНЕНИЕ СНЕГА

Снежный покров характеризуется значительной пористостью и обладает способностью непрерывно уплотняться под действием собственной массы вышележащих слоев. В снежном покрове на горизонтальной поверхности деформации снега происходят по принципу компрессионного сжатия, т. е. при одноосном сжатии без возможности бокового расширения. Такое уплотнение моделируется сжатием образца снега в жестком цилиндре — одометре, когда увеличение плотности соответствует величине относительной деформации сжатия (рис. 3.3):

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_t}{h_0} = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_t}, \quad (3.1)$$

где ρ_0 и ρ_t — плотность снега в начале и в конце процесса уплотнения.

Для каждой структурной разновидности снега при заданных плотности и температуре существует определенное критическое напряжение, до достижения которого нагрузка воспринимается ледяным скелетом, состоящим из зерен и связей между ними, без существенного нарушения структуры снега. В момент приложения нагрузки происходит упругое уплотнение, переходящее в вязкое уплотнение с уменьшающейся во времени скоростью. Соответственно уплотнению увеличивается и величина критического напряжения. При превышении указанного напряжения происходит нарушение части связей между зернами, что вызывает скачкообразное увеличение плотности во время приложения дополнительной нагрузки и последующее интенсивное вязкое уплотнение.

Зависимость между величиной нагрузки и скоростью вязкого уплотнения близка к линейной:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_k}, \quad (3.2)$$

где t — время; σ — давление на снег; η_k — коэффициент компрессионной вязкости, который меняется в широких пределах в зависимости от плотности, структуры и температуры снега. Наибольшее влияние на него оказывает плотность снега. Так, по данным наблюдений за оседанием снежного покрова, величина η_k в диапазоне плотностей от 80 до 500 кг/м^3 изменялась от $2 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^9 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Существенное влияние на величину коэффициента компрессионной вязкости оказывает также температура снега. При ее повышении от -30 до -3° η_k уменьшается в 10—100 раз в зависимости от структуры и плотности льда. При дальнейшем увеличении температуры закономерности уплотнения снега усложняются вследствие увеличения жидкоподобного слоя на поверхности кристаллов и появления свободной воды. При большом содержании воды (более 5%) снег под действием нагрузки вначале уплотняется быстро, пока не произойдет объ-

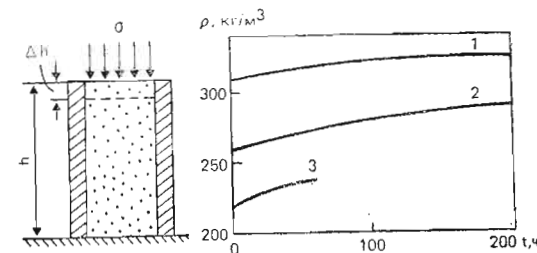


Рис. 3.3. Компрессионное уплотнение снега при $\theta = -6^\circ$ под действием постоянной нагрузки $\sigma = 15 \cdot 10^2 \text{ Па}$ при начальной плотности ρ_0 : 1 — $\rho_0 = 310 \text{ кг/м}^3$; 2 — $\rho_0 = 260 \text{ кг/м}^3$; 3 — $\rho_0 = 220 \text{ кг/м}^3$

единение первоначальных зерен в крупные сrostки. Затем скорость уплотнения резко уменьшается.

При уплотнении мокрого снега по мере отжатия воздуха происходит заполнение пор водой, однако небольшое количество воздуха сохраняется и после того, как уровень свободной воды поднимается выше сжимаемого слоя снега. Вязкость мелкозернистого метелевого снега обычно намного меньше вязкости обыкновенного зернистого снега, уплотненного до такой же плотности, особенно на ранних стадиях метаморфизма. η_k возрастает по мере увеличения размеров зерен снега приблизительно пропорционально третьей степени диаметра зерна D , т. е. $\eta_k \sim kD^3$.

Глубинная изморозь характеризуется большим значением η_k по сравнению с обыкновенным снегом одинаковой плотности и температуры.

При одноосном сжатии с возможностью бокового расширения (см. рис. 3.1) одновременно происходят процессы ползучести и уплотнения. Экспериментальные исследования показывают, что в зависимости от скорости сжатия может происходить пластическая деформация или «разрушительная усадка». При скоростях сжатия, меньших некоторой критической величины $v_{кр}$, зависящей от типа снега и его температуры, сопротивление снега сжатию нарастает плавно и наблюдается его пластическая усадка. Когда же скорость сжатия превышает критическую ($v > v_{кр}$), деформирование снега сопровождается его частичным разрушением. Обычно снег крошится в нижней части образца и происходит его выдавливание из зоны сжатия. Изменение плотности снега при пластической усадке в условиях одноосного сжатия описывается зависимостью

$$\frac{dp}{\rho dt} = \frac{d\epsilon}{dt} (1 - 2\nu) = \frac{\sigma}{3\eta_0}, \quad (3.3)$$

где $\frac{d\epsilon}{dt}$ — скорость относительной деформации сжатия образца; ν — коэффициент вязкого бокового расширения снега (рис. 3.4); σ — давление на снег; $\eta_0 = \frac{1+\nu}{3(1-\nu)} \eta_k$ — коэффициент объемной вязкости.

При трехосном сжатии процесс уплотнения снега выражается уравнением

$$\frac{dp}{\rho dt} = \frac{\sigma_{ср}}{\eta_0}, \quad (3.4)$$

где $\sigma_{ср} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$ — среднее напряжение сжатия (гидростатическое давление); $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — напряжения в направлении трех координатных осей.

При быстром приложении нагрузки (например, при ударе или взрыве) в снеге распространяется ударная волна. Если нагрузка менее предела прочности снега, то ударная волна вызывает лишь упругое сжатие. Остаточных изменений плотности и структуры при этом не происходит. Если же нагрузка превосходит предел прочности, то волна сжатия вызывает перемещение зерен снега и нарушение связей между ними. Снег «раздавливается» и уплотняется, при этом происходит сжатие воздуха в порах. Однако вследствие фильтрации воздуха избыточное его давление через некоторое время исчезает.

Процессы разрушения и уплотнения снега требуют больших затрат энергии, поэтому зона уплотнения под действием динамической нагрузки имеет ограниченные размеры. За пределами этой зоны распространяются лишь упругие волны. Размеры зоны уплотнения определяются величиной и продолжительностью действия нагрузки, площадью ее приложения и, конечно, характеристиками снега: плотностью, структурой и температурой. Зона уплотнения тем больше, чем выше давление, продолжительнее его действие и больше площадь, на которой оно приложено.

На склонах гор одновременно происходят два механических процесса — уплотнение и вязкое течение снежного покрова вниз по склону. Уплотнение происходит так же, как и на горизонтальной поверхности, по принципу компрессионного сжатия. Вязкое течение мало влияет на уплотнение снега. Исходя из теоретических предпосылок, течение снега с установившейся скоростью должно несколько уменьшать коэффициент компрессионной вязкости, т. е. увеличивать скорость компрессионного сжатия, а при переходе в стадию ускоряющейся ползучести должно наблюдаться некоторое разрыхление снега. Однако экспериментально эти эффекты не зафиксированы, видимо, потому, что они лежат в пределах точности измерения плотности снега, которая все еще очень низка.

На выпуклых формах рельефа в снежном покрове возникают растягивающие напряжения. На процессы уплотнения они не оказывают существенного влияния. На вогнутых формах рельефа возникают сжимающие напряжения, действующие параллельно профилю поверхности склона. Эти напряжения существенно увеличивают скорость уплотнения, поэтому плотность снежных пластов на участках действия продольных напряжений сжатия обычно больше, чем плотность тех же пластов на ровных участках склонов и на выпуклых формах рельефа.

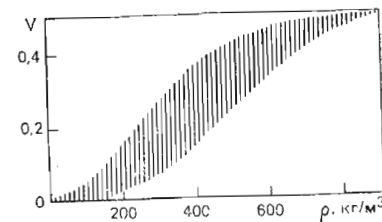


Рис. 3.4. Вероятные пределы изменений коэффициента бокового расширения снега ν при одноосном сжатии (заштрихованная область) в зависимости от плотности

3.3. ПОЛЗУЧЕСТЬ СНЕГА

Ползучестью принято называть медленно и непрерывно увеличивающуюся со временем деформацию твердого тела под воздействием постоянной нагрузки или напряжения при постоянной температуре. Процесс ползучести связан с изменениями формы тела под действием напряжений сдвига. Объемные деформации твердых тел обычно относительно небольшие. Снег, в отличие от твердых тел, легко уплотняется, причем это уплотнение происходит по законам ползучести. Поэтому для снега выделяют два вида ползучести — сдвиговую и объемную.

Сдвиговая ползучесть представляет собой нарастающее во времени изменение формы заданного образца снега под воздействием напряжений сдвига без учета объемных изменений (уплотнения). Объемная ползучесть характеризует процесс уплотнения снега.

На рис. 3.5 изображены типичные кривые сдвиговой ползучести снега при чистом сдвиге и с одновременным сжатием, представляющие зависимость его деформации от

времени при постоянном напряжении. В момент приложения нагрузки, вызывающей в снеге напряжения сдвига, происходит упругая деформация, вслед за которой начинается первая стадия ползучести с уменьшающейся во времени скоростью деформирования. Спустя несколько часов после загрузки начинается вторая стадия ползучести, при которой скорость нарастания величины деформации сдвига близка к постоянной. Эту стадию ползучести называют квазивязким течением.

Граница между первой и второй стадиями ползучести носит условный характер и определяется по кривой ползучести как начало ее линейного участка. Скорость квазивязкого течения тем больше, чем больше величина действующего напряжения сдвига.

После достижения определенной критической величины деформации сдвига начинается третья стадия ползучести, характеризующаяся прогрессирующим нарастанием скорости течения, которое заканчивается нарушением сплошности снега и образованием поверхностей скольжения.

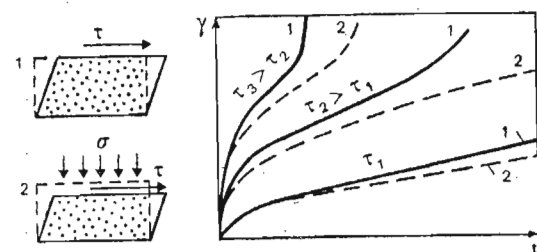


Рис. 3.5. Кривые ползучести снега при плоском сдвиге:

1 — чистый сдвиг; 2 — сдвиг при наличии нагрузки, вызывающей уплотнение снега

Переход в третью стадию ползучести четко проявляется при чистом сдвиге и при сдвиге, происходящем в условиях одноосного растяжения. Если же на плоскости сдвига помимо напряжений действуют сжимающие напряжения, то одновременно с деформациями происходит уплотнение снега вследствие объемной ползучести. По мере уплотнения снег упрочняется, скорость сдвига при заданном напряжении уменьшается и кривые ползучести постепенно выполаживаются.

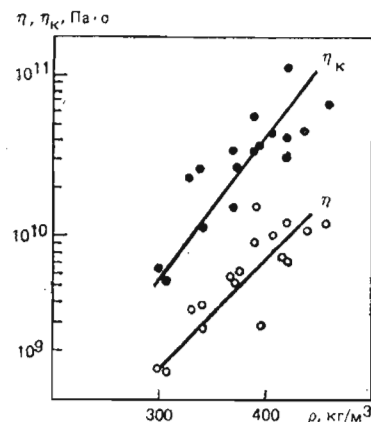


Рис. 3.6. Значения коэффициентов сдвиговой η и компрессионной η_k вязкости снежного покрова на склонах гор при температуре от -1 до -6°

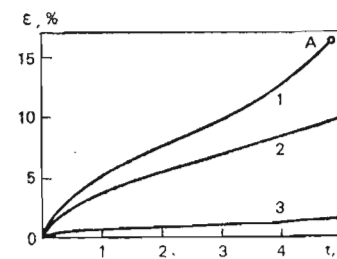


Рис. 3.7. Кривые ползучести снега при растяжении ($\theta = -9,5^\circ$). Начальная плотность снега $\rho_0 = 310 \text{ кг/м}^3$; напряжение: 1 — $\sigma_1 = 12 \cdot 10^3 \text{ Па}$; 2 — $\sigma_2 = 7,5 \cdot 10^2 \text{ Па}$; 3 — $\sigma_3 = 5 \cdot 10^2 \text{ Па}$; А — разрыв образца

Возможны случаи, когда из-за упрочнения снега переход в стадию ускоряющейся ползучести при заданном напряжении сдвига становится невозможным (см. рис. 3.5, пунктирная кривая для τ_2).

Если при испытаниях снега задается постоянная скорость нарастания деформации сдвига, сопротивление снега увеличивается сначала быстро, затем с уменьшающейся скоростью, пока не достигнет величины, соответствующей стадии установившейся ползучести. Длительное деформирование с малой скоростью приводит к повышению сопротивления снега сдвигу из-за его упрочнения. Деформирование со скоростью, большей некоторой критической, приводит со временем к расслаблению снега и его разрушению, что соответствует третьей стадии ползучести.

В стадии квазивязкого течения зависимость скорости деформации сдвига $d\gamma/dt$ от величины действующего напряжения τ близка к линейной:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\tau}{\eta}, \quad (3.5)$$

где η — коэффициент сдвиговой вязкости, который связан с коэффициентами компрессионной вязкости η_k и бокового расширения ν зависимостью

$$\eta = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)} \eta_k. \quad (3.6)$$

На рис. 3.6 представлена зависимость коэффициента сдвиговой и компрессионной вязкостей от плотности снега, вычисленная по скоростям течения естественного снежного покрова на склонах гор в Приэльбрусье. При понижении температуры снега значения этих коэффициентов увеличиваются.

Закономерности ползучести снега при растяжении в общих чертах аналогичны происходящим при сдвиге (рис. 3.7).

Плотность снега в процессе растяжения изменяется мало — или несколько уменьшается, или увеличивается. Отчетливое разуплотнение снега при растяжении наблюдается лишь при переходе в третью стадию ползучести в местах потенциального разрушения снега.

3.4. РАЗРУШЕНИЕ СНЕГА

Пределом прочности материала обычно называется величина напряжения, при которой он разрушается. Для снега установить такую величину затруднительно. Ввиду значительной роли явлений ползучести и уплотнения начало разрушения снега и соответствующая этому величина внутренних напряжений существенно зависят от скорости приложения нагрузки, условий деформирования и других факторов. В ряде случаев возникают затруднения даже с установлением признаков разрушения.

Видимое разрушение деформируемого массива или образца из снега с разделением на части наблюдается при сдвиге и растяжении, когда эти деформации превышают некоторые пределы и приводят к нарушению сплошности путем среза или разрыва. Разрушения при этом могут иметь как хрупкий, так и вязкий характер. Нарушения сплошности происходят также при хрупком разрушении под действием одно- или двухосных сжимающих усилий. Разрушение обычно происходит при больших нагрузках или при быстром деформировании. Во всех остальных случаях деформирования мы имеем дело лишь с разрушением первоначальной структуры снега и возникновением новой структуры без нарушения сплошности. Наиболее четкие

критерии разрушения и соответственно прочностные характеристики можно установить для хрупкого разрушения при больших нагрузках или при быстром деформировании. В этих случаях характеристикой прочности снега является максимальное напряжение в момент разрушения. Если же разрыв или срез сопровождается существенными деформациями и имеет вязкий характер, то критерии разрушения и прочностные характеристики теряют свою четкость.

Чтобы охарактеризовать условия вязкого разрушения снега, необходимо учитывать не только величину напряжений, но и время их действия, величину и скорость нарастания деформации, а также возможность изменения плотности, структуры, реологических параметров и самих прочностных свойств снега в процессе его деформирования. Еще труднее установить критерии разрушения структурных связей между зернами снега под действием сжимающих усилий.

В качестве признака вязкого разрушения чаще всего принимается переход процесса деформирования в стадию прогрессивной ползучести. Признаком разрушения при сжатии может служить переход от вязкого уплотнения к разрушительной усадке.

Критерии разрушения снега описываются в виде зависимостей между компонентами напряжений и параметрами, характеризующими свойства снега и условия его разрушения. Эти зависимости могут быть эмпирическими или основываться на физических моделях применительно к различным видам разрушения.

3.5. СОПРОТИВЛЕНИЕ СНЕГА СДВИГУ

Предельное сопротивление снега сдвигу определяется силами сцепления между зернами и силами внутреннего трения, которые в свою очередь зависят от плотности, строения и температуры снега, а также от условий нагружения и деформирования.

Экспериментальные исследования показывают, что предельное (разрушающее) сопротивление снега плоскостному сдвигу при быстром нагружении $\tau_{пр}$ может быть описано уравнением первой степени от нормального давления p на поверхности среза:

$$\tau_{пр} = C_{мгн} + p \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.7)$$

где $C_{мгн}$ — сопротивление снега быстрому сдвигу при отсутствии напряжений сжатия, называемое условно сцеплением; $\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент внутреннего трения или на поверхности среза.

Параметры $C_{мгн}$ и $\operatorname{tg} \varphi$ определяют на основании полевых или лабораторных испытаний снега на сдвиг. Наиболее простой способ — испытание на сдвиг с помощью сдвиговой рамки и

динамометра (Руководство по снеголавинным работам, 1965). Прямоугольная рамка вдавливается в мягкий снег на подготовленной полке в шурфе до опробуемого горизонта. В плотном снеге подготавливается выступ по размеру сдвиговой рамки, на который она одевается. Вокруг рамки снег расчищается, а контакт снега внутри рамки с нижерасположенным массивом остается нетронутым. Через тросик и динамометр к рамке прилагается плавно нарастающее усилие, и по динамометру фиксируется максимальное значение усилия $N_{ср}$ перед срезом. Направление действия усилия должно быть строго параллельным плоскости сдвига, а время действия минимальным (обычно в пределах 10 с), чтобы свести до минимума деформации ползучести.

Сопротивление снега сдвигу $\tau_{пр}$ определяется по величине сдвигающего усилия, требуемого для среза снега:

$$\tau_{пр} = N_{ср}/F, \quad (3.8)$$

где F — площадь среза, равная площади рамки.

Рамку со снегом взвешивают, после чего устанавливают на первоначальное место и определяют сопротивление сдвигу как силу $\bar{N}$, требуемую для ее повторного сдвига.

По этим данным определяется мгновенное сцепление

$$C_{мгн} = (N_{ср} - \bar{N})/F \quad (3.9)$$

и коэффициент внутреннего трения

$$\text{tg } \varphi = \bar{N}/G, \quad (3.10)$$

где G — вес рамки со снегом.

Аналогичный метод определения параметров сопротивления сдвигу может быть применен в лабораторных условиях на монолитах, вырезанных из снега.

В качестве разновидности способа среза с помощью сдвигающих рамок применяют дополнительную пригрузку снега в рамках. В этом случае можно испытывать один и тот же слой снега или определять сопротивление сдвигу на границе между слоями при различных дополнительных нагрузках на сдвигаемый объем снега. По двум таким испытаниям на сдвиг при различных нагрузках определяются значения $C_{мгн}$ и $\text{tg } \varphi$.

Для определения сопротивления сдвигу можно использовать также данные испытаний снега на двойной срез, на сдвиг в условиях трехосного сжатия или результаты наблюдений за обрушением снега на склонах гор.

Величина $C_{мгн}$ может изменяться в широких пределах в зависимости от плотности, структуры и температуры снега (табл. 3.1).

Сцепление увеличивается с повышением плотности снега, увеличением относительной контактной поверхности между зернами и понижением температуры.

Таблица 3.1

Средние значения коэффициента внутреннего трения $\text{tg } \varphi$, сцепления $C_{мгн}$ и сопротивления снега разрыву σ_p при быстром разрушении

Вид снега	Температура, °С	ρ , кг/м³	$\text{tg } \varphi$	$C_{мгн}$, 10⁵ Па	σ_p , 10⁵ Па
Снежный покров Большого Кавказа*					
Свежевыпавший метелевый	—6,0	80	0,40	0,002	0
	—6,0	120	0,57	0,002	0,01
	—6,0	180	0,55	0,010	0,05
	—6,0	210	0,69	0,010	0,05
	—11,0	180	0,41	0,010	0,06
Крупнозернистый фирнизированный	—2,6	320	0,47	0,030	0,07
Смерзшийся фирнизированный	—7,9	410	—	0,090	0,16
Глубинная изморозь	—2,6	240	0,40	0,020	0,03
	—11,5	270	0,43	0,020	0,04
Снежный покров в Хибинах**					
Мелкозернистый	—2,0	425	—	0,280	0,25
Среднезернистый	—2,0	428	—	0,140	0,19
Глубинная изморозь	—2,0	492	—	0,100	0,09
Смерзшийся мелкозернистый фирнизированный	—2,0	480	—	0,700	0,60
Смерзшийся мелкозернистый фирнизированный	—2,0	480	—	0,500	0,42

* По данным А. М. Эльмесо́ва (Куваева и др., 1967).

** По данным М. Н. Лапте́ва (Савельев и др., 1967).

Предельное (разрушающее) сопротивление снега сдвигу достигается при быстром («мгновенном») срезе. При медленном сдвиге сопротивление не достигает такой величины и разрушение снега может происходить при напряжениях сдвига, существенно меньших величины $C_{мгн}$, только срез произойдет не сразу, а спустя некоторый промежуток времени после приложения сдвигающего усилия.

Предельные сопротивления снега сдвигу при длительном действии усилий описываются зависимостью

$$\tau_{пр}(t) = C(t) + p \text{tg } \varphi(t), \quad (3.11)$$

где $\tau_{пр}(t)$ — предельное напряжение сдвига, при котором происходит разрушение снега спустя время t после приложения сдвигающего усилия; $C(t)$ и $\text{tg } \varphi(t)$ — сила сцепления и угол внутреннего трения, соответствующие этой длительности действия напряжений сдвига и давления.

Величина длительного сцепления уменьшается с увеличением времени протекания процесса деформирования до разрушения.

Кривые, характеризующие уменьшение величины сцепления с увеличением продолжительности деформирования до разрушения (рис. 3.8), напоминают кривые релаксации напряжений. Они указывают на то, что при сдвиге без давления происходит постепенное расслабление связей между зернами и уменьшение прочности снега с нарастанием деформации сдвига до разрушения. При сдвиге с одновременным действием давления на поверхности ожидаемого среза закономерности изменения $C(t)$

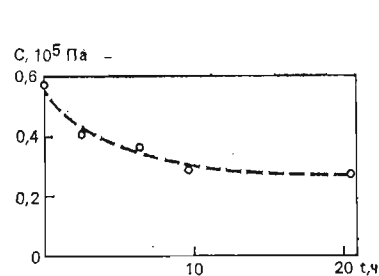


Рис. 3.8. Уменьшение сцепления C в зависимости от времени действия сдвигающего усилия до разрушения (по данным опытов на плоский сдвиг снега плотностью $\rho = 410 \text{ кг/м}^3$, $\theta = -3^\circ$ и при малом давлении)

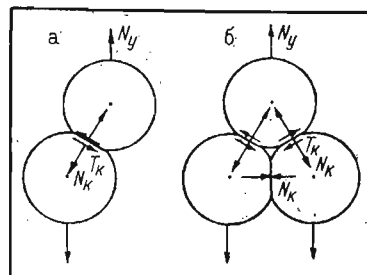


Рис. 3.9. Схема взаимодействия зерен снега при растяжении:
а — при передаче усилия через одну связь; б — то же через две (три) связи

усложняются, так как на расслабление связей накладывается их упрочнение в результате уплотнения снега под действием давления p .

Коэффициент внутреннего трения $\text{tg } \varphi(t)$ также изменяется в зависимости от величины и времени действия усилий сжатия и сдвига. Однако точно оценить эти изменения затруднительно, так как деление общего сопротивления снега сдвигу на сцепление и трение носит формальный характер. Для практических целей обычно пользуются величиной коэффициента внутреннего трения, определяемой при быстром срезе. Изменение величины $\text{tg } \varphi(t)$ необходимо учитывать лишь при повышенных значениях p , когда за время действия усилий сдвига может произойти ощутимое увеличение плотности снега и, следовательно, его упрочнение.

3.6. СОПРОТИВЛЕНИЕ СНЕГА РАЗРЫВУ

Быстрое нарастание нагрузки в условиях одноосного растяжения приводит к хрупкому разрыву образца снега. Поверхность разрыва неровная и проходит чаще всего примерно перпендикулярно к направлению действия растягивающего усилия. Предельное сопротивление снега растяжению перед разрывом

по своей абсолютной величине несколько меньше или близко к величине сцепления при сдвиге (см. табл. 3.1).

В момент приложения к образцу снега растягивающего усилия в ледяных связях возникают напряжения растяжения и сдвига, а в некоторых случаях и напряжения сжатия (рис. 3.9), которые обуславливают деформации ползучести зерен снега и ледяных связей и образца в целом. При увеличении внешнего растягивающего усилия в некоторых из связей напряжения достигают предела прочности льда и эти связи начинают разрушаться. Вслед за этим может наступить разрыв образца.

На основании аналитических расчетов определено, что разрыв образца снега происходит при увеличении растягивающего напряжения до величины

$$\sigma_{\text{сн*}} = f a_k \sigma_{\text{л*}}, \quad (3.12)$$

где $\sigma_{\text{л*}}$ — предельное сопротивление льда (ледяных связей) разрыву; a_k — относительная контактная поверхность; f — численный коэффициент, зависящий от координационного числа структуры (при $i_k \leq 4$ $f = 0,5$; при $i_k > 6$ $f = 0,67$).

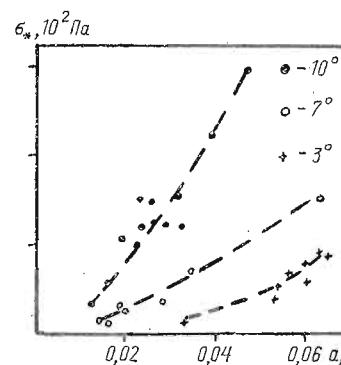


Рис. 3.10. Зависимость сопротивления снега разрыву σ_k от величины относительной контактной поверхности a_k

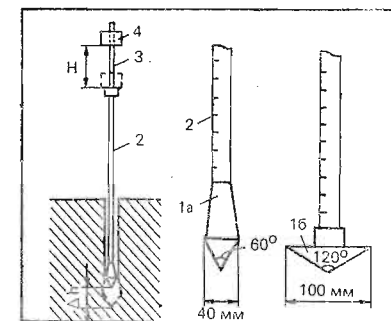


Рис. 3.11. Ударный пенетrometer:
1а — стандартный наконечник;
1б — наконечник для мягкого снега;
2 — ударная штанга; 3 — направляющий шток; 4 — падающий груз

На рис. 3.10 показана зависимость экспериментально определенного сопротивления снега разрыву от величины относительной контактной поверхности. Видно четкое увеличение сопротивления снега разрыву с увеличением относительной контактной поверхности. Существенно также увеличение прочности снега по мере понижения его температуры.

При длительном действии растягивающего усилия предельное сопротивление разрыву уменьшается с увеличением про-

должительности растяжения. Определенным пределом длительного сопротивления растяжению снег не обладает. Даже небольшое, постоянно действующее растягивающее усилие со временем приведет к разрыву снежного образца, но чем меньше растягивающее напряжение, тем продолжительнее процесс ползучести, заканчивающийся в конечном счете разрывом. Поэтому для оценки возможного сопротивления снега разрыву необходимо учитывать время действия напряжений растяжения и скорости их нарастания или скорость деформации растяжения.

3.7. ТВЕРДОСТЬ СНЕГА

Понятием «твердость снега» пользуются для характеристики несущей способности снежного покрова и ориентировочной оценки механических свойств и прочности снега. Под твердостью обычно понимается способность материала сопротивляться проникновению в него другого, не получающего остаточных деформаций тела. Применительно к снегу твердость характеризуется сопротивлением снега внедрению в него измерительного инструмента — пенетрометра.

Для определения прочности снега применяется ударный пенетрометр — зонд, который погружается в снег под действием падающего груза (рис. 3.11). Такой пенетрометр был предложен впервые в Швейцарии Р. Хэфели и теперь широко используется для исследований механических свойств снежного покрова. Зонд состоит из набора металлических градуированных штанг, комплекта конусных наконечников, ударного груза, направляющей для падающего груза и приспособления для передачи ударной нагрузки на штангу и наконечник. Пенетрометр позволяет определять послойно твердость снежного покрова на всю его толщину без рытья шурфов и извлечения кернов и получить профиль распределения твердости по глубине с выделением всех слоев толще 3 см. Прослойки и ледяные корки толщиной менее 3 см также фиксируются, однако показатели их твердости получаются искаженными из-за их разрушения под действием наконечника.

У стандартного ударного пенетрометра наконечники имеют конический вид с углом в вершине конуса 60°. Масса падающего груза 3 или 1 кг. Для испытаний очень рыхлого снега применяется увеличенный наконечник диаметром 10 см с углом в вершине конуса 120°. Масса падающего груза равна 0,5 кг, длина основной штанги 1 м. Такую же длину имеют дополнительные штанги, которые служат для удлинения рабочей штанги.

Ударный пенетрометр устанавливается вертикально на поверхности снежного покрова, груз поднимается на заданную высоту и отпускается. Он падает вдоль направляющей штанги и ударяет о переходную муфту, передающую импульс силы на штангу и наконечник, которые погружаются на некоторую глу-

бину Δh , после чего груз снова поднимается и осуществляется следующий удар. После каждого удара или серии ударов определяется глубина погружения наконечника в снег. Твердость снега определяется по формуле

$$\sigma_r = \left(\frac{m_r H}{\Delta h} + m_r + m_z \right) \frac{g}{F}, \quad (3.13)$$

где m_r — масса падающего груза; m_z — масса всех деталей зонда, перемещающихся под действием силы удара (наконечника, основной штанги и направляющей вместе с соединениями); g — ускорение силы тяжести; F — площадь поперечного сечения наконечника; H — высота падения груза; Δh — погружение зонда при одном ударе.

При использовании ударного зонда следует иметь в виду, что определяемая величина твердости σ_r не является строгим физическим параметром снега. Она характеризует лишь сопротивление снега проникновению зонда при заданных параметрах зонда.

Несмотря на условность получаемых характеристик твердости снега, метод пенетрации используется весьма широко как наиболее простой и доступный для полевых условий способ оценки относительной прочности различных слоев снежного покрова. Этот метод позволяет отметить даже относительно небольшие изменения механических свойств снега.

Обнаружена удовлетворительная коррелятивная связь между твердостью снега и его прочностными характеристиками — сцеплением, сопротивлением разрыву и раздавливанию.

Наличие коррелятивных связей между показателями твердости и другими характеристиками снега позволяет значительно упростить полевые исследования механических свойств снежного покрова, ограничиваясь в ряде случаев лишь пенетрационными методами испытаний.

ЗАРОЖДЕНИЕ ЛАВИН

4.1. ЗОНА ЗАРОЖДЕНИЯ И ПУТЬ ДВИЖЕНИЯ ЛАВИН

Участок склона и долины, где зарождается, движется и останавливается снежная лавина, называют лавиносбором. В лавиносборах обычно можно выделить три зоны — зарождения, транзита (пути движения) и отложения (выброса) лавинного потока (рис. 4.1). Границы между этими зонами нечеткие и носят условный характер. Так, зона отложения конкретной лавины может стать зоной транзита для более мощной лавины.

Зона зарождения лавин (лавинный очаг) расположена в верхней части лавиносбора и представляет собой участок горного склона, где накапливается масса снега, которая может потерять устойчивость и образовать лавину. Чаще всего это чашеобразное углубление в привершинной части гор типа кара, денудационной воронки или расширенной части эрозионного вреза. Однако лавины могут образовываться и на ровных склонах. Зоны зарождения лавин обычно приурочены к выглаженным склонам без леса крутизной более 30° . Нередки случаи, когда лавины зарождаются на более пологих склонах. Лавины могут возникать и на поросших лесом склонах. На процесс лавинообразования помимо крутизны и характера поверхности склона определяющее влияние оказывает количество и состояние снега.

Нарушение устойчивости и образование лавин наблюдается на склонах крутизной от 15 до 60° . На более крутых склонах снег плохо удерживается, большинство снежинок во время снегопада скатывается вниз и большие массы снега откладываются относительно редко. Поэтому окаймляющие верхнюю часть зоны зарождения лавин скалы и крутые участки склонов могут служить источником дополнительного снегонакопления. Наиболее лавиноопасными считаются склоны крутизной от 25 до 50° .

Путь движения лавины может быть канализованным в четко выраженном ложе или русле (лавинном лотке), но может располагаться и на относительно ровном склоне между зонами зарождения и отложения лавины. Длина зон транзита у канализованных лавин больше, чем у неканализованных. Лавинный путь может иметь несколько ветвей, когда в главный канал впадают боковые каналы, каждый из которых начинается в отдельной зоне зарождения лавин. Возможны, правда, случаи, когда несколько лавинных путей питаются из одного лавинного очага. При прохождении слабоканализованных

лавин через заросший лесом склон в направлении их движения возникают полосы, лишенные древесной растительности, — лавинные прочесы.

Зона отложения канализованных лавин часто имеет конусообразный вид (конус выноса лавины). В месте, где лавинный поток выходит на выполаживающийся склон, скорость движения потока вследствие увеличения сил сопротивления замедляется, поток расширяется и происходит частичное отложе-

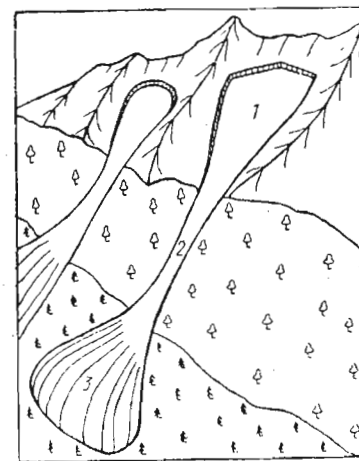


Рис. 4.1. Схема лавиносбора: 1 — зона зарождения лавин; 2 — зона транзита; 3 — зона отложения снега

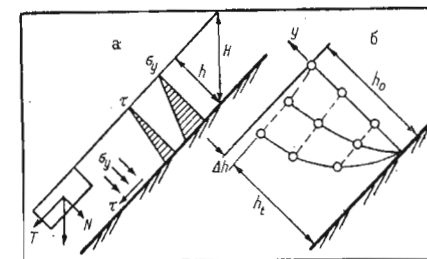


Рис. 4.2. Схема распределения напряжений (а) и эпюра перемещений (б) в снежном покрове на склоне

ние снега. За счет этих отложений (особенно многолетних), вовлекаемых лавинами в движение частиц горных пород, формируется минеральный конус выноса с характерными для него очертаниями — выпуклым, расширяющимся в плане валом с уменьшающейся крутизной и выпуклым в поперечных профилях. В узких долинах лавины из одного склона могут проходить по ее дну и подниматься на противоположный склон, где и будет располагаться зона отложения.

У неканализованных лавин зона отложения находится у подножия или на пологом склоне в нижней части лавиносбора.

4.2. УПЛОТНЕНИЕ И ТЕЧЕНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА СКЛОНАХ

Снежный покров на склонах гор непрерывно изменяется в результате процессов уплотнения, течения и перекристаллизации. Все эти процессы оказывают существенное влияние на устойчивость снежного покрова.

Вес любого блока снега, условно выделенного из снежного покрова на склоне, можно разложить на две составляющие — усилие, перпендикулярное склону, и усилие, направленное параллельно склону (рис. 4.2, а). Эти усилия обуславливают наличие в снежном покрове напряжений сжатия перпендикулярно склону σ_y и напряжений сдвига τ . На ровном склоне эти напряжения определяются плотностью ρ_i и толщиной h_i слоев снега над рассматриваемой поверхностью и углом наклона склона ψ :

$$\sigma_y = \sum_{y=0}^h \rho_i g h_i \cos \psi, \quad (4.1)$$

$$\tau_y = \sum_{y=0}^h \rho_i g h_i \sin \psi,$$

где g — ускорение силы тяжести; y — расстояние от поверхности склона до рассматриваемой поверхности; h — общая толщина снежного покрова.

Напряжения σ_y вызывают одноосное сжатие снега без возможности бокового расширения (компрессионное уплотнение):

$$\frac{d\varepsilon_y}{dt} = \frac{d\rho}{\rho \cdot dt} = \frac{\sigma_y}{\eta_k}, \quad (4.2)$$

где $\frac{d\varepsilon_y}{dt}$ — скорость относительного сжатия; η_k — коэффициент компрессионной вязкости снега.

Уплотнение снега сопровождается понижением поверхности снежного покрова. Скорость осадки поверхности $v_{y=h}$ определяется уравнением

$$v_{y=h} = \int_0^h \frac{\sigma_y}{\eta_k} dy = \frac{\bar{\rho} g h^2 \cos \psi}{2 \bar{\eta}_k}, \quad (4.3)$$

где $\bar{\rho}$ — средняя плотность снега по толщине снежного покрова; $\bar{\eta}_k$ — среднее значение коэффициента компрессионной вязкости.

Как видно из этого уравнения, скорость осадки поверхности снежного покрова определяется прежде всего его толщиной и величиной коэффициента η_k , который в свою очередь изменяется в зависимости от плотности и температуры снега. В естественных условиях скорость понижения поверхности снежного покрова составляет от нескольких миллиметров в сутки для плотного снега до десятков сантиметров для свежего рыхлого снега. Под действием быстро увеличивающейся нагрузки во время интенсивного снегопада, а также вследствие изменения структуры снега в процессе метаморфизма в некоторых слоях

снежного покрова может происходить механическое разрушение первоначальных структурных связей между зернами, сопровождающееся скачкообразным увеличением плотности этого слоя и резким оседанием поверхности снежного покрова.

Наличие напряжений сдвига вызывает вязкое течение снежного покрова вниз по склону. Скорость перемещения слоя снега, расположенного на расстоянии y от поверхности склона, составляет

$$u_y = \int_0^y \frac{\tau_y}{\eta} dy = \frac{\bar{\rho} g \sin \psi}{\eta} y (h - y), \quad (4.4)$$

где η — коэффициент сдвиговой вязкости.

Скорость перемещения поверхности снежного покрова вниз по склону увеличивается по мере увеличения крутизны склона и мощности снежного покрова. По мере уплотнения снега его вязкость увеличивается и соответственно скорость перемещения уменьшается. Повышение температуры снега увеличивает скорость течения покрова. Увеличение скоростей течения наблюдается также в процессе метаморфизма снега, если этот процесс развивается в сторону уменьшения относительной контактной поверхности зерен и разупрочнения снега. Реальные скорости вязкого течения поверхностных слоев снежного покрова на склонах чаще всего находятся в пределах до 1 см/сут. В весеннее время они могут повышаться до 10 см/сут и более, однако при скоростях более 10 см/сут вероятен переход в стадию ускоряющейся ползучести с нарушением устойчивости снежного покрова (рис. 4.2, б).

Помимо напряжений σ_y и τ в снежном покрове действуют напряжения параллельно поверхности покрова:

$$\sigma_x = \frac{v}{1 - v} \sigma_y, \quad (4.5)$$

где v — коэффициент бокового расширения.

На неровных склонах возникают дополнительные напряжения сжатия или растяжения, обусловленные изменчивостью скоростей течения снежного покрова в зависимости от угла наклона и пространственной неоднородностью высоты, плотности и вязкости снега. На выпуклых формах рельефа создаются условия для возникновения растягивающих усилий, а на участках с вогнутой поверхностью возникают дополнительные напряжения сжатия (рис. 4.3). Напряжения растяжения не оказывают существенного влияния на скорость уплотнения снега, а вот дополнительные напряжения сжатия могут существенно ускорять процесс уплотнения снега. В результате этого плотность снежного покрова на вогнутых участках склонов зачастую бывает больше, чем на вблизи расположенных гладких склонах и участках с выпуклой формой рельефа.

4.3. ПОКАЗАТЕЛИ УСТОЙЧИВОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Условия предельного равновесия и причины нарушения устойчивости снежного покрова во многом определяются состоянием и прочностными характеристиками снега, которые зависят в свою очередь от условий формирования и метаморфизма снежного покрова.

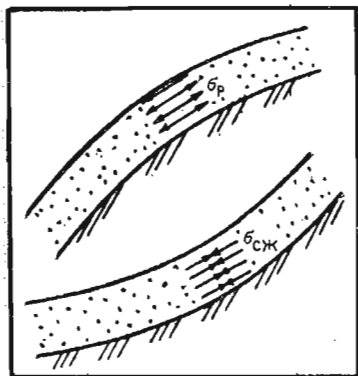


Рис. 4.3. Дополнительные напряжения сжатия $\sigma_{сж}$ и растяжения $\sigma_{р}$ в снежном покрове на неоднородных формах рельефа

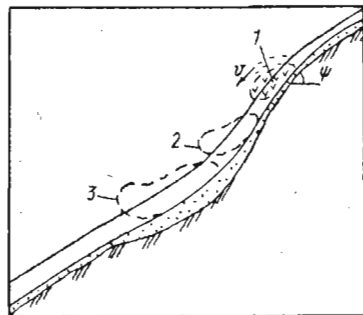


Рис. 4.4. Нарушение устойчивости сухого рыхлого снега: 1 — начальный объем снега, который теряет устойчивость и начинает соскальзывать со скоростью v ; 2 и 3 — последовательные контуры вовлеченного в движение снега

Если снег выпадает при низкой температуре воздуха и слабом ветре, то на склонах откладывается слой рыхлого сухого снега, обладающего пониженным сцеплением. Пылевидный рыхлый снег откладывается также во время метелей в зонах ветровой тени. На локальном участке склона крутизной больше угла внутреннего трения снега по мере отложения рыхлого снега сдвигающие усилия могут достигать предела сопротивления снега сдвигу. На таком участке некоторая масса начинает соскальзывать, оказывая давление на расположенный ниже по склону массив снега и вовлекая его в движение (рис. 4.4).

Условие нарушения устойчивости рыхлого сухого снега можно выразить в виде

$$h \rightarrow h_{кр} \text{ при } \psi > \varphi, \quad (4.6)$$

где ψ — угол наклона поверхности, подстилающей слой рыхлого снега; φ — угол внутреннего трения в снеге; h — фактическая толщина слоя рыхлого снега; $h_{кр}$ — критическая (предельная)

толщина слоя рыхлого снега, при которой происходит нарушение его устойчивости;

$$h_{кр} = \frac{C}{\rho g (\sin \psi - \cos \psi \operatorname{tg} \varphi)}, \quad (4.7)$$

где C — величина, характеризующая сцепление зерен снега (не смотря на рыхлое состояние, снег обладает некоторым сцеплением).

Рыхлое состояние снега на склонах наблюдается относительно редко. Обычно снег на склонах гор состоит из связанных между собой зерен (кристаллов) и способен оказывать сопротивление внешним нагрузкам. В таких случаях снежный покров можно условно рассматривать как лежащую на склоне плиту. Неоднородный по глубине покров при наличии четко выраженных контактов между слоями иногда рассматривают как многослойную плиту.

Отношение предельного сопротивления сдвигу снежной плиты по основанию или по ослабленной контактной поверхности $\tau_{ср}$ к величине действующего на этой поверхности напряжения сдвига τ называют показателем локальной устойчивости:

$$\bar{K} = \frac{\tau_{ср}}{\tau} = \frac{C_y}{G \sin \psi} + \frac{f_y}{\operatorname{tg} \psi}, \quad (4.8)$$

где C_y и f_y — сцепление и коэффициент трения на потенциальной

поверхности среза; ψ — угол наклона склона; $G = \sum_y \rho_i g h_i$ — масса снежной толщи над поверхностью среза; y — расстояние от поверхности склона до рассматриваемой потенциальной поверхности среза; ρ_i и h_i — плотность и толщина слоев снега; h — общая толщина снежного покрова.

Показатель локальной устойчивости можно условно представить себе как «коэффициент устойчивости» (Руководство по снеголавинным работам, 1965) снежной плиты на заданном ровном участке склона после того, как вокруг этого участка будет вырыта траншея и будет ликвидировано силовое взаимодействие рассматриваемого участка плиты с соседними.

Величина показателя локальной устойчивости снежного покрова характеризует своеобразный «запас» его устойчивого состояния. При уменьшении этого показателя до единицы возникают условия для нарушения устойчивости снежного пласта. Однако у плит из твердого плотного снега возможно сохранение устойчивого состояния и при показателях локальной устойчивости меньше единицы за счет краевых усилий. На ограниченных по площади участках снежная плита может находиться в локально неустойчивом состоянии, а избыток усилий сдвига здесь должен компенсироваться дополнительными удерживающими усилиями на контуре локально неустойчивого участка —

силами сопротивления снега сжатию у нижнего края плиты, разрыву у верхнего края и срезу по бокам (рис. 4.5).

Для оценки устойчивости плиты из плотного снега надо сначала определить показатели локальной устойчивости для наиболее опасных участков. Для многослойной плиты определяется контактная поверхность, где показатель устойчивости имеет наименьшее значение. Если локальная устойчивость обеспечена ($\bar{K} > 1$) для всех участков плиты, то это указывает на общую устойчивость снежного покрова. Если же имеются участки, где локальная устойчивость не обеспечена ($\bar{K} < 1$), то необходимо определить обобщенный показатель устойчивости K на нем, отражающий отношение суммы удерживающих сил к сумме сил, стремящихся сдвинуть плиту вниз по склону:

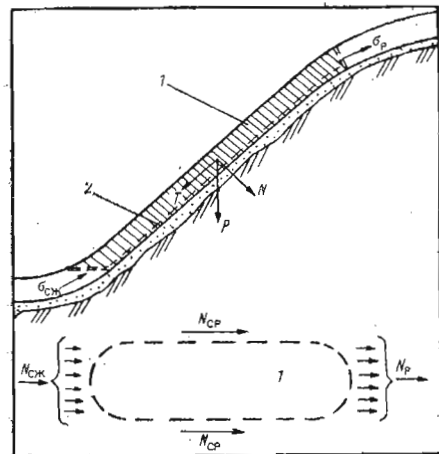


Рис. 4.5. Нарушение устойчивости плиты из плотного снега:
1 — локально неустойчивый участок плиты; 2 — поверхность скольжения плиты

$$K = \frac{\Sigma N_{уд}}{T} = \bar{K}_{ср} + \frac{N_{сж} + N_p + N_{ср}}{T}, \quad (4.9)$$

где $T = \int_{F_n} \tau dF$ — составляющая собственной массы плиты на участке локальной неустойчивости F_n , направленная параллельно поверхности основания плиты; $\bar{K}_{ср}$ — средний показатель локальной устойчивости выделенного участка, где $\bar{K} < 1$; $N_{сж}$, N_p и $N_{ср}$ — суммарные величины сопротивления сжатию, разрыву и срезу снежной плиты по краям локально неустойчивого участка.

Несмотря на кажущуюся простоту расчетной формулы для определения показателя локальной устойчивости (4.8), практическое использование этого показателя для оценки устойчивости реального снежного покрова на склонах гор затруднено. Особую сложность представляет определение величин сцепления C_u и коэффициента трения f_u на потенциальных поверхностях среза. Во-первых, определение этих величин на лавиноопасных склонах сложно физически, а подчас просто невозможно по требованиям обеспечения безопасности ведения работ. Во-вторых, существующие методики определения величины сцепления не обеспечивают получения достоверных сведений.

Так, экспериментально доказано, что величина сцепления, определяемая сдвиговой рамкой площадью 100 см², примерно в 2 раза больше, чем при сдвиге рамок площадью 1 м². При длительном действии сдвигающего усилия величина сцепления может снизиться в 2 раза и более по сравнению со сцеплением, определяемым при быстром срезе снега. В результате получается, что фактическое обрушение снежного покрова наблюдается при весьма высоких (порядка 4) показателях локальной устойчивости, если в расчетные формулы для расчета этих показателей подставляется значение «мгновенного» сцепления, определяемого экспериментально при быстром сдвиге.

Чтобы приблизить экспериментально определяемые величины сцепления и коэффициента трения к реальным характеристикам снежного покрова, Э. П. Исаенко, А. В. Иванов и А. С. Васильев (1975) предложили вводить в расчеты устойчивости снежного покрова поправочные коэффициенты — масштабный $k_m = 0,5$ и учитывающий продолжительность действия нагрузки $k_t = 0,3 \div 1,0$. Такое предложение является правильным, однако предложенные численные значения поправочных коэффициентов и способ их учета в расчетах требуют дальнейшего уточнения и обоснования. Одна из ближайших задач лавиноведения — разработка унифицированных приборов и единой стандартной методики определения прочностных характеристик снега. Это даст возможность создать надежные способы измерения реальных характеристик снежного покрова, которые позволят более точно оценивать устойчивость снега на склонах.

Во время таяния снега и при выпадении жидких осадков нарушение устойчивости снежного покрова может происходить вследствие разрушения ледяных связей между зернами снега и превращения снега в рыхлую массу, в то время как показатель устойчивости снежного покрова в целом будет оставаться высоким. Нарушение устойчивости обычно начинается в поверхностном увлажненном слое. Определяющими характеристиками устойчивости рыхлого влажного снега в этом случае становятся степень увлажненности снежного покрова и предельное сопротивление снега сжатию с учетом его увлажнения.

4.4. ПРИЧИНЫ НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

Одна из основных причин этого — увеличение массы снега до критической величины в результате выпадения осадков и метелевого снегопереноса. Вторая причина — уменьшение удерживающих сил в результате процессов метаморфизма и ползучести снега.

Нарушение устойчивости рыхлого сухого снега наступает при увеличении его толщины до критической (см. формулу (4.7)). Происходит это чаще всего во время снегопадов на склоны крутизной 30—40°. Потерявшая сцепление с основа-

нием масса начинает с ускорением перемещаться вниз по склону. Сначала по мере нарастания слоя увеличивается интенсивность вязкого уплотнения и течения снега, что приводит к мелким нарушениям сплошности снежного покрова. В какой-то момент наступают критические условия, когда некоторая масса теряет сцепление с основанием и начинает двигаться с ускорением, оказывая дополнительное динамическое воздействие на расположенный ниже по склону участок снежного покрова. Это давление в свою очередь нарушает устойчивость встречаемого на пути массива снега и вовлекает его в движение. В результате возникает расширяющийся в плане поток снега, который на крутом склоне движется с возрастающей скоростью, захватывая все новые и новые его порции. Набрав скорость, поток рыхлого снега может вовлечь в движение и слои старого, более плотного снега. Однако объемы лавин из рыхлого сухого снега обычно относительно небольшие, так как на склонах редко скапливаются его большие массы. Чаще всего свежий снег откладывается в виде снежных плит, обладающих повышенным по сравнению с рыхлым снегом сцеплением.

Снежные плиты могут состоять из снега любого вида — мягкого, пушистого свежего снега, уплотненного метелевого снега, твердого старого или мокрого весеннего снега. Конкретные причины и механизм нарушения устойчивости снежных плит во многом зависят от их плотности и прочности характеристик, которые в свою очередь определяются условиями формирования снежного покрова и последующими процессами уплотнения и метаморфизма снега. Рассмотрим два крайних случая — нарушение устойчивости плит из мягкого снега малой плотности (до 200 кг/м^3) и плит из плотного твердого снега.

Предельные сопротивления плиты из мягкого снега сжатию и растяжению небольшие (при $\rho = 200 \text{ кг/см}^3$ $\sigma_p \approx \sigma_{сж} < 0,01 \text{ МПа}$). В связи с этим суммарные величины сил сопротивления $N_{сж}$, N_p и $N_{ср}$ (см. формулу (4.9)) по краям потенциально неустойчивого участка плиты не оказывают существенно влияния на устойчивость снежного покрова.

Нарушение устойчивости плит из снега малой плотности происходит чаще всего на контакте свежего снега с более плотным старым из-за уменьшения локальной устойчивости (см. формулу (4.8)) вследствие увеличения напряжения сдвига за счет выпадающего свежего или отложения метелевого снега. На склоне с переменным профилем условия для нарушения устойчивости возникают в первую очередь на крутых его участках. Пришедшая в движение масса снега захватывает затем снег и на более пологих участках, где он находился в устойчивом состоянии (рис. 4.6). Возникшая лавина может на своем пути вовлекать в движение старый уплотненный снег. Обрушение происходит обычно во время снегопада или метелевого снеготеноса, а также в течение ближайших часов после окончания снегопада и метелевого снеготеноса. Если в этот период

не происходит обрушения, то вероятность нарушения устойчивости мягкой плиты резко уменьшается, так как происходит уплотнение снега и увеличивается предельное сопротивление сдвигу плиты по основанию.

Плита из твердого снега может находиться в локально неустойчивом состоянии. Обрушение происходит чаще всего вследствие нарушения ее целостности и резкого уменьшения сил сопротивления на краях плиты. Непосредственной причиной

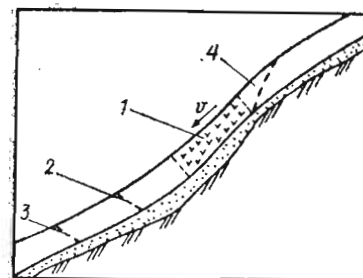


Рис. 4.6. Нарушение устойчивости плиты из слабо уплотненного снега:

1 — начальный объем снега, теряющий сцепление с нижним слоем снега; 2, 3 — последовательные контуры участков плиты, вовлекаемых в движение; 4 — участок плиты, теряющий устойчивость после соскальзывания объема 1

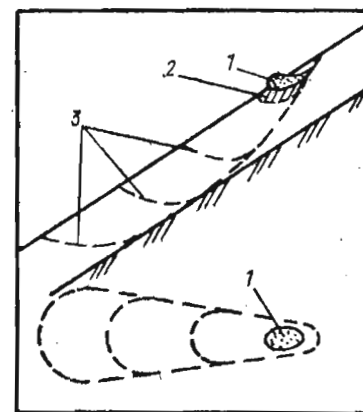


Рис. 4.7. Зарождение лавины из мокрого снега:

1 — начальный объем снега, потерявший сцепление с основанием; 2 — зона, в которой может произойти скачкообразное уплотнение под действием дополнительной нагрузки от пришедшего в движение объема 1; 3 — последовательные контуры вовлекаемого в движение снега

нарушения устойчивости плиты могут быть различные случайные факторы (например, нарушение сплошности плиты при резкой неоднородной осадке нижерасположенного слоя снега, излом плиты при проходе лыжника или при искусственном воздействии на снежный покров, образование в зоне растяжения трещины при быстром понижении температуры). Предельное состояние может быть достигнуто и при постепенном перераспределении внутренних напряжений растяжения и сжатия в плите в результате процессов метаморфизма, ползучести и ослабления связей ее с основанием.

Во время дополнительных осадков и метелевого снеготеноса увеличение массы плиты может приводить к разрыву пласта в зоне растяжения. Возможны также случаи, когда вначале

произойдет излом плиты в зоне неравномерной осадки, а разрыв пласта будет вторичным.

Характерная особенность обрушения снежных плит — одновременное нарушение устойчивости и движение на значительном по площади участке снежного покрова, сопровождающееся разрывом пласта по верхней границе этого участка. Граница отрыва представляет собой ломаную линию или неровную дугу в верхней части лавиносбора. Поверхность отрыва близка к плоскости, перпендикулярной к основанию снежной плиты. Наибольшие плиты обрушаются на склонах крутизной 30—45°. При движении плита быстро разрушается, дробится и превращается в снежный поток. Нижняя часть потока состоит из обломков плиты, и его плотность близка к плотности потерявшего устойчивость снежного покрова. Верхняя часть потока состоит из легких частиц раздробленной снежной плиты, плотность потока в этой части убывает с высотой.

В весенний период через снежный покров просачивается вода, образующаяся при таянии верхних слоев. Вода перемещается в виде пленок по поверхности зерен или фильтруется между зернами. При этом зерна округляются, а ледяные связи между ними разрушаются и заменяются водными пленками, что приводит к уменьшению сил сцепления и сопротивления снега сжатию, что может вызвать нарушение устойчивости снежного покрова. Начальным импульсом нарушения устойчивости снега служат падение куска снежного карниза, случайно движущийся по склону камень или ком снега, увеличение содержания воды в снеге, резкое оседание снега на локальном участке или искусственное воздействие на снежный покров. В результате действия какого-либо из перечисленных факторов на небольшом участке снежного покрова нарушаются первоначальные связи между зернами снега и образуется зона неустойчивого состояния (рис. 4.7). Масса снега в этой зоне начинает сползать вниз, оказывая дополнительное силовое воздействие на расположенный под ней и ниже по склону снежный покров, что увеличивает напряжения сжатия и сдвига на границе между зоной неустойчивого состояния и ненарушенным снежным покровом.

Если напряжение сжатия превышает сопротивление снега сжатию, происходит скачкообразное уплотнение снега в прилегающей зоне, сопровождаемое нарушением начальных структурных связей между его зернами. При этом нарушается сцепление вновь уплотненной зоны с ненарушенным снежным покровом, что облегчает частичное соскальзывание нарушенной массы снега и последующее нарастание давления на расположенный ниже ненарушенный покров. После этого процесс может повторяться с нарушением все новых зон снежного покрова и вовлечением их в соскальзывающую массу снега. Работа, совершаемая движущимся снегом, расходуется на его частичное таяние, особенно на контакте скольжения. Это вызывает допол-

нительное увлажнение, уменьшает сопротивление сдвигу и способствует увеличению скоростей оползания, что в свою очередь повышает силы давления сползающего снега на ненарушенный снежный покров и способствует вовлечению в движение новых масс снега и расширению движущегося потока в плане.

В условиях интенсивного неравномерного снеготаяния и концентрации стока талой воды возможно образование водоснежных потоков, которые по своему составу и характеру движения занимают промежуточное положение в ряду катастрофических склоновых процессов между снежными лавинами и селевыми потоками. Наиболее существенным отличием водоснежных потоков от лавин из мокрого снега является то, что в их образовании ведущую роль играет появление в снеге свободной воды и потоки могут возникать на относительно пологих склонах, где возникновение лавин невозможно.

Водоснежные потоки характерны для северных горных районов, в частности для Хибинского горного массива, и арктических островов, где к периоду интенсивного снеготаяния могут сохраняться мощные толщи холодного снега с водоупорными поверхностями. Мощные потоки образуются не регулярно, а лишь эпизодически, один раз в 5—50 лет, при особых сочетаниях состояния снежного покрова, условий снеготаяния и стока воды.

В Хибинах, где проводились наиболее детальные исследования, выделено три типа водоснежных потоков в зависимости от условий их образования.

1. Течение насыщенного водой верхнего слоя снежной толщи по поверхности нижележащего слоя снега — возникает в руслах водотоков крутизной от 5 до 25° и на относительно пологих плоских или слабовогнутых участках склонов в начальный или наиболее интенсивный период таяния снега, а также при выпадении жидких осадков. Течение обуславливается тем, что на тех участках, где уровень фильтрационных вод приближается или выходит на поверхность, снег насыщается водой и теряет устойчивость.

2. Течение разжиженной снежной массы по каналу — наиболее часто начинается на широких выположенных днищах цирков и каров с уклонами менее 5°, где при таянии создаются условия для того, чтобы вся толща снега пропиталась водой. Ниже таких выположенных участков обычно имеются более крутые каналы, куда начинает стекать разжиженная снежная масса.

3. Русловые водоснежные потоки, захватывающие и вовлекающие в движение весь находящийся в русле снежный поток. Начальным импульсом для образования руслового водоснежного потока помимо упомянутого течения разжиженной снежной массы может быть прорыв в заснеженное русло некоторого объема воды, способного разрушить снежный покров в русле и вовлечь его в движение. Требуемый запас воды может образовыв-

ваться вследствие возникновения на пути стока снежных запруд в результате оседания снежного покрова над подснежным каналом стока, схода лавин с боковых склонов канала, схода мокрой лавины с расположенного выше снегосбора или других причин, вызывающих временный подпор.

4.5. КЛАССИФИКАЦИЯ ЛАВИН

Для систематизации разнообразных сведений о лавиносборах, причинах образования и характеристиках снежных лавин применяются различные классификации. Одной из наиболее известных является классификация, предложенная Г. К. Тушинским (1949), учитывающая особенности лавинного пути и состояние лавинообразующего снега. В ней выделено 7 видов лавин по морфологии снегосбора и пути движения лавин: 1) осы (отрыв и скольжение снежных масс на ровном склоне) — 0; 2) лотковые лавины (снежные массы движутся по фиксированному руслу) из эрозионных врезов — ЛЛ-1; 3) то же из денудационных воронок — ЛЛ-2; 4) то же из деформированных каров — ЛЛ-3; 5) прыгающие лавины (при наличии на пути движения участков отвесных скал, где происходит свободное падение снежных масс) из эрозионных врезов — ПЛ-1; 6) то же из денудационных воронок — ПЛ-2; 7) то же из деформированных каров — ПЛ-3.

Для каждого из выделенных типов лавиносборов рассматривается три вида лавин по состоянию снега — из сухого метелевого и снежных плит (С), из влажного старого (В) и из мокрого фирнового снега (М).

Классификация Г. К. Тушинского удобна для характеристики лавиносборов на схематических лавинных картах.

Широкое признание получила также генетическая классификация лавин В. Н. Аккуратова (Гляциологический словарь, 1984), основанная на выявлении причин, вызывающих сход лавин. В ней выделяется четыре типа сухих лавин: 1) лавины из свежеснежного снега; 2) из метелевого снега; 3) возникающие в результате сублимационного диафореза (роста глубинной изморози); 4) лавины температурного сокращения снега (при резком понижении температуры воздуха) — и три типа мокрых лавин: 5) инсоляционные лавины (вследствие ослабления связей при таянии снега в контактных зонах или в припочвенном слое в результате действия проникающей солнечной радиации); 6) адвекционные лавины (вследствие ослабления связей в результате размыва водой, образующейся при таянии поверхности снега при адекватном перемещении воздушных масс); 7) промежуточные лавины (при совместном воздействии солнечной радиации и адвекции масс воздуха).

Для каждого типа лавин даются краткие описания причин их возникновения, рассмотрены также характер движения, структура снега и вид лавинных отложений.

Классификация В. Н. Аккуратова долгое время успешно применялась при прогнозировании лавин в Хибинах и других лавиноопасных районах.

В настоящее время для описания и систематизации характеристик лавин и при прогнозировании лавинной опасности применяются международные морфологические и генетические классификации.

Международная морфологическая классификация лавин (табл. 4.1) позволяет передавать информацию о лавинах в за-

Таблица 4.1

Международная морфологическая классификация лавин
(Гляциологический словарь, 1984)

Зона	Критерий	Альтернативная характеристика, название лавины и код
Зарождения	А. Тип начала движения	А1. Двинулась из точки (лавина из рыхлого снега) А2. Двинулась с линии (лавина из снежной плиты) А3. Мягкая плита А4. Твердая плита
	В. Положение поверхности скольжения	В1. Внутри снежного покрова (лавина поверхностного слоя) В2. Срыв в новом снежном покрове В3. Срыв в старом снежном покрове В4. По грунту (лавина полной глубины)
	С. Жидкая вода в снеге	С1. Отсутствует (сухая лавина) С2. Имеется (мокрая лавина)
Транзита	Д. Форма пути	Д1. Движение на ровном склоне (неканализованная лавина) Д2. Движение в лотке (лотковая лавина)
	Е. Тип движения	Е1. Облако снежной пыли (пылевая лавина) Е2. Течение вдоль поверхности грунта (текучая лавина)
Отложения	Ф. Поверхностная шероховатость отложений	Ф1. Крупнокомковатые отложения Ф2. Угловатые блоки Ф3. Окатанные комья Ф4. Мелкокомковатые отложения
	Г. Жидкая вода в свежих отложениях	Г1. Отсутствует (сухие лавинные отложения) Г2. Имеется (мокрые лавинные отложения)
	Н. Загрязнение отложений	Н1. Нет явного загрязнения (чистая лавина) Н2. Имеется загрязнение (загрязненная лавина) Н3. Скальные обломки, остатки почвы Н4. Ветки, деревья Н5. Обломки сооружений

кодированном виде, где символы для критериев даются в виде заглавных букв (*A, B, C, D, E, F, G, H*), а символы для характеристик — в виде цифр. Кроме цифровых символов (1—5) предлагается использовать цифры: 0 — когда нет сведений о характеристике, 7 или 8 — для смешанных характеристик и 9 — для отсылки к специальному замечанию. Например, код *A3 B2 C1 D9 E1 F4 G1 H4* обозначает, что лавина образовалась из мягкой снежной плиты в результате отрыва в новом снежном покрове, лавина из сухого снега двигалась по лотку и образовала воздушную волну (9 отсылает к специальному замечанию, уточняющему характеристику пути движения лавины), отложения лавины мелкокомковатые, сухие, содержащие ветки деревьев.

Глава 5

ДВИЖЕНИЕ ЛАВИН

5.1. ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ЛАВИН

В зависимости от состояния и свойств лавинного снега выделяют шесть форм движения лавин (Москалев, 1977):

1. Движение облака из пылеватого (порошкообразного) снега, которое может сопровождать или обгонять более плотное ядро.

2. Турбулентное движение малосвязного сухого снега наподобие движения сыпучих материалов. Во время движения трение между частицами уменьшается и происходит своеобразное «разжижение» потока.

3. Движение обломков снежных плит. Между нижней поверхностью обломков плит и поверхностью скольжения может возникать эффект воздушной смазки (воздушной подушки).

4. Движение комьев снега — скольжение, качение, перемешивание.

5. Движение консолидированной массы влажного или мокрого снега наподобие течения пластического вещества или вязкой жидкости.

6. Турбулентное движение снежно-водяной смеси, иногда с примесью захватываемых потоком частиц грунта и камней, наподобие движения селевых потоков.

Возможны промежуточные случаи и переход одной формы движения в другую на протяжении пути лавины.

Лавина обычно начинается с ускоряющегося движения потерявшей устойчивость массы снега, которая вовлекает в движение снег на своем пути. Потенциальная энергия перемещающейся вниз по склону снежной массы расходуется на ускорение движения массы и на работу по преодолению сил сопротивления, иначе говоря, она превращается в кинетическую энергию движения и тепловую энергию.

Сопротивление движению лавины складывается из сил трения снежной массы по основанию, внутреннего трения в снежном потоке, сопротивления разрушению вовлекаемого лавиной снежного покрова и сопротивления воздуха. Силы сопротивления проявляются неравномерно, в результате чего скорости перемещения снежной массы в различных частях лавинного потока могут существенно отличаться. Наибольшее сопротивление лавинный поток испытывает в головной части, из-за этого создаются условия для перемешивания снежной массы и пульсации скоростей перемещения переднего фронта лавины. По данным экспериментальных измерений скоростей движения лавин

с помощью специальной скоростной стереофотосъемки было установлено, что наблюдается пульсация высоты и скорости перемещения переднего фронта лавин. Периодически, с интервалом в несколько секунд, перемещение переднего фронта лавины замедляется и толщина головной части потока несколько увеличивается, затем происходит своеобразный выброс с ускоренным перемещением переднего фронта.

5.2. МЕХАНИКА ДВИЖЕНИЯ ЛАВИН

Теория движения лавин развивается в двух направлениях. Одно из них рассматривает движение лавины как движение твердого тела по наклонной поверхности, для описания которого применяются методы механики «материальной точки». Второе направление рассматривает движение лавины как перемещение сплошной среды, для изучения которого применимы методы гидравлики и аэродинамики.

Уравнение движения материальной точки на склоне (центра тяжести твердого тела) записывается в виде

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \psi - \Sigma F_{\text{сопр}}, \quad (5.1)$$

где m — масса тела; v — скорость тела в направлении касательной к склону; g — ускорение силы тяжести; ψ — угол наклона склона (для криволинейного склона угол наклона касательной к склону в заданной точке); $\Sigma F_{\text{сопр}}$ — сумма сил сопротивления движению тела (сила трения, сопротивление воздуха, дополнительные силы сопротивления при преодолении препятствий на пути).

Г. Т. Саатчян (1936) использовал это уравнение для вычисления скорости движения лавины, приняв

$$\Sigma F_{\text{сопр}} = mg \cos \psi f + mkv, \quad (5.2)$$

где f — коэффициент трения лавины о подстилающую поверхность; k — коэффициент, характеризующий сопротивление среды.

Произведя некоторые преобразования, была получена формула, отражающая изменение скорости движения лавины с постоянной массой в зависимости от длины пройденного пути S по склону заданной крутизны:

$$S = 2,3 \frac{a}{k^2} \lg \frac{a - kv_0}{a - kv} + \frac{v - v_0}{k}, \quad (5.3)$$

где v_0 — скорость лавины в начале рассматриваемого участка склона; v — скорость лавины в конце участка склона протяженностью $a = g(\sin \psi - f \cos \psi)$.

Для вычисления скорости весь путь лавины разбивался на ряд участков с одинаковыми уклонами и определялась ско-

рость лавины последовательно в концах выделенных участков. На конечном участке определялось место остановки лавины, где $v = 0$.

Расчетные формулы для определения скоростей движения лавин, основанные на уравнении движения материальной точки (см. выражение (5.1)) при различных формах задания сил сопротивления, разрабатывались также Г. К. Сулаквелидзе, Д. Н. Гонгадзе, Г. М. Шахунянцем, С. М. Козиком, Ю. Д. Москалевым и другими исследователями. Обзор полученных ими формул для расчета движения снежных лавин имеется в «Руководстве по снеголавинным работам» (1965) и в работе Ю. Д. Москалева (1977).

С. М. Козик (1962) рассмотрел возможности учета изменяющихся в процессе движения размеров, формы и массы лавины и оценил влияние различных факторов на движение лавины. Им предложены практические приемы расчетов движения лавин, в том числе описанный в следующем параграфе упрощенный графоаналитический способ. Ю. Д. Москалев (1977) проанализировал уравнение движения лавины (5.1) с учетом кривизны лавинного пути и изменения массы лавины, приняв общий закон сопротивления в виде суммы трех членов:

$$\Sigma F_{\text{сопр}} = mg \cos \psi f + k_1 v + k_2 v^2, \quad (5.4)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты, характеризующие изменения величины сопротивления в зависимости от скорости и квадрата скорости движения лавины. При такой предпосылке дифференциальное уравнение движения лавины приобретает вид

$$\frac{dv}{dt} = g(\sin \psi - f \cos \psi) - \left(\frac{k_1}{m} - \frac{1}{m} \cdot \frac{dm}{dt} - \frac{1}{r} \frac{dr}{dt} \right) v - \frac{k_2}{m} v^2, \quad (5.5)$$

где r — радиус кривизны пути лавины.

Анализ показал, что коэффициенты, характеризующие зависимость сопротивления от скорости лавины (k_1 и k_2), не могут считаться постоянными не только в случае схода лавины в заданном лавиносборе, но и на протяжении пути их схода. Поэтому расчетные значения коэффициентов сопротивлений должны рассматриваться как некоторые усредненные статистические величины, дающие возможность оценить скорость движения лавины и дальность ее выброса с какой-то вероятностью. Наиболее надежным путем определения этих коэффициентов являются обратные расчеты по данным наблюдений за лавинами и статистическая обработка этих материалов.

Существенным недостатком математических моделей лавин, основанных на уравнении движения материальной точки, является то, что они не дают возможности определить объем, форму и плотность лавин. Эти параметры приходится задавать по косвенным признакам. В то же время очевидно, что все параметры движущейся лавины должны определяться условиями

на склоне — характеристиками поверхности лавиносбора и снежного покрова на склоне. Такая задача может быть решена лишь при рассмотрении лавины как потока сплошной среды.

В настоящее время разрабатываются гидравлические модели движения лавин из плотного снега и модели снежного облака для пылевых лавин. Гидравлические модели основаны на представлении о лавине как турбулентном потоке сплошной среды, в котором наряду с движением вниз по склону происходит интенсивное перемешивание. Если ограничиться одномерным описанием движения лотковой лавины, т. е. определять лишь среднюю по поперечному сечению скорость снега, а плотность снега ρ в лавине считать известной и постоянной, то уравнения движения лавины можно записать следующим образом (Данилова, Эглит, 1977):

$$\frac{dS_n}{dt} + \frac{\partial S_n}{\partial x} v = q_1, \quad (5.6)$$

$$\frac{dv}{dt} + v \frac{dv}{dx} = g \sin \psi - F_1 - \frac{1}{S_n} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial x} + \frac{F_3}{S_n}, \quad (5.7)$$

где x — координата вдоль оси лотка; t — время; v — скорость снега; S_n — площадь поперечного сечения снежного потока; q — объем захватываемого или отлагаемого лавиной снега на единицу длины пути движения лавины; g — ускорение силы тяжести; ψ — угол наклона оси лотка к горизонту; F_1 — сила, возникающая от трения, а также от взаимодействия с захватываемым или откладываемым снегом; $\frac{1}{S_n} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial x}$ — сила, возни-

кающая впереди и сзади лежащих слоев снега; F_3 — сила, связанная с давлением со стороны боковых стенок лотка. Первое уравнение выражает закон сохранения массы, а второе — закономерности движения лавины. Конкретный вид уравнений (5.6) и (5.7) зависит от формы лотка, а также от принимаемых законов для выражения величин F_1 , F_2 и F_3 .

Расчеты показали (Эглит, Свешникова, 1980), что форма лавины меняется в процессе движения — вытягивается вдоль склона. При движении по длинному однородному склону лавина обычно имеет вал в своей передней части потока и убывает по мере удаления от фронта, причем медленнее, чем толщина потока. Если лавина захватывает снег со склона, то масса ее растет, но высота и скорость фронта лавины на длинном однородном и достаточно крутом склоне имеют тенденцию сделаться постоянными. Если путь S , пройденный лавиной по длинному широкому склону постоянного уклона, довольно велик, то высота h_ϕ и скорость v_ϕ фронта лавины, не захватывающей дополнительной массы снега, приближенно описывается формулами

$$h_\phi = \frac{3m}{\rho S}, \quad v_\phi = \frac{3mg(\sin \psi - \mu \cos \psi)}{\rho k S}, \quad (5.8)$$

где S — расстояние, пройденное фронтом; m — масса на единицу ширины лавины; ρ — плотность снега в лавине; ψ — уклон склона; μ — коэффициент сухого трения; k — коэффициент гидравлического трения.

При входе лавины в более узкую часть лотка толщина потока увеличивается, а скорость падает, затем при движении по лотку толщина потока в передней части оказывается меньшей, чем высота вала, образовавшегося при входе в лоток. Если на пути лавины имеется несколько сужений и расширений лотка или резких чередований крутых и пологих участков, то на ней образуются валы, высота которых может быть больше высоты переднего фронта. При выходе лавины на участок торможения, где $\tan \psi < \mu$, передний вал отходит от фронта, так что наибольшая толщина потока и, в частности, при его остановке, оказывается на некотором удалении от фронта.

Пылевая лавина рассматривается как движение снеговоздушного облака. В модели такой лавины учитываются следующие факторы (Эглит, Вельтищев, 1985): действие силы тяжести, относительное движение внутри облака, турбулентное трение о склон, аэродинамическая подъемная сила и сопротивление окружающего воздуха, вовлечение новых масс воздуха вследствие турбулентного перемешивания на верхней границе облака и вовлечение в движение снега, лежащего на склоне, оседание некоторой части снега на склоне. Численные расчеты по такой модели показали, что на участке образования и ускорения облака скорость движения центра его тяжести увеличивается до некоторого предельного значения. Выход на предельную скорость обусловлен тем, что с нарастанием скорости облака растет его высота и увеличивается аэродинамическое сопротивление воздуха, что ведет к резкому торможению. Облако может развиваться над движущейся лавиной из сухого снега. В этом случае оно может обгонять лавину или отставать от нее.

Расчет движения лавины как сплошной среды представляет собой сложную математическую задачу и может быть осуществлен только с помощью ЭВМ. Особую сложность представляет задание параметров, характеризующих снежный покров в лавиносборе и силы сопротивления движению лавины. Поэтому гидравлические модели и модели снежного облака в практике защиты от лавин пока еще не нашли широкого применения.

5.3. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЕТА СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ЛАВИНЫ

Для ориентировочных расчетов скоростей движения лавины удобным и достаточно надежным является графоаналитический способ, предложенный С. М. Козиком (1962).

Для расчетов условно принимается, что масса лавины на всем пути ее движения остается постоянной и сумма сил сопро-

тивления пропорциональна составляющей массы лавины, направленной перпендикулярно к склону:

$$\Sigma F_{\text{сопр}} = mg \cos \psi \cdot f_0, \quad (5.9)$$

где f_0 — обобщенный коэффициент трения.

Коэффициент f_0 в данном случае учитывает воздействие всех видов сопротивления движению лавины и принимается постоянным для всего пути лавины и не зависящим от ее скорости. При такой предпосылке уравнение (5.1) принимает вид

$$\frac{dv}{dt} = g(\sin \psi - f_0 \cos \psi). \quad (5.10)$$

Вычерчивается продольный профиль пути движения лавины и проводятся прямоугольные координаты (горизонтально — ось l и вертикально — ось h) с точки, соответствующей верхней границе зоны зарождения лавины (рис. 5.1). Начало координат

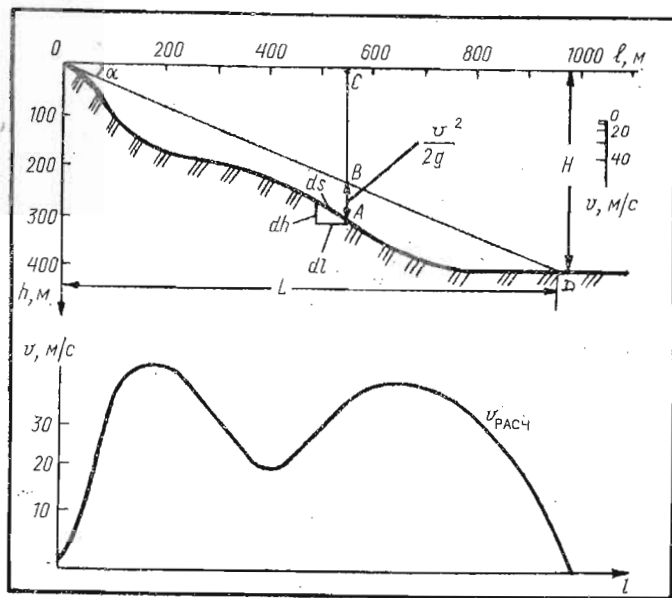


Рис. 5.1. Графоаналитический способ расчета скоростей движения и расчетной дальности выброса лавины

соединяется прямой линией с точкой, соответствующей на профиле передней границе остановившегося лавинного потока. Учитывая, что для каждой точки пути движения лавины $\sin \psi = \frac{dh}{ds}$, $\cos \psi = \frac{dl}{ds}$ и $\frac{dv}{dt} = \frac{d(v^2)}{2ds}$ (s — длина пути лавины), уравнение (5.10) можно записать в виде

$$d(v^2) = 2g(dh - f_0 dl). \quad (5.11)$$

После интегрирования этого уравнения с учетом того, что в точке отрыва лавины $h=0$, $l=0$ и $v=0$, получаем уравнение, позволяющее определить скорость лавины в любой точке A на продольном пути ее движения:

$$\frac{v_A^2}{2g} = h_A - f_0 l_A. \quad (5.12)$$

В точке D , соответствующей передней границе остановившейся лавины ($l_D=L$, $h_D=H$) $v_D=0$. Подставляя эти значения в уравнение (5.12), получаем

$$f_0 = \frac{H}{L} = \tan \alpha, \quad (5.13)$$

где α — угол наклона линии, соединяющей точки, соответствующие линии отрыва и переднему фронту лавинных отложений. Таким образом, обобщенный коэффициент трения f_0 определяется из простых геометрических построений и несет двойную смысловую нагрузку — как физический параметр, характеризующий силы сопротивления движения лавин, и как геометрическая функция угла наклона линии OD , соединяющей начало и конец пути движения лавины.

Анализируя уравнение (5.12) и рассматривая рис. 5.1, нетрудно убедиться в том, что $f_0 L$ равно перепаду высот (отрезок BC) между началом координат и линией OD . А длина отрезка ординаты AB между профилем и наклонной линией OD дает в принятом масштабе построения профиля величину $\frac{v_A^2}{2g}$.

Для упрощения расчетов можно построить двойную шкалу, на которой с одной стороны откладываются в масштабе профиля длины отрезка AB , а с другой — соответствующие им значения скорости лавины v . Используя такую шкалу, можно по измеряемым величинам превышения линии OD над продольным профилем лавиносбора последовательно для разных точек профиля определить скорость движения лавины и построить эпюру скоростей.

Натурные измерения скоростей движения лавин показывают, что для лавин из сухого снега в лавиносборах простой формы рассчитанные графоаналитическим способом скорости близки к фактическим для лавин, у которых максимальные скорости находятся в пределах 30 м/с. Для лавин, у которых максимальные расчетные скорости превышают указанную величину, а также в лавиносборах с препятствиями на пути лавин (искривления лавинного лотка в плане, резкие изменения угла наклона, выход лавины на противоположный склон долины) расчетные скорости в зоне транзита могут оказаться несколько больше фактических. Более существенные отклонения максимальных расчетных скоростей движения по сравнению с фактическими отмечаются у лавин из мокрого снега.

Большим преимуществом описанного графоаналитического способа является его простота и то, что он дает близкие к реальным результаты. В тех случаях, когда возникают предположения о завышении рассчитанных величин скоростей, следует произвести дополнительные расчеты с учетом реальных особенностей лавиносбора и снежного покрова с использованием более строгих математических моделей.

Рассматриваемый способ расчетов оказался удобным для статистико-вероятностного анализа результатов наблюдений за дальностью выброса лавин.

5.4. ДАЛЬНОСТЬ ВЫБРОСА ЛАВИН

Определение границ выброса лавин является одной из основных задач лавиноведения. Границы выброса лавин определяют путем непосредственных наблюдений в лавиносборах за сошедшими лавинами и следами ранее сошедших мощных лавин, путем дешифрирования аэрофотоснимков и расчетными способами. Помимо непосредственно зафиксированных границ часто приходится оценивать «расчетные» границы, соответствующие наиболее мощным лавинам расчетной повторяемости, например мощным лавинам, которые сходят не чаще одного раза в 20, 50 или 100 лет. Они обычно определяются на основании статистической обработки результатов наблюдений за сошедшими лавинами.

Для каждой наблюдаемой лавины с помощью уравнения (5.13) определяется величина обобщенного коэффициента трения $f_i = \frac{H_i}{L_i}$. Затем значения f_i подвергаются статистической обработке. Такой анализ показал, что коэффициент f_i тем меньше, чем больше объем сошедшей лавины. Так, на основании обработки результатов многолетних измерений объемов и дальностей выброса лавин в Хибинах В. Н. Аккуратов выявил эмпирическую зависимость величины f_i от объема лавины V :

$$f_i = \frac{1}{a \lg(10V)}, \quad (5.14)$$

где $a=0,55$ для лотковых лавин с четко выраженной снегосборной зоной и $a=0,72$ для плоских склонов.

Наибольшей дальности $L_{\max}$ лавина достигает при обрушении сухого снега со всей площади зоны зарождения, чему соответствует минимальное значение коэффициента $f_{\min} = \frac{H_i}{L_{\max}}$.

Однако предельные по дальности выброса удается наблюдать крайне редко. Поэтому для анализа чаще используются значения $f_{\min}$, вычисленные по следам границ распространения наиболее мощных лавин в предшествующие годы (по геоморфологическим и дендрохронологическим признакам).

На основании анализа сведений о дальностях выброса лавин в горах Средней Азии Ю. Д. Москалев (1977) установил, что минимальное значение коэффициента $f_{\min}$ связано с площадью зоны зарождения лавин $F_{\text{сн}}$ эмпирическим уравнением

$$f_{\min} \approx F_{\text{сн}}^{-0,09}. \quad (5.15)$$

В. П. Благовещенский выявил более сложную эмпирическую зависимость $f_{\min}$ от площади и угла наклона зоны зарождения лавин и от угла наклона лавинного лотка. Эмпирические уравнения, отражающие зависимость $f_{\min}$ от тех или иных факторов, имеются также в работах В. Н. Аккуратова, Б. Н. Новикова, М. Ч. Залиханова, А. В. Рунича, Е. А. Золотарева и других исследователей. Такие формулы достаточно хорошо отражают зависимость дальности выброса лавин от различных характеристик лавиносборов в анализируемых лавиноопасных районах и пригодны для ориентировочных расчетов. Однако следует учитывать, что при построении этих эмпирических зависимостей были использованы сведения о зафиксированных наблюдателями или по косвенным признакам максимальных дальностях выброса лавин без учета их повторяемости. Поэтому неизвестно, какой обеспеченности будет соответствовать расчетная величина и какая остается вероятность того, что расчетная дальность выброса заданной обеспеченности может оказаться больше вычисленной по предлагаемым эмпирическим формулам.

В соответствии с «Инструкцией по проектированию и строительству противолавинных защитных сооружений СН 517-80» передний край отложений лавинного потока для лавин повторяемости реже 1 раза в 50 лет при недостатке сведений о реальных границах выброса допускается определять, принимая значения $f_{\min}$ (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Ориентировочные значения коэффициента $f_{\min} = \frac{H_i}{L_{\max}}$

Средняя крутизна снегосбора и пути схода лавин, град	Площадь снегосборного бассейна, га						
	1	2	5	10	20	30	40
25	0,5	0,48	0,43	0,36	0,32	0,31	0,30
30	0,51	0,49	0,44	0,40	0,37	0,35	0,34
35	0,56	0,53	0,49	0,46	0,44	0,42	0,40
40	0,61	0,58	0,55	0,52	0,50	0,49	0,48
45	0,66	0,65	0,63	0,61	0,59	0,58	0,56

Уточнение расчетной дальности выброса лавин возможно путем использования для статистической обработки по возможности большего количества сведений о дальности выброса редкосходящих лавин известной давности в лавиносборах, подоб-

ных заданному лавиносбору, и объема расчетной лавины. Особенно важны при этом сведения о параметрах лавин и дальностях их выброса в обследуемом лавиносборе. В некоторых случаях возникает потребность определения расчетных дальностей выброса лавин различного генезиса. Так, максимальной дальности выброса обычно достигают лавины из сухого свежего или смешанного снега, однако могут понадобиться также сведения и о вероятных пределах выброса их из мокрого снега заданной обеспеченности.

5.5. ПЛОТНОСТЬ И РАЗМЕРЫ ЛАВИННОГО ПОТОКА

Плотность снеголавинного потока для ориентировочных расчетов может быть принята: для лавин из свежеснежавшего снега $\rho_{\text{л}}=300 \text{ кг/м}^3$, для лавин из старого снега $\rho_{\text{л}}=400 \text{ кг/м}^3$, для лавин из мокрого снега $\rho_{\text{л}}=500 \text{ кг/м}^3$. Более точные значения плотности определяют на основе данных специализированных снеголавинных изысканий с учетом плотности и свойств снежного покрова в зонах зарождения лавин и характера движения лавин.

Расчетный максимальный объем лавины в первом приближении может быть определен путем умножения площади снегосбора заданного лавинного очага на расчетную высоту снежного покрова заданной обеспеченности. Для уточнения расчетных объемов лавин следует рассматривать вероятность одновременного обрушения снега на части или на всей площади снегосбора и попытаться учесть неоднородность снежного покрова в зоне зарождения лавин с учетом метелевого снегопереноса.

И. В. Северский и В. П. Благовещенский (1983) по результатам измерений в лавинных бассейнах Зайлийского и Джунгарского Алатау определили, что имеется четкая зависимость доли сносимого лавинами снега от снегозапасов в зоне формирования лавин — чем больше масса снега в зоне зарождения лавин, тем больше доля сносимого снега. В годы с максимальной лавинной опасностью доля сносимого снега K составляет:

Снегозапасы, мм	K
100—200	0,14—0,34
300—400	0,65—0,75
500—600	0,84—0,87
>650	0,90

Использование этой зависимости дает возможность оценить расчетную массу лавины m по эмпирической формуле

$$m = 10W_m FK \quad (\text{т}), \quad (5.16)$$

где W_m — максимальные снегозапасы заданной обеспеченности (мм водного столба); F — площадь зоны зарождения лавины (га).

Дальнейшее уточнение расчетного объема и массы лавины требует учета локальных особенностей лавиносбора, анализа конкретных сведений о сходящих в этом очаге лавинах и более подробного рассмотрения условий лавинообразования.

Максимальные размеры высоты фронта и площади поперечного сечения лавинного потока в зоне транзита (в лотке) можно определить на основе анализа результатов наблюдений признаков действия лавин на бортах лавинного лотка. По данным И. В. Северского и В. П. Благовещенского (1983), высота фронта тем больше, чем больше площадь зоны зарождения лавин. Предельные высоты больших лавиносборов ($F=50—100 \text{ га}$) для мокрых лавин зафиксированы до 25 м, а высота потока лавин из сухого снега достигала 70 м. Для лавиносборов с площадью зарождения лавин 30—40 га предельные высоты лавинного потока определены в 12—15 м для мокрых лавин и 20—25 м для лавин из сухого снега. На поворотах лотка отмечается перекося поверхности лавинного потока и существенное увеличение его высоты на внешнем откосе.

Надежных способов определения высоты лавинного потока в зонах зарождения и отложения пока не существует. Для приближенного расчета можно принять, что в верхней части зоны высота потока соответствует расчетной высоте снежного покрова, а далее она увеличится пропорционально сужению потока по мере приближения к лавинному лотку. В зоне выброса высота лавинного потока определяется высотой и объемом лавины при выходе из лотка, углом расширения конуса выноса и интенсивностью замедления потока, что в свою очередь определяется морфометрическими характеристиками зоны выброса.

Более точные расчеты размеров лавинного потока требуют детальных инженерных изысканий в интересующих лавиносборах и проведения расчетов движения лавины как потока жидкости или потока взвешенных в воздухе частиц снега.

5.6. ВОЗДУШНЫЕ ВОЛНЫ И СНЕГОВОЗДУШНЫЕ ПОТОКИ

Сход лавин часто сопровождается потоками воздуха, взвешенной в воздухе снежной пыли и вихрями. Все эти явления получили обобщенное название воздушных волн. Иногда их называют лавинным ветром или лавинным вихрем. Воздушные волны могут распространяться далеко за пределы действия основного снеголавинного потока и производить разрушения на своем пути. Наибольшей разрушительной силой обладают воздушные волны, возникающие при сходе пылеобразных лавин из сухого рыхлого снега.

Имеется ряд описанных проявлений воздушных волн и последствий их разрушительного действия. Исследователь лавин В. Фляйг в своей книге «Внимание, лавины!» (1960) пишет: «Жутко становится путнику, когда далеко впереди облака пыли, ели начинают вдруг склоняться к земле, высоко в воздух

взлетают ветки, целые деревья и даже обломки скал». Там же приводятся наблюдения Е. Циммермана: «Однажды я был свидетелем следующей картины: большой барак задолго до того, как его достигло снежное ядро лавины, развалился на части, словно картонный домик. Балки и доски дугой пролетали по воздуху и упали на противоположный склон, снег же самой лавины остановился, не дойдя до дна долины». В данном случае мы имеем дело с потоком воздуха, движущимся впереди лавины. Поток воздуха возникает в результате взаимодействия лавины с окружающим воздухом и действия фронта лавины как поршня, который гонит воздух перед собой. Такого рода воздушная волна может возникнуть также в результате выжимания воздуха из снеголавинного потока при его торможении и при падении лавины с уступа. Некоторые исследователи предполагают, что при взаимодействии лавины с препятствием могут возникать ударные волны.

Действие чистых воздушных волн наблюдается относительно редко. Гораздо чаще приходится сталкиваться с воздействием воздушных волн в виде снеговоздушных потоков. Такие «волны» производят значительно большие разрушения, так как плотность насыщенного снежной пылью потока может намного превосходить плотность чистого воздуха, а сила действия потока на препятствие увеличивается пропорционально плотности потока.

При образовании лавин из сухого рыхлого снега возникают пылеобразные лавины, в которых поток частиц снега сопровождается снеговоздушным потоком, состоящим из взвешенных в воздухе пылеобразных частиц снега. В некоторых случаях ядро лавины целиком распыляется и лавина превращается в движущееся облако снежной пыли.

В местах уменьшения скорости лавины, особенно при падении ее с уступа, снеговоздушный поток может отрываться от основного лавинного потока и, опережая его, распространяться в виде струйных течений и вихревых образований. В местах резкого поворота лавины наблюдается раздвоение потока — основная масса снега движется по руслу, а снеговоздушный поток перемещается над поверхностью земли в первоначальном направлении. Аналогичные воздушные волны в виде снеговоздушных струй и вихрей образуются при сходе лавин из холодных снежных плит, которые по мере их разрушения во время движения образуют пылевые облака.

Снеговоздушные потоки могут распространяться далеко за пределы зоны выброса основной массы лавины — на сотни метров и даже километры. В тех случаях, когда снеговоздушные потоки достигают лесной зоны, выделяют три зоны разрушений. В первой зоне, которая начинается сразу после границы остановившейся лавинной массы снега, воздушная волна валит и ломает деревья, обламывает крупные ветки у сохранившихся деревьев, придавая кроне асимметричную форму, с ветвями,

вытянутыми в направлении потока. В следующей зоне волна ломает и разбрасывает ветки деревьев. В третьей зоне воздушная волна только сдувает снег с деревьев. На стволах деревьев, на выступающих камнях, скалах и сооружениях при прохождении снеговоздушного потока образуются плотные корки мелкозернистого снега.

Известны случаи, когда снеговоздушные потоки сбрасывали с рельсов и перемещали железнодорожные вагоны и электровозы, разрушали здания, выдавливали окна. По данным экспериментальных измерений и расчетов, давление потока может достигать 0,01 МПа. По мере удаления потока от места его зарождения давление быстро уменьшается. Это связано как с уменьшением скорости потока, так и с уменьшением его плотности вследствие выпадения более тяжелых частиц снега. Полное затухание воздушной волны происходит на расстоянии, равном 10—20% дальности выброса лавины.

Сзади по краям лавины и снеговоздушного потока создается разреженное пространство, куда засасывается воздух. Наблюдались случаи, что это вызвало выдавливание окон в домах наружу в сторону движения потока и разрушение построек.

5.7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАВИН С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Препятствием на пути движения лавины являются бугры, скальные выступы, большие камни и поперечные валы, сужения и повороты лавинного потока, места с резким уменьшением угла наклона лавинного пути и места, где лавинный поток поднимается на противоположный склон долины. Лавинный поток оказывает силовое воздействие на препятствия. Помимо этого препятствия могут испытывать повышенные локальные нагрузки от ударов снежных глыб и камней.

В местах поворотов лавинного потока возникают центробежные силы, увеличивающие давление и силы трения на внешней поверхности взаимодействия лавины со стенками лотка. Эти силы приводят также к перекосу поверхности лавинного потока, повышению высоты потока у внешнего борта лотка и «заплескиванию» снежных масс на склон. По верхним следам лавинного потока на бортах лотка в местах его поворота можно определить высоту и скорость потока:

$$\frac{\Delta h}{b_{\text{л}}} = \frac{v_{\text{л}}^2}{gR}, \quad (5.17)$$

где Δh — превышение следов потока; $b_{\text{л}}$ — ширина потока; $v_{\text{л}}$ — скорость потока; $g=9,8$ м/с; R — радиус поворота лавинного лотка.

В местах уменьшения наклона лавинного пути и выхода лавины на противоположный склон долины возникают дополни-

тельные давления и сдирающие усилия на ложе лавинного потока.

Препятствия создают дополнительные сопротивления движению снеголавинного потока и способствуют частичному замедлению потока. На этом принципе основан способ уменьшения дальности выброса лавин путем строительства лавинотормозящих сооружений, в частности возведение каменных и земляных бугров в верхней части зоны выброса лавин.

Глава 6

ЛАВИНООПАСНЫЕ РАЙОНЫ СССР

6.1. ОБЗОРНАЯ КАРТА ЛАВИНООПАСНЫХ РАЙОНОВ

В 1971 г. была издана «Карта лавиноопасных районов СССР» (масштаб 1:7 500 000), которая затем была принята в качестве нормативного документа для проектирования транспортных, промышленных, гидротехнических и других сооружений в горных условиях (Указания по расчету снеголавинных нагрузок..., 1973). На карте выделены четыре группы лавиноопасных районов с различной степенью опасности (рис. 6.1).

К первой группе отнесены районы со значительной лавинной опасностью, где лавины встречаются часто (более половины имеющихся логов являются путями схода лавин) и сходят ежегодно или по нескольку раз в год. Сюда относятся районы альпийского высокогорья всех гор, среднегорные сильно расчлененные территории в достаточно увлажненных районах со значительной высотой снежного покрова (70 см и более), низкогорные районы в условиях очень большой снежности, высокие плато с резким глубоким расчленением и вулканические сопки в многоснежных районах.

Вторая группа охватывает районы со средней лавинной опасностью, где сеть лавиносборов разрежена или при достаточно густой сети лавины сходят не ежегодно, а лишь в годы с повышенной снежностью или при благоприятном для процесса лавинообразования сочетании метеорологических условий. Сюда относятся районы среднегорья, низкогорья (при значительной снежности) и платообразные поверхности с сильным расчленением.

В третью группу включены районы со слабой лавинной опасностью, в которых сеть лавиносборов очень редка и они встречаются лишь на наиболее крутых частях склонов подветренной экспозиции и в пригребневых участках, где возможно обрушение снежных карнизов, а также места, где лавины сходят только в многоснежные годы. К этой группе относятся районы с небольшой и средней мощностью снежного покрова, где характерны значительные колебания снежности и в некоторые годы снежный покров достигает достаточной для образования лавин мощности.

В особую категорию (четвертая группа) выделены районы с потенциальной лавинной опасностью, в которых в настоящее время лавины не наблюдаются, но при изменении природных условий хозяйственной деятельностью (вырубка леса, выемка грунта на склоне, создание искусственных крутых

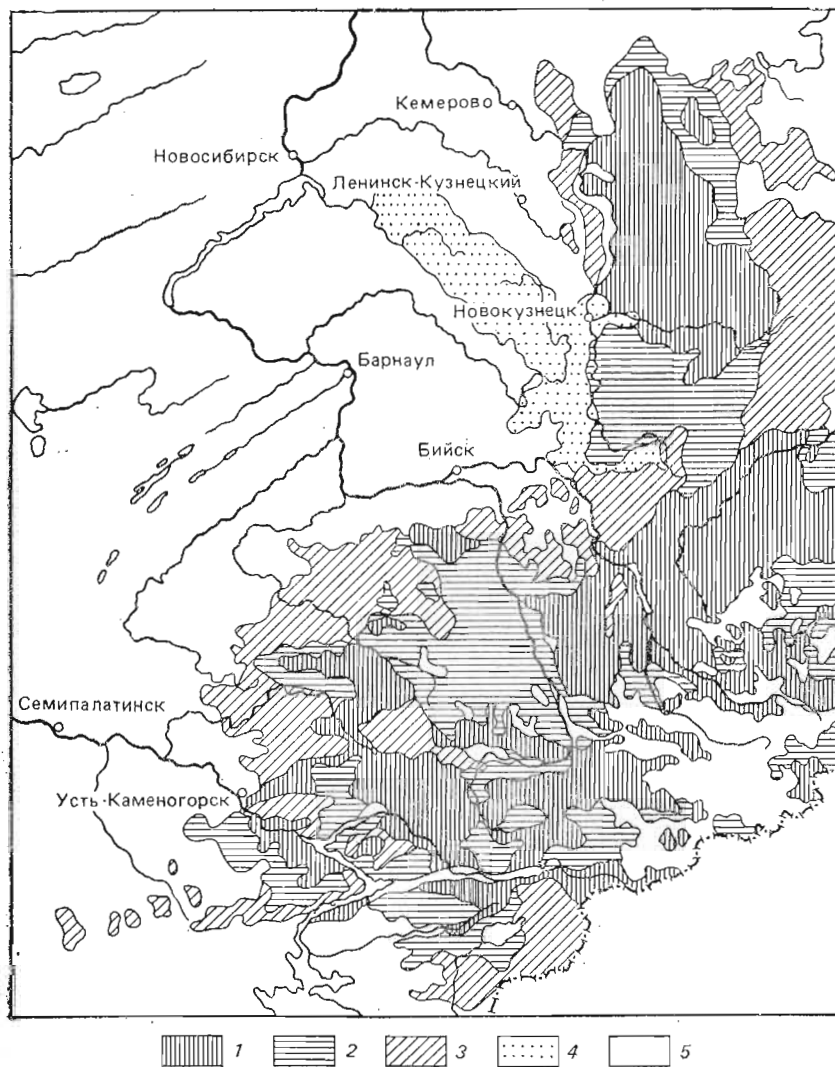


Рис. 6.1. Фрагмент карты «Лавиноопасные районы СССР»:
 1 — районы со значительной лавинной опасностью (лавины встречаются часто и ежегодно); 2 — районы со средней лавинной опасностью (сеть лавиносборов разрежена, лавины сходят не ежегодно); 3 — районы со слабой лавинной опасностью (лавины сходят в многоснежные годы); 4 — районы с потенциальной лавинной опасностью (в настоящее время безопасные, но могут стать лавиноопасными при вырубке леса и других нарушениях склонов); 5 — нелавиноопасные районы

откосов) они могут образовываться. Это обычно залесенные горные районы, в которых рельеф и мощность снежного покрова обеспечивают условия образования лавин, но густой лес способствует равномерному отложению снега и удерживает снежный покров на склонах.

6.2. РАЙОНИРОВАНИЕ ЛАВИНООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СССР ПО ТИПАМ ЛАВИНООБРАЗОВАНИЯ

В основу лавинного районирования территории СССР положен преобладающий тип стратиграфического разреза снежной толщи и связанный с этим генетический тип лавин. На схеме районирования (рис. 6.2) выделено 5 групп районов, включающих 51 лавиноопасный район. Условия лавинообразования и особенности лавинного режима в этих районах описаны в книге «Лавиноопасные районы Советского Союза» (1970). Краткие характеристики районов изложены ниже.

1. Арктические районы с метелевыми и инсоляционными лавинами.

1. На Земле Франца-Иосифа наиболее благоприятные для образования лавин участки расположены в прибрежных частях островов, где имеются уступообразные формы рельефа, скальные обрывы, бровки плато и уступы. Кроме того, лавины образуются на крутых периферийных участках ледниковых куполов и выводных ледников. Сильные ветры и высокая относительная влажность воздуха при низкой температуре способствуют значительному уплотнению снега (к концу зимы плотность достигает 450 кг/м^3), что повышает устойчивость снежного покрова. Лавины возможны в течение полярной ночи при ранних обильных снегопадах в маловетренную погоду. Большинство лавин сходит в марте—июле, в период таяния снега.

2. Рельеф и климатологические условия на Новой Земле благоприятны для широкого распространения лавин. Лавины сходят в течение всего холодного периода, с конца сентября до июня, а в зонах аккумуляции ледников — круглый год. Зимой возможен сход лавин из свежеснежного и метелевого снега. Предполагается, что лавины наибольшего объема сходят в период снеготаяния (сведений о лавинах пока крайне мало).

3. Климатические условия Северной Земли мало благоприятны для образования лавин. Несмотря на длительный холодный период, осадков зимой выпадает немного: от 230 на юге до 100 мм на севере. Сильные и устойчивые по направлению ветры сдувают снег с плоских водоразделов в понижения и долины. Наиболее лавиноопасны — сильно расчлененные краевые участки на покрытых ледниками плато и достаточно крутые края ледниковых куполов, где возможен сход лавин по мере накопления снега и часто сходят мокрые лавины весной. Следы снежных лавин отмечались также в каньонообразных участках речных долин в пределах возвышенной равнины.

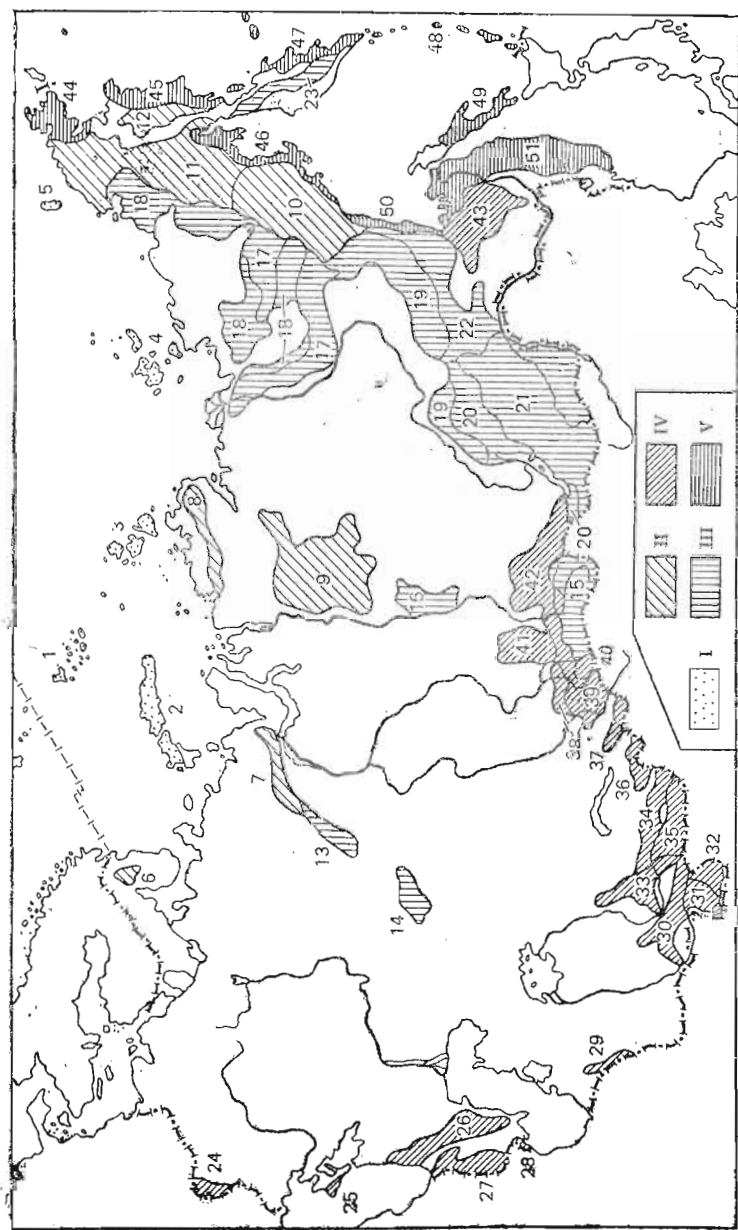


Рис. 6.2. Схема районирования территории СССР по факторам лавинообразования и особенностям лавинного режима:

I — арктические районы с метелевыми и инсоляционными лавинами; II — северные районы с лавинами из метелевого и свежавывавшего снега; III — внутренние континентальные районы с лавинами из перекристаллизованного снега; IV — районы южного горного пояса с лавинами из свежавывавшего снега, снежных плит и мокрого снега; V — тихоокеанские и приморские районы с лавинами из мокрого, метелевого и резко стратифицированного снега; 1—51 — номера лавиноопасных районов

4. Новосибирские острова характеризуются самой низкой средней годовой температурой воздуха среди островов Советской Арктики (до $-14,6^\circ$), наиболее продолжительным холодным периодом и небольшим количеством твердых осадков (до 120 мм). Лавиноопасные участки приурочены к сильно расчлененным краям плато с большой глубиной врезов, к возвышающимся над приподнятыми равнинами склонам и прибрежным обрывам. Лавины образуются преимущественно на северных склонах в годы с повышенной снежностью.

5. Условия циркуляции атмосферы определяют аномально низкую для широты острова Врангеля температуру воздуха и малое количество осадков. Характерно также существенное перераспределение снежного покрова и образование снежных карнизов под действием сильных устойчивых ветров. Наиболее лавиноопасными являются подветренные склоны, над которыми образуются снежные карнизы. Многочисленные мелкие острова Советской Арктики имеют много общих черт в условиях образования лавин с перечисленными архипелагами и островами. На них наиболее крупные лавины также сходят во время весеннего таяния. Возможен сход лавин в середине зимы. Большую роль играет интенсивный ветровой перенос снега, приводящий к накоплению снега на подветренных склонах и в понижениях и к образованию мощных снежных карнизов.

II. Северные районы с лавинами из метелевого и свежавывавшего снега.

6. Кольский полуостров. К районам с сильной лавинной опасностью на Кольском полуострове относятся Хибинский горный массив и горные массивы около г. Мончегорска и в Ловозерских тундрах. Другие горные массивы характеризуются слабой лавинной опасностью. Наиболее изучены Хибинны, где с 1933 г. ведутся регулярные наблюдения за снежным покровом, факторами лавинообразования и лавинами. Лавины здесь сходят ежегодно, а в части лавиносборов — по несколько раз в течение зимы. Время схода лавин — с октября по май. Преобладают лотковые лавины, достаточно развиты также снежные осы с плоских склонов. Основная масса лавин сходит после сильных снегопадов и метелей. Наблюдаются также мокрые лавины весной.

7. Полярный и Приполярный Урал. Рельеф и климатические условия Урала благоприятствуют довольно широкому распространению процессов лавинообразования. Районы с наибольшей лавинной опасностью расположены в западной и осевой частях Полярного и Приполярного Урала, где преобладание альпийских форм рельефа в сочетании со значительной глубиной расчленения и повышенной снежностью способствуют широкому развитию густой сети лотковых лавин, сходящих с крутых склонов каров. Лавины в этих районах сходят преимущественно из свежавывавшего снега после интенсивных снегопадов или из метелевого после сильных метелей, которые здесь

очень часты и бывают более 140 дней в году. Восточная часть Урала характеризуется несколько меньшей лавинной опасностью по сравнению с западной, так как здесь выпадает меньше твердых осадков, чем в восточной. В среднегорных районах этой части Урала широко развиты высокие плато, поверхности которых являются обширными снегосборными бассейнами. Наиболее лавиноопасны здесь восточные подветренные склоны, где после снегопадов сходят небольшие лотковые лавины и осы, а наибольшая лавинная активность отмечается весной, при массовом обрушении сформированных во время метелей снежных карнизов.

8. Горы Бырранга представляют собой систему невысоких гряд, хребтов и платообразных массивов на п-ове Таймыр. Горы характеризуются повсеместным распространением многолетнемерзлых грунтов и длительной холодной зимой с частыми ветрами. Устойчивый снежный покров держится около 9 месяцев, высота его до 0,8 м. Лавины сходят во второй половине зимы и весной, чаще всего вследствие обрушения снежных карнизов в многоснежные годы.

9. Горы Путорана располагаются в пределах субарктического климатического пояса, где характерно сочетание низкой температуры воздуха с сильными ветрами и метелями. Вследствие активного метелевого переноса снежный покров формируется неравномерно. Продолжительность залегания его 7—8 месяцев, мощность от 50 до 185 см. Повсеместно распространены многолетнемерзлые грунты. Сеть лавиносборов разрежена. Лавины образуются из метелевого снега в многоснежные годы. Наибольшая степень лавинной опасности в заснеженной и глубоко расчлененной западной части гор, остальная часть гор относится к районам со слабой лавинной опасностью.

Лавинная опасность гор Северо-Востока Сибири (10 — Охотско-Колымское нагорье; 11 — Анадырское и Анюйско-Чукотское нагорья; 12 — Западно-Корякское нагорье) пока детально не изучалась и оценивается преимущественно по косвенным признакам, среди которых основными являются рельеф местности, снежность горных районов и сведения об интенсивности метелевого перераспределения снежного покрова. Для гор характерны широкие межгорные депрессии с плоскими днищами и среднегорного рельефа с ледниковой и нивальной обработкой. Обширные поверхности плато благоприятствуют переносу больших масс снега на подветренные склоны, за счет которых образуются наиболее мощные лавины. Преобладают лотковые лавины и осы, причиной схода лавин являются снегопады, метели обрушения снежных карнизов. Горы относятся к районам со значительной и средней лавинной опасностью.

III. Внутренние континентальные районы с лавинами сублимационного диафтореза (разрыхления снежного покрова вследствие температуроградиентного метаморфизма): 13 — Северный Урал; 14 — Южный Урал; 15 — Внутренние Саяны; 16 —

Енисейский кряж; 17 — Верхоянские горы, хребты Черского и Илин-Тас; 18 — Яно-Оймяконское и Юагино-Алазейское плоскогорья; 19 — Северо-Байкальское, Патомское, Алданское и Юдомо-Майское нагорья; 20 — Байкальские горные цепи; 21 — Забайкалье; 22 — Становой хребет и Становое нагорье; 23 — Срединный и Ганальский хребты Камчатки.

Большая часть территории зимой занята областью высокого атмосферного давления, центр которой располагается над Монголией и Забайкальем. В течение всей зимы господствует холодный континентальный воздух, образующийся преимущественно в результате трансформации арктических воздушных масс. Поэтому для зимних месяцев характерны низкие температуры воздуха и отсутствие оттепелей. В холодный период выпадает около 20—25% годовой суммы осадков. Остальная часть выпадает в летнее время. На распределение атмосферных осадков внутри территории сильное влияние оказывает горный рельеф. В горах Урала и Южной Сибири наибольшее количество осадков получают западные склоны горных цепей. В горах Северо-Востока наиболее увлажнены склоны, обращенные к влажным воздушным массам Тихого океана. Высота снежного покрова колеблется от 10 до 150 см.

Существенное перераспределение твердых осадков производит ветер, скорость которого заметно возрастает с увеличением абсолютной высоты. На вершинах и перевалах часто бывают сильные ветры (до 35—40 м/с). Переуветриваемый горными ветрами снег заполняет ущелья, скапливается в понижениях. В таких местах его мощность достигает иногда нескольких метров. Снег, выпадающий на землю, отличается большой рыхлостью и подвижностью. По гребням склонов и в лавиносборах образуются снежные карнизы и козырьки мощностью до 10—12 м и протяженностью до 100 м. При низких зимних температурах в снежном покрове возникают мощные горизонты глубинной изморози, приводящие к неустойчивому состоянию снега на склонах.

Основной причиной образования лавин является уменьшение устойчивости снежного покрова в результате его перекристаллизации и образования глубинной изморози. В верхнем поясе гор играет существенную роль метелевый перенос снега. В некоторых районах наблюдаются лотковые лавины и осы во время снеготаяния в весенний период.

IV. Районы южного горного пояса с лавинами из свежевыпавшего снега, снежных плит и адвективными лавинами: 24 — Восточные Карпаты; 25 — Горный Крым; 26 — Большой Кавказ; 27 — Закавказское нагорье; 28 — Талышские горы; 29 — Копетдаг; 30 — Памиро-Алай; 31 — Западный Памир; 32 — Восточный Памир; 33 — Западный Тянь-Шань; 34 — Северный Тянь-Шань; 35 — Центральный Тянь-Шань; 36 — Джунгарский Алатау; 37 — Тарбагатай; 38 — Северный Алтай; 39 — Юго-Западный и Северо-Восточный Алтай; 40 — Цент-

ральный Алтай; 41 — Кузнецкий Алатау и Горная Шория; 42 — Западный и Восточный Саяны; 43 — Хинган-Буреинские горы.

Наиболее существенными с точки зрения лавинообразования общими чертами климата южного горного пояса являются: 1) большое количество осадков и значительная мощность снежного покрова (100—300 см); 2) значительная пестрота в распределении осадков, усиливающаяся с продвижением в восточные районы, где для подветренных склонов, внутренних горных плато и межгорных котловин характерна небольшая мощность (10—20 см), а иногда и отсутствие снежного покрова; 3) сравнительно мягкие температуры зимнего периода, особенно характерные для западной и центральной частей пояса (Карпат, Горного Крыма, Кавказа, Памиро-Алая и Западного Тянь-Шаня), где зимой часты колебания температуры около 0° и глубокие оттепели, способствующие промачиванию снежных толщ и сходу мощных лавин; 4) фёны, благоприятствующие возникновению оттепелей и лавиноопасных ситуаций, а в восточных районах вызывающие даже исчезновение снежного покрова в долинах; 5) метелевый перенос снега, роль которого в восточных районах ослабевает.

Громадная протяженность южного горного пояса с запада на восток вызывает ослабление воздействия западных атлантических воздушных масс и усиление влияния воздушных масс Арктики и Центральной Азии. Если для европейской части этого горного пояса характерен средиземноморский тип климата с зимним максимумом осадков и мягкой зимой, то восточные районы испытывают значительное континентальное влияние Центральной Азии, а также вторжение арктических воздушных масс. Поэтому Северный Тянь-Шань, Заилийский Алатау, Алтай и Саяны несколько приближаются по типу лавинных режимов к внутренним континентальным районам. Они отличаются от западных районов уменьшением роли метелевого переноса, зона которого ограничивается лишь верхним поясом гор. Характерны спокойные обильные снегопады, большая, чем в западных районах, рыхлость снега и появление горизонта лавинной изморози.

Для гор южного пояса характерно развитие альпийского типа рельефа и сильно расчлененного среднегорья, что благоприятно для развития густой сети мощных лавиносборов. Наиболее характерные типы лавин — мокрые лотковые и осовы, большая часть которых связана с оттепелями и весенним потеплением. Наиболее мощные лавины сходят во время обильных снегопадов. Характерны также лавины из снежных плит.

V. Тихоокеанские и Приморские районы с лавинами из мокрого метелевого и сложностратифицированного снега: 44 — гора Чукотского полуострова; 45 — Корякские нагорья; 46 — северное и северо-восточное побережье Охотского моря; 47 — Восточный хребет и Южная вулканическая область Камчатки,

Командорские острова; 48 — Курильские острова; 49 — Западно- и Восточно-Сахалинские горы; 50 — восточные склоны хр. Джугджур; 51 — Сихоте-Алинь и Приморье.

Эти районы расположены вдоль побережья Тихого океана и Охотского моря в субарктическом и умеренном поясах и в связи с большими климатическими различиями характеризуются неравномерным распределением снежного покрова. В южной половине Приморья и на восточных склонах хребтов Сихоте-Алинь и Джугджур высота снежного покрова достигает соответственно 40 и 80 см. В других районах его мощность в зонах ветровой тени достигает 150 см и более. Снег лежит до 200 дней в году. Зимы отличаются обильными снегопадами и сильными ветрами. Частое прохождение циклонов сопровождается оттепелями, иногда дождями и метелями, что обуславливает образование сложностратифицированного строения снежной толщи. В зонах прохождения циклонов (Камчатка, Курильские острова, Корякские горы) массовый сход лавин отмечается в январе—феврале, в районах с муссонным климатом (Приморье, Сахалин и др.) — в марте—апреле. В описываемых районах сходят в основном мокрые лавины.

6.3. КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ

В ходе исследований лавинной опасности горных районов составляются мелкомасштабные, среднемасштабные и крупномасштабные карты оценки лавинной опасности.

Мелкомасштабные обзорные карты составляются в масштабе 1 : 1 000 000 и мельче с целью дать общее представление о территориальном распределении лавинной опасности и некоторых элементов режима лавин. К такому типу относится «Карта лавиноопасных районов СССР» (см. рис. 6.1). На этих картах чаще всего отображают обобщенные региональные характеристики степени лавинной опасности, преобладающих генетических типов лавин и густоты сети путей схода лавин. Имеются также карты мощностей лавин, частоты и периода схода лавин и карты факторов лавинообразования.

Среднемасштабные карты (масштаб крупнее 1 : 1 000 000 до 1 : 100 000) предназначены для фоновой оценки количественных характеристик лавинной опасности. По своему целевому назначению они разделяются на научные и прикладные. Научные карты служат для исследования региональных закономерностей снеголавинного режима и комплексного анализа географических условий горного региона. Прикладные карты предназначаются главным образом для проектных организаций. Они используются на стадии ТЭО (технико-экономического обоснования) предполагаемого размещения в горных районах промышленных объектов, дорог, линий связи и других зданий и сооружений. Эти карты оказываются полезными также при разработке технических заданий на проведение специализиро-

ванных снеголавинных изысканий для проектирования противолавинных мероприятий и при составлении крупномасштабных карт.

На рис. 6.3 представлен фрагмент карты (Залиханов, 1981), на которой выделены зоны с различной степенью лавинопроявления (в данном случае $K = \frac{s_{\text{л}}}{s}$, где $s_{\text{л}}$ — площадь лавиноак-

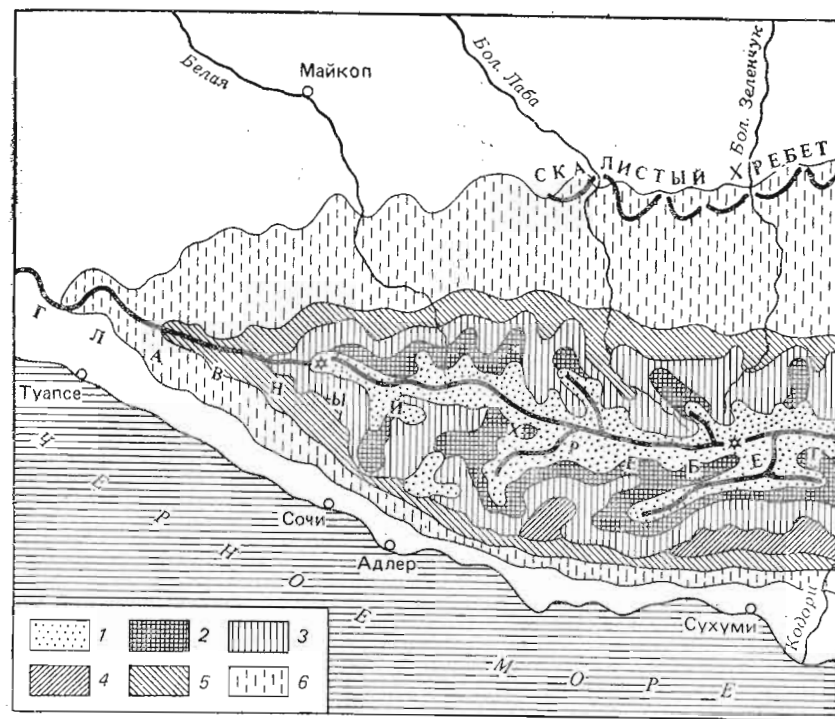


Рис. 6.3. Фрагмент карты лавинной опасности Большого Кавказа (Залиханов, 1981):

1 — зона наибольшей активности лавинной опасности, $K > 75\%$; 2 — зона значительной лавинной опасности ($K = 50 \div 75\%$); 3 — зона средней лавинной опасности ($K = 25 \div 50\%$); 4 — зона малой лавинной опасности ($K = 5 \div 25\%$); 5 — зона наименьшей лавинной опасности ($K = 1 \div 5\%$); 6 — зона потенциальной лавинной опасности ($K < 1\%$)

тивных участков в бассейне площадью s). Информативность карты существенно повышается при наличии составленных в том же масштабе карт фоновой оценки факторов, влияющих на лавинообразование. Так, М. Ч. Залихановым для оценки снеголавинного режима гор Большого Кавказа были составлены карты суммы атмосферных осадков, температуры воздуха, распределения наибольших высот снежного покрова, максималь-

ных запасов воды в снежном покрове, дат появления и окончания лавинной опасности, количества лавинных дней.

При составлении среднемасштабных карт лавинной опасности проводятся картометрические работы с использованием и дешифрированием космических и высотных снимков, применяются также методы комплексного географического анализа, включающие оценку метеорологических условий по данным метеорологических станций, обработку материалов полевых и аэровизуальных обследований и литературных сведений о снежном покрове и лавинах и статистико-вероятностные расчеты.

Крупномасштабные карты лавиноопасных зон должны содержать конкретные сведения, необходимые для рационального размещения объектов в лавиноопасных районах, организации зимнего отдыха в горах, проведения строительных и других работ в лавиноопасные периоды и для проектирования противолавинных мероприятий и сооружений.

В соответствии со строительными нормами (СН 517—80) материалы снеголавинных изысканий должны содержать комплексную схематическую карту лавиноопасных зон масштаба 1 : 25 000 или 1 : 50 000, на которой выделяются зоны зарождения лавин, показываются направления движения лавин и отмечаются видимые и предполагаемые границы распространения лавин, выделяются зоны распространения леса (рис. 6.4). Карты сопровождаются каталогом лавиносборов с количественными характеристиками их размеров, сведениями о лавинах, территориальными характеристиками температурного режима, твердых осадков, метелевого снегопереноса и снежного режима. Некоторые из этих сведений могут отображаться на карте лавиноопасных зон или на вспомогательных картах.

Работы по составлению карты лавиноопасных зон можно условно разделить на три этапа: 1) камеральное дешифрирование аэрофотоснимков летнего залета и на топографической карте выделяются контуры лавиносборов; лавиносборы нумеруются, и составляются их каталоги; по литературным источникам определяются ориентировочные значения средних и максимальных значений количества твердых осадков и высота снежного покрова в зонах зарождения лавин, оцениваются вероятные максимальные объемы лавин; 2) весенние облеты и летние полевые работы, при которых уточняются границы лавиносборов, особенно границы зон выброса лавин; выявляются дополнительные сведения, характеризующие лавиносборы и снеголавинный режим; 3) уточнение каталога лавинных очагов; составляется окончательный вариант карты.

При детальном снеголавинных изысканиях составляются карты лавиносборов и прилегающих к ним участков в масштабе 1 : 5 000 или 1 : 10 000 (рис. 6.5). Топографическая основа этих карт составляется по материалам фототеодолитных съемок. На карте лавиносбора по возможности четко выделяются зоны зарождения лавин, отмечается расположение линии

отрыва наблюдаемых лавин и ее положение при сходе расчетной максимальной лавины. Особое внимание уделяется изображению характерных форм рельефа, поворотов лавинного лотка и положения границ выброса лавин различной повторяемости. На картах лавиносборов, где предполагается строить сооружения для регулирования отложений снега и искусственного

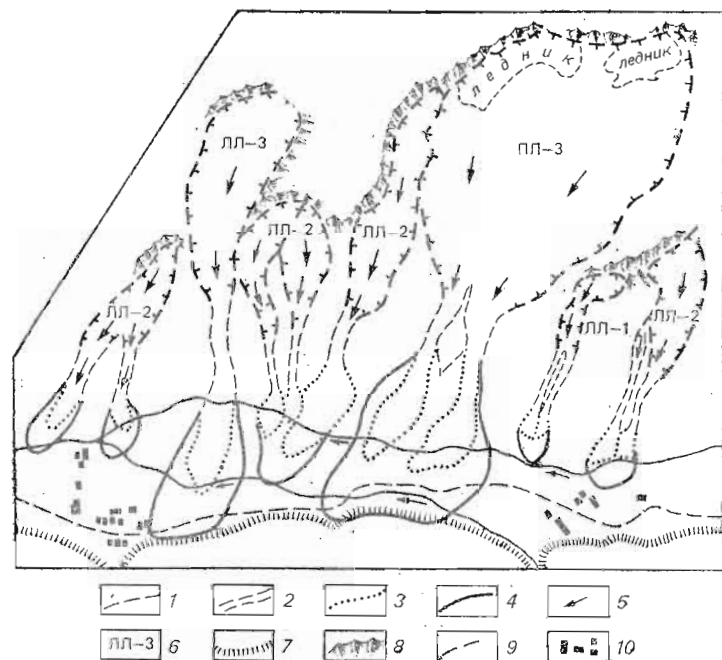


Рис. 6.4. Фрагмент схематической карты лавиноопасных зон масштаба 1:25 000 (составил Е. А. Золотарев):

1 — границы зон зарождения лавин; 2 — то же транзита лавин; 3 — то же отложения лавин (видимые в ландшафте); 4 — то же с повторяемостью 1 раз в десятилетие; 5 — то же расчетные с повторяемостью 1 раз в 100 лет; направление движения лавин; 6 — индекс лавиносбора по классификации Г. К. Тушинского; 7 — подошва склона; 8 — рисунок скал; 9 — дорога; 10 — строения

удержания снежного покрова на склоне, желательно отображать его распределение и направление метелевого снегопереноса.

Для расчетов скоростей движения и дальностей выброса лавин требуются продольные профили путей их схода. Продольные профили масштаба 1:5 000 составляются по топографическим картам лавиносборов. Для составления профиля более крупного масштаба (1:2 000 или 1:1 000) используются детальные способы съемки.

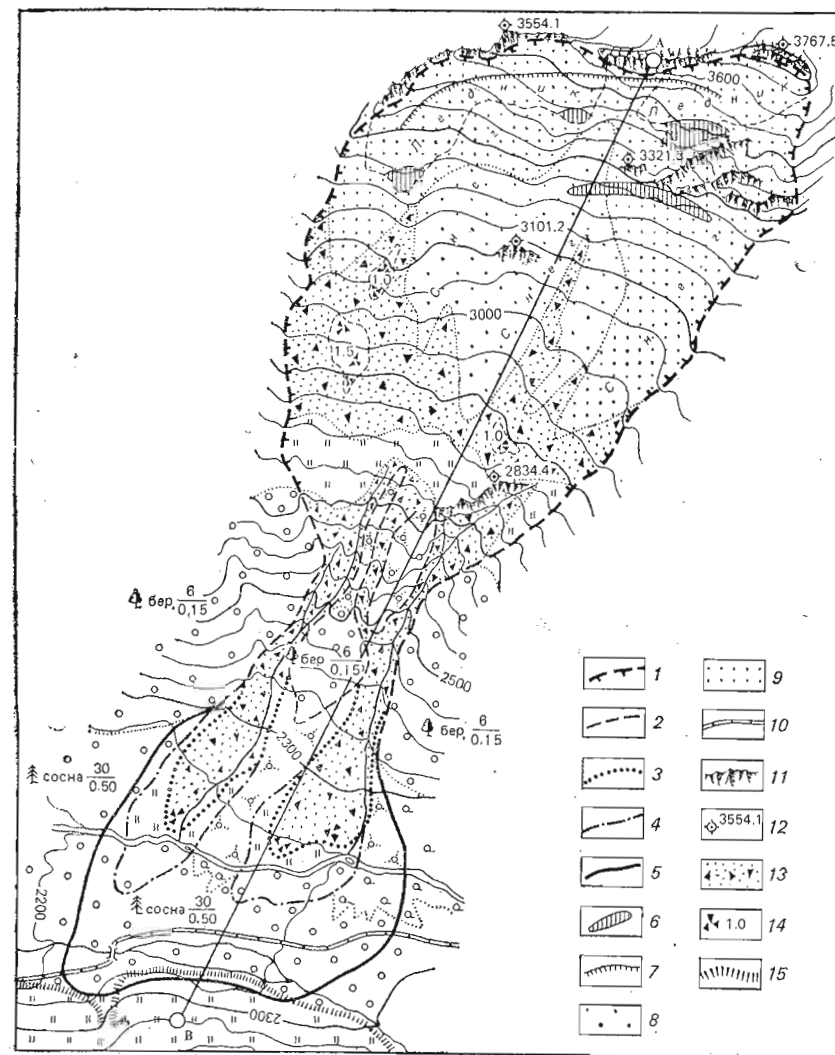


Рис. 6.5. План лавиносбора (составил Е. А. Золотарев):

1 — граница зоны зарождения лавин; 2 — граница зоны транзита; 3 — граница зоны отложения лавин ежегодной повторяемости; 4 — то же с повторяемостью 1 раз в 10 лет; 5 — расчетная граница максимальной дальности выброса; 6 — зоны преимущественного отрыва лавин ежегодной повторяемости; 7 — линии отрыва наиболее мощных лавин; 8 — высота снега в период максимального его накопления 150—200 см; 9 — то же 200—250 см; 10 — дорога; 11 — рисунок скал; 12 — ориентирные точки; 13 — мелкообломочная осыпь; 14 — крупнообломочная осыпь; 15 — подошва склона

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СНЕЖНЫМ ПОКРОВОМ И ЛАВИНАМИ

7.1. ОРГАНИЗАЦИЯ СНЕГОЛАВИННЫХ РАБОТ

Одной из обязанностей Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды является получение исходной информации о снежном покрове и лавинах для обслуживания народного хозяйства и прогнозирования лавинной опасности.

Учреждения Гидрометслужбы проводят следующие специальные работы: а) наблюдения за снежным покровом, лавинами и факторами лавинообразования на специализированных снеголавинных станциях; б) прогнозирование лавинной опасности; в) научные исследования процессов лавинообразования; г) регистрацию и описание лавин; д) описание лавин при снегомерных и гляциологических работах, аэровизуальных наблюдениях и обследованиях; е) картографирование снежного покрова и лавин; ж) сбор и систематизацию сведений о лавинах; з) обследование лавиноопасных районов по заявкам заинтересованных организаций; и) составление паспортов лавиносборов и кадастров лавин; к) разработку рекомендаций по защите от лавин.

Помимо Гидрометслужбы наблюдения за снежным покровом и лавинами проводят научно-исследовательские подразделения АН СССР и академий союзных республик, МГУ и других ведомств. Специализированные снеголавинные изыскания проводят проектные и изыскательские организации. Снеголавинные работы выполняются путем организации экспедиционных работ и стационарных наблюдений.

7.2. ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ РАБОТЫ

Основными задачами экспедиционных работ на разных этапах являются: определение признаков лавинной опасности малоизученных районов; определение границ лавиноопасных зон; получение комплекса сведений для составления крупномасштабных карт лавиноопасных зон; снегомерные съемки; детальные обследования и составление карт лавиносборов; определение объема и других характеристик лавин.

Экспедиционные работы требуют проведения предварительных камеральных и составления плана полевых работ. Прежде всего изучаются все имеющиеся материалы о снеголавинном режиме в интересующем районе. Производится предварительное дешифрирование аэрофотоснимков (Акифьева, 1980) и подго-

тавливаются картографические материалы. Анализируются материалы ближайших метеостанций, среди которых особого внимания требуют климатические факторы, влияющие на лавинный режим: а) общая сумма и распределение по месяцам твердых атмосферных осадков, число дней с осадками; б) наибольшая интенсивность, длительность снегопада и количество осадков за снегопад; в) даты установления и схода снежного покрова, месяцы с наибольшим количеством снега; г) наибольшая и средняя высота снежного покрова; плотность снега; д) среднесуточные и экстремальные температуры воздуха зимой; е) число дней с оттепелями, продолжительность оттепелей и температура воздуха; ж) преобладающие и максимальные скорости ветра и его направление; з) число дней с метелями в каждом месяце.

Перечисленные материалы позволяют еще до выезда на полевые работы оценить по топографическим картам и аэрофотоснимкам рельеф, а по данным метеорологических станций — основные черты снеголавинного режима.

Для уточнения границ распространения лавиноопасных зон в малоизученных районах, где отсутствуют гидрометеорологические станции и посты, рекомендуется проводить регистрацию сошедших лавин по их следам в весенний период экспедиционным путем и аэровизуальными наблюдениями.

Во время летних экспедиционных работ по местности определяются геоморфологические и геоботанические признаки лавин, обследуются зоны зарождения лавин, пути их движения и зоны выброса, определяются границы лавиноопасных зон.

При необходимости проводятся фототеодолитные работы для составления топографической основы карт лавиносборов.

На топографическую карту исследуемого участка наносятся морфометрические характеристики рельефа, контуры снеговосборов, характеристика растительности, границы действия лавин и распространения воздушных волн.

Самые достоверные признаки лавинной опасности — лавинные снежинки и конусы выноса, залегающие в каналах схода лавин и у подножия горных склонов.

Конусы выноса лавин состоят из снега, иногда перемешанного с обломками скал, грунтом, дерновиной и со стволами деревьев. При таянии лавинного снега конус выноса понижается, становится сильно расчлененным и бугристым. От конусов выноса временных водных и селевых потоков лавинные отличаются наличием на поверхности отложений скальных глыб, находящихся в неустойчивом состоянии, и прослоек погребенной почвы и растительности.

Помимо конусов выноса геоморфологическими признаками лавин являются различные формы микрорельефа:

а) параллельные гряды обломочного материала, образующиеся при движении лавинного потока по поверхности дна долины;

б) лавинные бугры, которые создаются выбрасыванием лавинной речного аллювия на противоположный берег реки;

в) ямы выбивания, возникающие в рыхлых аллювиальных отложениях при ударах лавины о дно долины у подошвы когоры;

г) рыхлая толща несортированного обломочного материала, скапливающегося в результате таяния загрязненного лавинного снега;

д) гряды у подошвы склона в местах, где со склона сходят снежные осы без фиксированных русел.

Лавины оказывают значительное влияние на растительный покров. К геоботаническим признакам схода лавин относятся: а) лавинные прочесы в лесной зоне; б) угнетенные виды деревьев, часто прижатые к земле или имеющие изогнутые каплевидные формы; в) смешанные леса, произрастающие среди хвойных лесов; г) запаздывание фенологических фаз растительности в местах, где скапливался лавинный снег и его таяние завершилось позже, чем на окружающих участках; д) изменение состава растительных ассоциаций.

По окончании полевых работ составляется подробный отчет, содержащий полученные сведения о режиме лавинной деятельности и количественные характеристики лавин, а также карты оценки лавинной опасности и карты фактического материала.

Много ценных сведений для характеристики лавинной опасности дают маршрутные снегосъемки.

7.3. СТАЦИОНАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

На снеголавинных станциях оборудуется одна или несколько стационарных площадок для наблюдения за физико-механическими свойствами, стратиграфией и температурой снежного покрова. Основная площадка выбирается вблизи от метеорологической площадки, чтобы получить зависимость режима снежного покрова от метеорологических факторов. Рекомендуется еще выбрать вспомогательные площадки на разных высотах и склонах разных экспозиций для выявления влияния микроклиматических особенностей на процессы, протекающие в снежной толще. В частности, желательно проводить наблюдения в местах, где режим снежного покрова близок к режиму снегосборов, а также в местах метелевого переноса и зонах аккумуляции метелевого снега.

Одним из основных факторов, определяющих степень лавинной опасности, является высота снежного покрова и особенно ее быстрое увеличение при снегопадах или метелевом снегонакоплении. Наблюдения за высотой снежного покрова проводятся на стационарных площадках, при маршрутных снегосъемках и по рейкам в снегосборах с дистанционным визуальным отсчетом.

В районах с интенсивным метелевым переносом важное значение имеют систематические измерения направления, интенсивности и продолжительности переноса. По данным наблюдений строятся розы метелей по суммарному переносу снега и по числу метелей, а также графики зависимости интенсивности метелевого переноса от скорости ветра.

Наблюдения за стратиграфией снежной толщи проводятся с помощью снежного бура или в контрольных шурфах. В шурфах определяется также послойная плотность снега и его временное сопротивление сдвигу и разрыву. Дополнительно могут измеряться предел прочности снега на сжатие, коэффициенты трения и вязкости, влажность снега. Одновременно с механическими свойствами снега определяют послойную твердость снежного покрова с помощью ударного пенетromетра для получения статистических коррелятивных связей между твердостью и другими прочностными характеристиками снега.

В местах зарождения лавин наблюдения за снежным покровом проводятся дистанционными методами и маршрутными обследованиями. В настоящее время разрабатываются и внедряются телемеханические комплексы для автоматического измерения параметров снежного покрова и метеоданных непосредственно в зонах зарождения лавин и передачи собираемой информации на диспетчерский пункт снеголавинной станции.

Снеголавинные станции ведут регистрацию лавин с помощью регистраторов времени схода лавин и непосредственных обследований лавиносборов. Для каждой сошедшей лавины отмечается место, дата и время схода, приводятся предшествовавшие сходу характеристики снежного покрова и метеорологических условий, делается описание лавины и по возможности определяется ее объем. При наличии карт лавиносборов на них отмечаются линии отрыва, пути движения и места отложения лавин.

Данные систематических наблюдений за снежным покровом и лавинами на снеголавинных станциях используются для прогнозирования лавинной опасности и проведения профилактических противолавинных мероприятий. Маршрутные и стационарные наблюдения в ряде случаев проводятся при проведении инженерных изысканий в лавиноопасных районах.

7.4. ИНЖЕНЕРНЫЕ СНЕГОЛАВИННЫЕ ИЗЫСКАНИЯ

При инженерных изысканиях для строительства новых, расширения и реконструкции действующих предприятий, зданий, сооружений, дорог, линий связи и других в лавиноопасных районах возникает необходимость проведения дополнительных специальных снеголавинных изысканий. Они необходимы для рационального размещения объектов в лавиноопасных районах, проектирования противолавинных мероприятий и сооружений и

учета лавинного режима при составлении прогноза изменений окружающей среды под воздействием строительства и эксплуатации предприятий, зданий и сооружений.

Объем и содержание снеголавинных изысканий определяется техническим заданием и оформляется разрешением на производство изысканий. Программа снеголавинных изысканий должна содержать: наименование и месторасположение объекта; краткую физико-географическую характеристику района и местных природных условий; сведения об изученности снеголавинного режима района; состав, объемы, методы и последовательность выполнения изысканий; требования, связанные с охраной окружающей природной среды и обеспечением безопасности ведения работ.

Снеголавинные изыскания могут включать: анализ имеющихся сведений о снеголавинном режиме региона и района планируемых изысканий; обработку картографических материалов, аэрофотоснимков и космических снимков; производство специальных аэрофотосъемок; проведение экспедиционных полевых изысканий в зимнее, весеннее и летнее время; организацию снеголавинных станций и постов; проведение разовых и систематических наблюдений за снежным покровом и лавинами; проведение снегомерных съемок; проведение топографических работ; теоретические расчеты параметров снежного покрова и лавин заданной обеспеченности, требуемых для проектирования противолавинных мероприятий и сооружений; проведение специальных исследований.

Материалы снеголавинных изысканий должны содержать: комплексную схематическую карту лавиноопасных зон масштаба 1 : 25 000 или 1 : 50 000, на которой должны быть указаны лавиносорбы; направления движения лавин, видимые и предполагаемые границы их распространения; территориальные характеристики температурного режима, твердых осадков, метелевого снегопереноса и снежного покрова; характеристики условий формирования лавин; кадастры лавинных очагов с количественными характеристиками зон зарождения лавин, лавинных лотков и зон выброса; сведения о сошедших лавинах; комплекс сведений о снеголавинном режиме для участков, выделенных для детальных изысканий; рекомендации по размещению объектов и выбору средств противолавинной защиты; расчетные характеристики снежного покрова и лавин для проектирования противолавинных мероприятий и сооружений.

Для участков детальных снеголавинных изысканий составляются:

1) топографические карты лавиносорбов и прилегающих к ним участков шириной не менее 100 м масштаба 1 : 5000, на которых указываются морфологические характеристики поверхности, наличие и вид растительности, направление метелевого снегопереноса, характеристики снежного покрова, линии отрыва снежных пластов, границы распространения лавин с указа-

нием их повторяемости, границы действия снеговоздушных потоков (воздушных волн);

2) продольные профили путей схода лавин в масштабе 1 : 5000 — 1 : 1000 с указанием места образования и границ выброса лавин различной обеспеченности, в том числе границ распространения крупных лавин редкой повторяемости указанной в задании обеспеченности;

3) сводки сведений, содержащие описание условий возникновения лавин, объемы лавин различной повторяемости и их динамические характеристики.

Для лавиносорбов, где намечается строительство противолавинных сооружений, дополнительно определяются расчетные параметры снежного покрова и лавин заданной обеспеченности, требуемые для определения нагрузок на сооружения.

В особо сложных природных условиях снеголавинные изыскания могут производиться в несколько этапов, включая проведение наблюдений за снежным покровом и лавинами в период проектирования, строительства и в первые годы эксплуатации противолавинных сооружений и последующую корректировку проекта противолавинной защиты.

7.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА И ЛАВИН

Для надежного выполнения своих защитных функций противолавинные сооружения должны быть рассчитаны на восприятие нагрузки от снежного покрова и лавин при наиболее невыгодных условиях за расчетный период их эксплуатации. Поэтому одной из задач снеголавинных изысканий является определение вероятного сочетания неблагоприятных условий и соответствующих им параметров снежного покрова и лавин.

Снеголавинные изыскания выполняются в ограниченные сроки, и за период наблюдений редко удается зафиксировать мощные лавины редкой повторяемости. Если же и будет обследована такая лавина, то это не исключает возможности образования более мощной лавины. Определить какие-то предельные величины объемов и дальности выброса лавин практически невозможно, так как количество твердых осадков и объемы лавин подчиняются вероятностному распределению без четких ограничений. В связи с этим для проектирования противолавинных мероприятий определяют вероятные параметры мощных лавин редкой повторяемости. Эти параметры называют расчетными в отличие от фактически измеряемых, так как они предназначены для инженерных расчетов и характеризуют наиболее мощные лавины заданной расчетной повторяемости (например, лавины, которые сходят не чаще одного раза в 20, 50 или 100 лет). Они зависят от принятой повторяемости лавин (чем меньше повторяемость, тем большую лавину можно ожидать). Расчетная повторяемость задается нормативными документами или проектными организациями в зависимости от на-

значения и вида защищаемого объекта. Соответствующие заданной повторяемости параметры лавин определяются на основании статистической обработки результатов наблюдений и расчетов.

В соответствии с действующими нормами расчетная высота снежного покрова на склонах, где предусматривается его искусственное удержание с помощью удерживающих сооружений, должна определяться по данным многолетних наблюдений и снегомерных съемок в заданном районе как максимальная за период не менее 20 лет. При отсутствии таких данных этот параметр можно определить на основе сокращенных наблюдений и снегомерных съемок сопоставлением их с параметрами снежного покрова на ближайших метеостанциях и снегомерных пунктах, где наблюдения проводились не менее 20 лет. В этом случае особое внимание уделяется выявлению корреляционных связей между характеристиками снежного покрова в обследуемых лавиносборах и на площадке метеостанции с учетом разности абсолютных высот, экспозиции склонов и характера их поверхности.

При определении расчетной высоты снежного покрова в зоне зарождения лавин необходимо также учитывать ветровой снегоперенос и вероятность увеличения высоты снежного покрова из-за дополнительного накопления метелевого снега около снегоудерживающих сооружений. Расчетные значения плотности, температуры и механических свойств снежного покрова в зоне застройки снегоудерживающими сооружениями определяются по данным многолетних наблюдений с учетом их изменчивости в годичном и многолетнем циклах. При этом может быть несколько расчетных сочетаний в зависимости от поставленных задач (например, проектировщики могут интересоваться параметрами снежного покрова как во время достижения максимальной высоты снежного покрова, так и в период, когда масса снега достигает предельной величины).

Основные расчетные параметры снежных лавин — объем и дальность выброса лавин, высота, ширина, плотность и скорость лавинного потока в местах, где намечается строительство противолавинных сооружений. В качестве расчетных принимаются мощные редкосходящие лавины 2- или 1%-ной обеспеченности, т. е. максимальные лавины, которые сходят не чаще одного раза соответственно в 50 или 100 лет.

Расчетные объемы и дальности выброса лавин определяются на основании статистической обработки данных фактических наблюдений. Так как ряды наблюдений обычно короткие, то приходится пользоваться суммой сведений о снежных лавинах не только в заданном, но и в других подобных лавиносборах. Объединение и статистическая обработка таких сведений позволяют подойти к оценке вероятных параметров лавин при недостатке прямых измерений.

Способы определения скоростей движения, плотности и размеров лавинного потока изложены в гл. 5.

Глава 8

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ

8.1. ВИДЫ ПРОГНОЗОВ

В настоящее время применяется три вида прогнозов лавинной опасности — фоновый мелкомасштабный для горной территории, фоновый крупномасштабный для горного бассейна или группы лавиносборов и детальный для заданного лавиносбора или лавиноопасного склона (локальный прогноз).

Лавинный прогноз предполагает заблаговременное определение некоторого временного интервала, в течение которого снегонакопление и процессы метаморфизма могут привести к нарушению устойчивости снежного покрова и образованию лавин. Он тесно связан с прогнозом метеорологических условий, так как вид, интенсивность выпадения, количество атмосферных осадков, метелевый снегоперенос, температура и влажность воздуха и другие характеристики метеорологических условий непосредственно влияют на состояние и устойчивость снежного покрова.

Фоновый прогноз заключается в оценке лавинной опасности в рассматриваемом горном районе и выдается в виде «лавиноопасно» или «нелавиноопасно». Заблаговременность прогнозов лавин ограничивается отсутствием количественных методов длительного прогноза интенсивности осадков, интенсивности и продолжительности оттепели и других метеорологических показателей в горах. Обычно она измеряется часами, а зачастую прогноз выдается с «нулевой» заблаговременностью, т. е. дается лишь текущая оценка лавинной опасности.

Локальный прогноз предусматривает определение показателей устойчивости снежного покрова в зоне зарождения лавин конкретного лавиносбора и времени до предполагаемого самопроизвольного схода лавин, оценку вероятного объема и дальности выброса лавины, выбор оптимальных условий для ликвидации лавинной опасности путем искусственного спуска лавины.

Методы прогноза лавин в СССР разрабатывались начиная с 30-х годов, сначала в Хибинах, затем на Кавказе, где они нашли широкое практическое применение. В послевоенные годы существенные успехи в прогнозировании лавинной опасности достигнуты также в горах Средней Азии, Казахстана и Южного Сахалина.

Наиболее разработан фоновый прогноз лавин, вызываемых снегопадами и метелями. Достигнуты также определенные успехи в разработке фоновых прогнозов лавин из мокрого снега,

основанных главным образом на анализе снего-метеорологической обстановки и установленных статистических зависимостей между временем наступления лавинной опасности и изменением факторов, определяющих сход лавин. При этом используется вся доступная информация о строении, плотности и температурном режиме снежного покрова и локальные характеристики его устойчивости.

Методы локальных прогнозов разработаны еще слабо, что обусловлено отсутствием методики и аппаратуры для получения надежной информации о состоянии и свойствах снежного покрова в зонах зарождения лавин, а точность существующих способов определения прочностных характеристик и показателей устойчивости снежного покрова мала.

8.2. ПРОГНОЗ ЛАВИН, ВЫЗЫВАЕМЫХ СНЕГОПАДАМИ И МЕТЕЛЯМИ

Снегопады и метели непосредственно влияют на устойчивость снежного покрова, поэтому лавины, вызванные ими, называют лавинами «прямого действия». Тем не менее на процессы лавинообразования оказывают существенное влияние и другие факторы. Для качественной оценки вероятности схода лавин оценивают 10 основных лавинообразующих факторов (Снежные лавины, 1965):

1. Высота старого снега. Первые снегопады обычно не сопровождаются лавинообразованием. Снег сначала заполняет неровности на склоне, и лишь после этого может возникнуть ровная гладкая поверхность, способствующая соскальзыванию новых слоев снежного покрова. Поэтому вероятность образования лавины тем больше, чем больше высота старого снега до начала снегопада. При этом весьма важно отношение высоты старого снега к характерным размерам неровностей на склоне. Так, на гладких травянистых склонах лавинная опасность может возникать при высоте снежного покрова в 15–20 см, а на склонах с крупными скальными выступами или кустами — лишь при высоте старого снега 1–2 м.

2. Состояние старого снега и его поверхность. Характер поверхности снега влияет на сцепление свежеснегавшего снега со старым. Гладкая поверхность ветровых снежных плит или ледяная корка благоприятствуют сходу лавин. Вероятность потери устойчивости свежего снега увеличивается, если такая поверхность была покрыта тонким слоем порошкового снега. Шероховатая поверхность, ветровые заструги, ноздреватые корки от дождя, наоборот, уменьшают возможность лавинообразования. Особенности старого снега определяют то количество свежеснегавшего или метелевого, которое он может выдержать не разрушаясь, и его способность удерживаться на склонах, не вовлекаясь в лавину при скольжении по нему нового снега. Особенно предрасполагают к лавинообразо-

ванию наличие слоев и прослоек глубинной изморози, образование которых в свою очередь определяется типом поверхности склона и термодинамическими условиями процессов перекристаллизации снежного покрова.

3. Высота свежеснегавшего или отложенного метелью снега. Увеличение высоты снежного покрова — один из важнейших факторов лавинообразования. Количество выпавшего снега часто используется в качестве показателя потенциальной лавинной опасности. Для каждого района есть определенные критические высоты свежего снега, при превышении которых возникает лавинная опасность. Однако надо всегда помнить, что высота снега как показатель лавинной опасности должна использоваться в сочетании с другими факторами лавинообразования.

4. Вид свежеснегавшего снега. Тип выпадающих твердых осадков влияет на механические свойства снежного покрова и его сцепление со старым снегом. Так, при выпадении холодных призматических и иглообразных кристаллов образуется рыхлый снежный покров, характеризующийся малым сцеплением. Он образуется также при выпадении звездчатых кристаллов в морозную безветренную погоду. Если же температура воздуха около 0°, то снежинки во время падения могут соединяться и выпадать в виде крупных хлопьев. Снежный покров из таких частиц быстро уплотняется. Наибольшая вероятность образования лавин возникает при формировании покрова из свежеснегавшего пушистого и сухого мелкозернистого снега; часто образуются лавины из сухого уплотненного снега, а при отложении влажного и мокрого снега лавины возникают редко.

5. Плотность свежеснегавшего снега. Наибольшая вероятность образования лавин наблюдается при образовании снежного покрова малой плотности — менее 100 кг/м³. Чем больше плотность нового снега во время снегопада, тем меньше вероятность лавин. Повышение плотности снега уменьшает вероятность возникновения лавин, но это правило не относится к снежным плитам, образующимся во время метелей.

6. Интенсивность снегопада (скорость отложения снега). При малой интенсивности снегопада уменьшение показателя устойчивости снежного покрова на склоне в результате увеличения сдвигающих усилий компенсируется увеличением устойчивости за счет повышения сцепления и коэффициента трения при уплотнении снега. По мере увеличения скорости отложения снега влияние увеличения его массы преобладает над влиянием его уплотнения и создаются условия для уменьшения устойчивости снежного покрова и образования лавин. Например, в районах Тянь-Шаня при интенсивности снегопада до 0,15 см/ч лавины не наблюдаются, а при возрастании ее до 0,8 см/ч наблюдаются в 45–75% случаев.

7. Количество и интенсивность выпадения осадков — фактор, по существу, соответствующий предыду-

щему. Он более точно характеризует приращение массы снега на единицу площади горизонтальной проекции склона, в том числе с учетом жидких осадков и метелей.

8. Оседание снега. Процессы уплотнения и оседания выпадающего снега увеличивают его сцепление и коэффициент внутреннего трения и этим способствуют повышению устойчивости снежного покрова. Снег малой плотности имеет малую начальную прочность, но быстро уплотняется; плотный снег при большой начальной прочности оседает медленно. Важное значение имеет оседание снега как во время снегопада или метели, так и сразу после их окончания. На лавинообразование иногда оказывает влияние оседание старого снега (например, неравномерные осадки снега под прочной снежной плитой могут привести к излому плиты и нарушению ее устойчивости).

9. Ветер. Ветровой перенос приводит к перераспределению снежного покрова и к образованию твердых корок и снежных плит и надувов. Ветер образует снежные карнизы и ниже их — скопления рыхлого снега. Сильный ветер создает подсос воздуха из снежной толщи, чем способствует миграции водяных паров и разрыхлению нижних слоев снега. В процессах лавинообразования ветер играет важную роль, особенно как фактор метелевого снегопереноса.

10. Температура. Влияние температуры на лавинообразование многостороннее. Температура воздуха влияет на вид выпадающих частиц твердых осадков, на формирование и уплотнение и температурный режим снежного покрова. Различия в температуре снежного покрова по глубине определяют процессы температурного метаморфизма. Температура снега существенно влияет на характеристики его вязких и прочностных свойств. Быстрое понижение температуры воздуха может приводить к образованию температурных трещин разрыва снежного пласта и возникновению лавин.

В США делались попытки использовать сведения о лавинообразующих факторах для оперативной оценки и прогнозирования лавинной опасности. Для этой цели каждый из перечисленных факторов оценивался по десятибалльной системе в зависимости от его предрасположения к лавинообразованию, затем эти баллы суммировались. Возможная сумма баллов от 0 до 100. Чем больше сумма баллов, тем вероятнее сход лавин, 0 означает отсутствие лавинной опасности, а 100 — наибольшую вероятность схода лавин.

Подобные способы оценки лавинообразующих факторов для фоновых прогнозов лавинной опасности применяются и в некоторых лавиноопасных районах в СССР. Для прогноза лавин во время снегопадов для района Северного Тянь-Шаня в дополнение к перечисленным 10 факторам используются еще характеристики синоптических процессов и устойчивости снежной толщи. При анализе синоптических процессов, приводящих к снегопадам и сходу лавин, выявлены наиболее типичные си-

туации и дана их количественная оценка в баллах. Устойчивость снежной толщи оценивается на основании измерений сопротивления снега сдвигу на экспериментальной площадке и определения показателя устойчивости снежного покрова в зоне зарождения лавин. На основании анализа и статистической обработки материалов наблюдений за лавинами и сопутствующих им метеорологических условий оценена вероятность схода

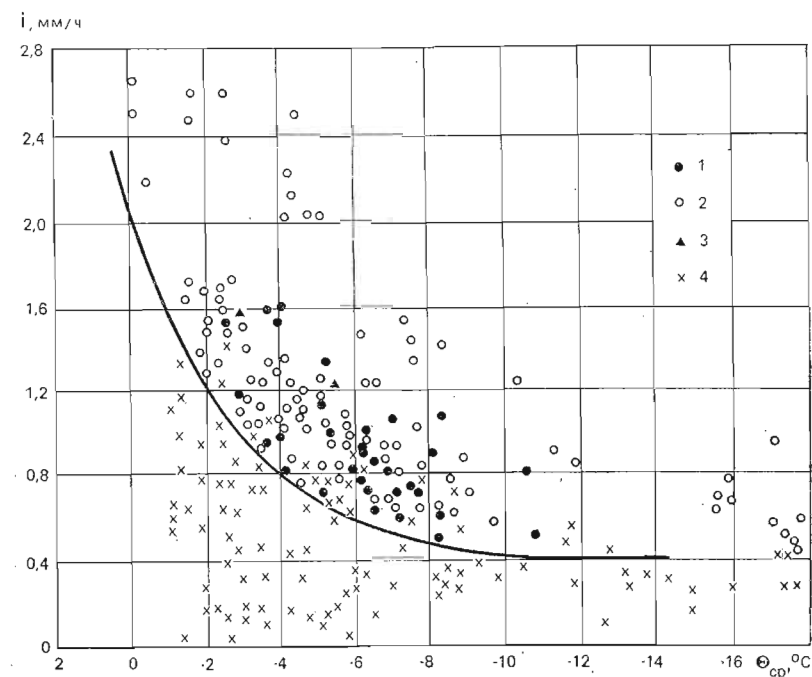


Рис. 8.1. Связь лавинообразования со средней интенсивностью осадков при снегопаде (i) и средней температурой воздуха ($\theta_{ср}$) (Практическое пособие по прогнозированию лавинной опасности, (1979):

1 — СЛС Кызылча; 2 — СЛС Дуكانт; 3 — СЛС Наугарзан; 4 — сход лавин не наблюдался

лавин в баллах в зависимости от лавинообразующих факторов. Общая сумма баллов показывает степень лавинной опасности, с увеличением суммы растет вероятность схода лавин. Подсчет баллов лавинообразующих факторов начинают производить при накоплении 7—8 см нового снега на площадке наблюдений снеголавинной станции. Затем периодически, через определенные промежутки времени, расчет повторяется. При известной скорости прироста толщины снега определяется время до наступления лавинной опасности как время достижения критической высоты снега.

Часто для прогноза лавин используются эмпирические графики связи схода лавин с интенсивностью снегопада, температурой воздуха при снегопаде, скоростью ветра и другими факторами. Например, на рис. 8.1 приведен один из таких графиков для Западного Тянь-Шаня. Здесь в координатной сетке $i - \theta_{ср}$ отложены точки, характеризующие значения средней интенсивности осадков и средней температуры воздуха на снеголавинных станциях, соответствующие времени схода лавин, а также для случаев, когда он не наблюдался. Видно

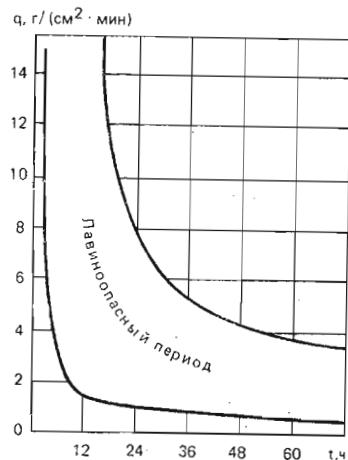


Рис. 8.2. Продолжительность периода лавинной опасности при метелях в Хибинах

и окончания лавинной опасности (рис. 8.2) в зависимости от интенсивности метелевого переноса (Практическое пособие..., 1979). Прогнозирование основывается на данных метелемерных наблюдений, одновременно с которыми ведутся наблюдения за распределением температуры в снежной толще и за температурой воздуха.

Оправдываемость прогнозов, основанных на эмпирических зависимостях, определяется прежде всего количеством и надежностью используемой метеорологической информации и тем, насколько четко эти зависимости характеризуют лавинную деятельность. Для повышения надежности прогнозов необходимо, чтобы метеорологические площадки располагались в высотной зоне наибольшей повторяемости лавин. Особое внимание следует уделять выделению факторов, наиболее сильно влияющих на лавинообразование в заданном районе, и комплексно использовать их для вероятностно-статистической оценки лавинной ситуации. Важно также своевременно анализировать процессы атмосферной циркуляции, предшествующие сходу лавин.

из свежевыпавшего и метелевого снега. Это позволяет увеличить заблаговременность прогнозов.

8.3. ПРОГНОЗ ЛАВИН, ВЫЗЫВАЕМЫХ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ СНЕГА

Для прогноза лавин необходимо учитывать не только текущие метеорологические условия, но и характеристики всей предыдущей части зимы. Особенно важно знать температурный режим, стратиграфическое строение, плотность и прочностные характеристики снега в зоне зарождения лавин. Проводить непосредственные наблюдения за снежным покровом в этой зоне опасно, поэтому его характеристику определяют на основании дистанционных наблюдений, замеров на опытной площадке и маршрутных снегомерных работ в лавинобезопасных местах вблизи зоны зарождения лавин.

Наиболее опасны склоны с относительно неглубоким, но значительно перекристаллизованным снежным покровом. Слой глубинной изморози в какой-то момент не выдерживает нагрузки находящейся на нем снежной плиты, происходит ее резкая осадка. Из-за неоднородности осадки возможно образование трещин в плите и нарушение ее устойчивости. Особо неблагоприятные условия возникают при сильном снегопаде или при отложении метелевого снега, когда возникает дополнительная нагрузка на потенциально неустойчивый слой глубинной изморози.

Опасно, когда снегопад при сравнительно высокой температуре воздуха образует пушистый покров, на который в дальнейшем навевается метелевый снег, образующий снежную плиту, где происходит быстрая перекристаллизация пушистого снега.

Неоднородность снежной толщи, особенно наличие в ней корок или слабых слоев, создает возможность схода лавин почти на всех стадиях развития снежного покрова. Поэтому на такие признаки следует обращать особое внимание.

Лавины, вызываемые перекристаллизацией снега, возникают обычно, когда на склоне есть потенциально неустойчивые однослойные или многослойные снежные плиты. На некоторых участках они находятся в локально неустойчивом состоянии и удерживаются на склоне за счет краевых усилий. Нарушение устойчивости этих плит может быть вызвано различными непредвиденными причинами (обрушение снежного карниза, падение камня, проход лыжника, ударная волна от сверхзвукового самолета, неравномерная осадка снега под плитой и т. п.). Выдать прогноз времени схода лавин практически невозможно, поэтому ограничиваются оценкой вероятности схода лавин и определением времени, когда наиболее целесообразно производить искусственное обрушение снега с лавиноопасных склонов.

С целью получения количественных характеристик снежного покрова для расчетов его локальной устойчивости на лавиноопасных склонах проводится шурфование снежной толщи на заранее выбранных участках с периодичностью в 10 дней. В это время определяют стратификацию снежной толщи, полойную плотность, пределы прочности снега на сдвиг по контактам слоев и на разрыв. Эти сведения дополняются данными зондирования снежного покрова на доступных склонах с помощью ударного пенетromетра. Если оказываются участки снежных плит с малым запасом устойчивости, то возникает необходимость учета возможности уменьшения показателя локальной устойчивости снежного покрова вследствие дальнейших процессов перекристаллизации. Если же выявляются участки локальной неустойчивости плит, то это указывает на лавинную опасность.

Для расчета изменений показателя локальной устойчивости в промежутки между обследованиями снежного покрова проводят расчеты интенсивности перекристаллизации и вероятных изменений прочностных свойств снега с использованием информации о метеорологических условиях и температуре снежного покрова. Таким же образом определяются прогнозные оценки вероятного уменьшения устойчивости снежного покрова на основании прогноза метеорологических условий и температурного режима снежной толщи.

Особое внимание уделяется прогнозу лавин при ожидаемом резком понижении температуры воздуха и при снегопаде. Понижение температуры вызывает дополнительные растягивающие напряжения в снежной плите в местах перегибов, что может послужить причиной образования трещины отрыва и нарушения устойчивости плиты. Даже небольшой снегопад может создать дополнительную нагрузку, достаточную для хрупкого разрушения глубинной изморози, нарушения сплошности снежных плит и образования лавин.

8.4. ПРОГНОЗ ЛАВИН ИЗ МОКРОГО СНЕГА

Массовый ход лавин из мокрого снега обычно происходит весной, когда начинается таяние снега. Такие лавины возможны и зимой в результате оттепелей и выпадения на снежный покров дождя. Прогноз таких лавин основан на анализе наблюдений за температурой, теплообменом и влажностью снежного покрова. Задача прогноза решается на основании анализа лавинообразующих факторов и их критических значений.

На основании анализа метеорологической ситуации в периоды образования лавин из мокрого снега в Западном Тянь-Шане выработаны следующие положения, которыми рекомендуется пользоваться при разработке прогнозов (Практическое пособие..., 1979).

1. Лавины из свежавыпавшего мокрого снега образуются в результате интенсивного потепления с переходом температуры воздуха через нуль. Сход лавин происходит, если за снегопад, предшествующий потеплению, сумма твердых осадков составила 10 мм и более.

2. Суточный прогноз лавин из свежавыпавшего снега состоит из двух видов: «лавиноопасно» и «нелавиноопасно» — с использованием эмпирических графиков связи лавинообразования с температурой воздуха. Кривые на этих графиках определяют критические значения дневной температуры воздуха, которые обуславливают начало лавинной опасности. Прогноз составляется заблаговременно (за 12 ч) и уточняется по фактической температуре воздуха.

3. Необходимым условием для схода лавин из старого мокрого снега является устойчивый (более одних суток) переход температуры воздуха к положительным значениям. Начало периода лавинной опасности определяется по эмпирическому графику, аналогичному для прогноза лавин из свежавыпавшего мокрого снега.

4. Прогноз лавин в период выпадения дождя выполняется по графику, характеризующему связь лавинообразования с ночной и максимальной температурой воздуха в дни выпадения дождя на поверхность снежного покрова.

В условиях Внутреннего Тянь-Шаня наиболее тесной оказалась зависимость между водностью снежного покрова к моменту перехода температуры воздуха через 0° к положительным значениям и суммой максимальных дневных значений за период от перехода ее через 0° до схода лавин. Для прогноза используется также график связи времени схода лавин с интенсивностью солнечной радиации.

В некоторых районах используются эмпирические графики связи времени наступления схода мокрых лавин от интенсивности повышения температуры воздуха; лавинообразования со сцеплением снега, снеговой нагрузкой и суммой положительных температур воздуха и другие эмпирические зависимости.

Методы прогноза лавин из мокрого снега пока разработаны слабо и требуют дальнейшего совершенствования.

8.5. СОСТАВЛЕНИЕ ЛАВИННЫХ ПРОГНОЗОВ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Решение задач прогноза лавин требует активного использования ЭВМ, позволяющих более широко и всесторонне анализировать снего-метеорологическую обстановку. В ближайшие годы использование ЭВМ позволит оперативно выдавать прогнозы лавин с требуемой заблаговременностью. Основные затруднения в использовании ЭВМ — недостаток надежной информации о снежном покрове в зоне зарождения лавин и о конкретных причинах нарушения устойчивости снега. Используемые для прогнозов сведения о метеорологических условиях

и данные наблюдений за снежным покровом на выбранных площадках не всегда соответствуют действительным условиям в зонах зарождения лавин, так как метеостанция и наблюдательные площадки обычно удалены от лавиносборов и не полностью характеризуют процессы лавинообразования, что в свою очередь сдерживает разработку программы расчета лавинной ситуации и прогноза лавин.

Некоторый опыт по использованию ЭВМ для прогноза лавин накоплен в цехе противолавинной защиты производственного объединения «Апатит» в Хибинах, где имеются наиболее длительные в СССР (с 1935 г.) ряды наблюдений за сходами лавин, вызываемых метелевым снегопереносом. Там была проверена возможность использования метода опознавания образов для прогноза лавин по комплексу оперативной метеорологической информации о метелях. В качестве определяющих было выбрано 5 параметров: суммарный перенос снега за время метели, средняя интенсивность переноса, продолжительность метели, азимут главного направления метелевого переноса и фактор разброса направления переноса. Были выбраны случаи метелей с лавинами, а также метелей без лавин. Соответствующие этим случаям параметры метелей были использованы в качестве материала для обучения ЭВМ. В результате вычисления оценок взаимной корреляции между различными параметрами «метелей с лавинами» и «метелей без лавин» были получены таблицы этих оценок, используемые в программах расчета. Было опробовано несколько разновидностей программ расчета, отличающихся видом используемых в них функций адекватности опознаваемого случая с известными. Получены удовлетворительные результаты.

Там же использовался метод многомерного дискриминантного анализа, в котором метели подразделялись на лавинные и нелавинные и характеризовались восемнадцатью числовыми параметрами. Этот метод позволил оценить вклад каждого признака и выявить наиболее существенные из них.

Дискриминантный анализ был применен также для оценки лавинной опасности при снегопадах в условиях Средней Азии. В качестве обучающей выборки использовались материалы наблюдений снеголавинных станций за температурой воздуха до начала и во время снегопада, абсолютной влажностью воздуха, радиацией, продолжительностью снегопада и суммой осадков. Было использовано более тысячи случаев, соответствующих снегопадам с лавинами и снегопадам без лавин, на основании которых была установлена информативность различных групп предикторов и оценена успешность разделения ситуаций при снегопадах на лавиноопасные и нелавиноопасные. Оправдываемость прогноза оказалась в пределах от 75 до 90%.

Опыт применения ЭВМ для прогнозирования лавинной опасности показал, что в практику снеголавинных наблюдений необходимо внедрить единую систему сбора, хранения и обработ-

ки снеголавинных и метеорологических данных. Для этой цели разработаны информационные бланки «лавина», «метео» и «склон», в которые должны заноситься в закодированном виде информация о сошедших лавинах, морфологические и морфометрические характеристики лавиносборов, суточная метеорологическая информация и данные специальных лавинных наблюдений. Рекомендации по порядку регистрации информации и заполнению информационных бланков изложены в «Практическом пособии по прогнозированию лавинной опасности» (1974).

8.6. ЛОКАЛЬНЫЕ ПРОГНОЗЫ ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ

Методы оценки лавинной опасности и прогнозы лавин в конкретных лавиносборах пока находятся в стадии начальной разработки. Чаще всего приходится ограничиваться фоновым прогнозом лавинной опасности для горного района на основании комплекса метеорологических данных. Совершенствование методики локальных прогнозов требует решения трех проблем — повышения точности существующих способов определения прочностных характеристик снежного покрова, разработки способов получения достоверной информации о состоянии и свойствах снежного покрова в зоне зарождения лавин и повышения надежности локальных прогнозов метеорологических условий.

Для оценки устойчивости снежного покрова в зоне зарождения лавин необходимо иметь сведения о высоте, строении и плотности снежного покрова с учетом их пространственной неоднородности и прочностные характеристики снега, прежде всего данные о сцеплении и коэффициенте трения на ослабленных поверхностях и о величинах сопротивления снега разрыву и смятию. Получение таких данных в достаточном количестве весьма сложно. Существующие методики определения прочностных характеристик снега предусматривают измерения сопротивления снега быстрому срезу и быстрому разрыву. В то же время известно, что при длительном действии сдвигающего усилия величина сцепления может снизиться в два раза и более. Расслабление снега наблюдается и при длительном действии растягивающего усилия. Существенную роль играют также масштабные эффекты. Это вынуждает вводить в расчеты устойчивости снежного покрова поправочные коэффициенты, учитывающие расхождения между экспериментально определяемыми величинами сцепления и коэффициента трения и реальными характеристиками снежного покрова. Сейчас большое внимание уделяется разработке унифицированных приборов и единой стандартной методики для определения прочностных характеристик снега.

Информация о снежном покрове в зоне зарождения лавин обычно очень ограничена из-за труднодоступности этой зоны. Изредка там устанавливают рейки для визуальных дистанци-

онных наблюдений за высотой снежного покрова. В лавиноопасные периоды возможно проведение снегомерных съемок, при которых может производиться зондирование снежного покрова для определения его высоты и послойной твердости, одновременно могут отбираться пробы снега для определения его структуры, плотности и механических свойств. Однако такие работы возможны далеко не всегда, так как подчас нельзя обеспечить безопасность их проведения. В связи с этим информация о снежном покрове в зоне зарождения лавин часто ограничивается косвенными сведениями, получаемыми при наблюдениях за снежным покровом на лавинобезопасных участках вблизи от интересующего лавиносбора, фотографиями и визуальными наблюдениями. Во время снегопадов и метелей и эти сведения практически отсутствуют.

В настоящее время разрабатываются новые измерительные системы и методики для увеличения объема информации о снежном покрове. Так, уже широко применяются системы для дистанционного измерения температуры грунтов и снега. Разрабатываются конструкции стоек и труб, пригодных для установки на лавиноопасных склонах и способных сохранить свою устойчивость при сходе лавин. Если такую стойку оснастить датчиками температуры, установленными на заданных высотах, например, через 10 см, и соединить их кабелем с расположенной в лавинобезопасном месте измерительной аппаратурой или радиопередатчиком, то появляется возможность получать текущую информацию о температуре снежного покрова. По более интенсивным изменениям температуры воздуха по сравнению с показаниями датчиков в снежном покрове можно определить высоту снежного покрова. Технически возможно создать измерительные системы для дистанционного определения плотности и скоростей течения снежного покрова на склоне, но они пока существуют лишь в виде опытных экземпляров или предварительных разработок.

Метеорологические условия в лавиносборах могут существенно отличаться от условий, определяемых на метеостанции в этом же районе. Это особенно относится к ветровому режиму, метелевому снегопереносу, радиационному балансу и таянию снега. Поэтому при составлении прогнозов метеорологических условий в заданных лавинных очагах необходимо учитывать и анализировать локальные условия. Для этой цели могут производиться специальные наблюдения за направлением и интенсивностью метелевого снегопереноса, изменением скоростей ветрового потока в различных местах лавиносборов и отложениями метелевого снега.

В некоторых случаях может оказаться целесообразным проведение экспериментальных исследований моделей горных участков в аэродинамическом канале.

Особенности радиационного баланса могут быть использованы при теоретических расчетах прихода прямой солнечной

радиации на горные склоны, принимая во внимание их ориентацию и крутизну. Учет локальных особенностей метеорологического режима позволит более точно прогнозировать изменения плотности, температуры и прочностных характеристик снежного покрова.

В основу локальных прогнозов лавинной опасности целесообразно закладывать метеорологические прогнозы и физические процессы в снежном покрове, используя методы статистики и теории вероятности и математическое моделирование.

ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЛАВИН

9.1. ОРГАНИЗАЦИОННО-ХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОТИВОЛАВИННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Для защиты людей и народнохозяйственных объектов от лавин разработаны различные пассивные и активные организационные профилактические мероприятия, строительство противолавинных сооружений и комплексные методы защиты от лавин.

Организационно-хозяйственные мероприятия включают оценку лавинной опасности горных территорий, разработку предложений по учету лавинной опасности при хозяйственном освоении лавиноопасных территорий и выбору лавинобезопасных мест, наиболее рациональных способов ведения работ в лавиноопасные периоды, организацию и проведение наблюдений за снеголавинным режимом, создание снеголавинных станций и постов, прогнозирование лавин и оповещение о лавинной опасности, мероприятия по обеспечению безопасности людей, работающих или отдыхающих в лавиноопасных районах, организацию горнозащитной и спасательных служб. Перечисленные виды работ называют пассивными профилактическими мероприятиями. Помимо них часто применяются активные профилактические мероприятия (искусственное обрушение снега с лавиноопасных склонов).

Перед началом работы в горном районе или отдыха в горах зимой следует выяснить, относится ли этот район к лавиноопасным. Это можно установить с помощью схематических карт лавиноопасных районов на территории СССР (Строительная климатология и геофизика. СНиП 2.01.01—82, 1983; Лавиноопасные районы Советского Союза, 1970). Если район относится к числу лавиноопасных, то необходимо получить дополнительные сведения о снежном покрове и лавинах и планировать проведение противолавинных мероприятий. Такие сведения можно найти в специальной литературе или получить в учреждениях Гидрометеослужбы.

В лавиноопасных районах, где намечается строительство дорог, линий электропередачи и связи, жилых и промышленных зданий и других объектов, рекомендуется предварительно проводить специальные снеголавинные изыскания, составлять карты лавиноопасных зон и оценивать лавинную опасность. Это позволяет выявить лавинобезопасные участки и по возможности разместить объекты таким образом, чтобы они подвергались лавинной опасности в наименьшей степени.

Очень важно наладить, хотя бы в минимальном объеме, наблюдения за снеголавинным режимом и связь с ближайшей метеостанцией. Проведение работ в лавиноопасные периоды требует учета текущей оценки и прогноза лавинной опасности.

В районах, где требуется постоянное оперативное обслуживание народнохозяйственных объектов, следует организовать снеголавинные станции и посты, которые будут проводить регулярные наблюдения за снежным покровом и лавинами и оповещать о лавинной опасности. В местах зимнего отдыха необходимо обеспечивать своевременное предупреждение о лавинной опасности и принимать административные меры.

На железных дорогах и некоторых предприятиях организуют специальные подразделения для проведения противолавинных мероприятий. Так, в производственном объединении «Апатит» в Хибинском горном массиве с 1935 г. работает цех противолавинной защиты, который производит весь комплекс пассивных и активных профилактических мероприятий по защите предприятий и людей от лавин.

Г. К. Тушинский в течение многих лет разрабатывал предложения по созданию государственной службы по защите от лавин и селевых потоков в горах. В соответствии с этими идеями предложена схема горнолавинной службы Большого Кавказа (Залиханов, 1981). Такая служба должна быть оснащена техническими средствами для проведения профилактического обрушения снега с лавиноопасных склонов и осуществления спасательных работ. Она должна быть наделена определенными административными правами, включая право запрещать строительство любого сооружения в горах без учета лавинной и селевой опасности, налагать штрафы на лиц, не выполняющих указания службы, прекращать движение по дорогам, закрывать горнолыжные соревнования, эвакуировать из лавиноселеопасной территории людей, технику и скот. К числу основных ее обязанностей будут относиться: обследование территории и подготовка заключений о возможности строительства различных объектов в горах и требуемых защитных мероприятиях; сбор и обобщение всех имеющихся сведений о сходе лавин и селей; составление карт лавинной опасности; организация специальных наблюдений за снежным покровом и лавинами по программе снеголавинных станций; прогнозирование лавинной опасности и оповещение об опасности; проведение комплекса мероприятий по ликвидации лавинной опасности; санкционирование открытия или закрытия горнолыжных трасс; контроль за всеми видами хозяйственной деятельности в лавиноопасных районах; контроль за движением людей и автотранспорта в период лавинной и селевой опасности; организация спасательных работ; контроль за строительством и правильной эксплуатацией противолавинных сооружений.

9.2. ИСКУССТВЕННОЕ ОБРУШЕНИЕ СНЕГА С ЛАВИНООПАСНЫХ СКЛОНОВ

В случаях, когда выдается прогноз о наступлении лавинной опасности, возникает необходимость прекратить все виды деятельности людей и работу механизмов в лавиноопасных зонах. Опасность может сохраняться длительное время, в некоторых лавиносборах она действует в течение всего периода залегания снега. Для сокращения периода лавинной опасности и временного ее устранения применяют различные способы профилактического обрушения потенциально неустойчивых масс снега на склонах. Чтобы не ждать длительное время момента, когда естественные процессы снегонакопления и перекристаллизации снежной толщи приведут к нарушению устойчивости снега и образованию лавины, она вызывается искусственным образом в заранее намеченное время. Искусственное воздействие на снежный покров применяется также для уточнения оценок степени лавинной опасности и получения дополнительных сведений о состоянии снежного покрова для выдачи лавинных прогнозов.

Искусственное нарушение устойчивости снежного покрова и спуск лавин осуществляют взрывом или обстрелом лавиноопасных склонов с помощью минометов или орудий.

Профилактический спуск лавин применяется в тех случаях, когда на пути их схода нет сооружений, которые могут быть разрушены лавиной. Наиболее широко он используется для ликвидации лавинной опасности на автомобильных дорогах, горных предприятиях и в местах проведения горнолыжных соревнований. На горнолыжных трассах лавинная опасность регулярно контролируется опытными лыжниками, умеющими проводить испытания устойчивости снежного покрова.

Для испытаний выбирают небольшой и не слишком опасный склон, где условия снегонакопления и перекристаллизации снега соответствуют условиям в зоне зарождения лавин, угрожающих лыжным трассам. Лыжник делает контрольный спуск и определяет реакцию снежного покрова. Трещины, возникающие в снежной толще при спуске лыжника, служат показателем появления опасности формирования лавины из снежной плиты. Если снег трескается непосредственно под лыжами, то это еще не всегда является признаком опасности. Если же трещины разбегаются вперед перед лыжником, то испытателю надо быть особенно осторожным, так как это характеризует локальную неустойчивость снежной плиты. Подрезая снежный пласт, лыжник может способствовать нарушению устойчивости пласта и вызвать сход лавины.

Проведение работ по искусственному обрушению снега лыжником связано с определенным риском, поэтому требует принятия особо тщательных мер предосторожности. Лыжник может пересекать по диагонали верхнюю часть зоны зарожде-

ния лавины недалеко от предполагаемой линии отрыва с таким расчетом, чтобы при нарушении устойчивости снежной плиты успеть пересечь опасный склон и выехать на безопасное место. За выполнением этих операций обязательно должен наблюдать другой лыжник, находящийся в безопасном месте, с которого начинается испытательный спуск. В некоторых случаях проверка устойчивости потенциально неустойчивой снежной плиты и попытки ее обрушить производятся у верхней границы лавиноопасного склона лыжником, имеющим альпинистскую веревку, конец которой закреплен в безопасном месте над опасным склоном и страхуется другим лыжником. Лыжник не должен выезжать на лавиноопасный склон, если у него нет уверенности в том, что успеет пересечь склон быстрее, чем может быть захвачен лавиной.

Выбор места, времени и способа искусственного обрушения снега производится на основании оценки реальной устойчивости снежного покрова на лавиноопасном склоне и имеющихся технических возможностей.

9.3. МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ

При взрыве заряда в снежном покрове газообразные продукты, расширяясь, образуют полость, стенки которой испытывают давление в радиальном направлении от эпицентра взрыва. Частицы снега смещаются вслед за фронтом волны деформации и сильно сжимаются (рис. 9.1). Плотность снега вблизи стенок и дна воронки взрыва повышается до 600 кг/м^3 и более. Часть снега, прилегающая к заряду, в момент взрыва испаряется. По мере удаления от заряда напряжения сжатия быстро уменьшаются и на некотором расстоянии становятся меньше временного сопротивления снега раздавливанию. За пределами этой зоны структура снега и его плотность во время взрыва мало изменяются, однако распространение волны сжатия приводит к заметному радиальному перемещению частиц, появлению тангенциальных растягивающих напряжений и радиальных трещин. После взрыва и прохождения взрывной волны давление во взрывных газах резко падает. Снег вблизи от воронки, сильно сжатый взрывом, начинает расширяться в сторону воронки, при этом в зоне с радиальными трещинами появляется и ряд тангенциальных трещин.

За пределами зоны трещин распространяется зона сотрясений, где снег испытывает квазиупругие деформации без нарушения сплошности.

Взрывная волна после достижения поверхности склона распространяется дальше по грунту в радиальных направлениях от воронки взрыва, вызывая сотрясения основания снежного покрова. Над зарядом снег разрушается и выбрасывается за пределы воронки. Взрывная волна распространяется далее по воздуху. Взрыв заряда над поверхностью снежного покрова

вызывает взрывную волну в воздухе, которая в начальной фазе является ударной (сверхзвуковой). Воронка в месте взрыва получается относительно неглубокой. Непосредственно под эпицентром взрыва структура снега нарушается и снег уплотняется. За пределами зоны уплотнения плотность и структура снега во время взрыва меняются мало, однако вследствие

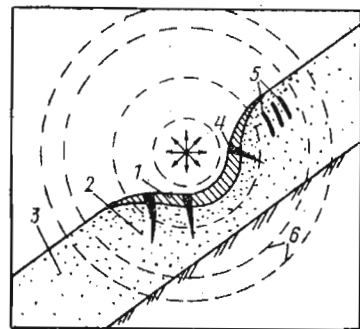


Рис. 9.1. Взрыв заряда в снежном покрове:
1 — зона уплотнения; 2 — зона трещин; 3 — зона сотрясений; 4 — радиальные трещины; 5 — тангенциальные трещины; 6 — взрывные волны в воздухе, снеге и грунте

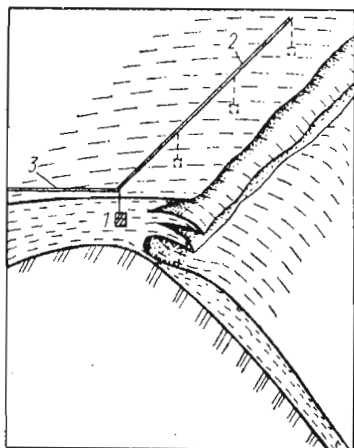


Рис. 9.2. Обрушение снежного карниза зарядами взрывчатых веществ:
1 — заряд ВВ с капсюль-детонатором; 2 — детонирующий шнур; 3 — огнепроводный шнур

сотрясения интенсифицируются процессы вязкого течения и уплотнения снега, что спустя несколько часов приводит к существенному его уплотнению.

По данным экспериментальных исследований В. С. Матвиенко и А. Р. Гербера (1972), диаметр видимой воронки при взрывах зарядов патронированного аммонита массой от 0,5 до 20 кг составляет:

для взрыва на поверхности снежного покрова

$$d_v \sim 1,85 \sqrt[3]{G}, \quad (9.1)$$

где G — масса заряда;

для взрыва в средней части снежной толщи

$$d_n \sim 2,66 \sqrt[3]{G}, \quad (9.2)$$

для взрыва на поверхности грунта

$$d_g \sim 2,85 \sqrt[3]{G}. \quad (9.3)$$

При взрыве зарядов в средней части снежного пласта и на поверхности грунта диаметр воронок несколько увеличивается с ростом мощности пласта, так как растет коэффициент полезного действия взрыва.

Взрыв в снежном покрове вызывает сотрясение массива снега, при котором могут нарушаться связи между частицами снега и уменьшаться сцепление между снежными плитами, плитой и ее основанием. Это приводит к повышению скорости вязкого течения снега в зоне действия взрыва и может привести к потере устойчивости снежного пласта и зарождению лавины. Радиус влияния взрыва заряда в 1 кг составляет около 10 м. Взрыв такого же заряда на поверхности снежного покрова увеличивает радиус влияния взрыва на 40%. Взрыв заряда мощностью 10 кг оказывает воздействие на снежную толщу на расстоянии до 30 м.

Потеря устойчивости снежной плиты может произойти сразу же после взрыва или по истечении нескольких минут. Изредка наблюдались случаи, когда потеря устойчивости снежного пласта происходила лишь спустя 1 ч и более после взрыва. Если потери устойчивости снега не происходит, то спустя несколько часов скорость течения снега на склоне уменьшается до той величины, которая наблюдалась до взрыва. В зоне разрушения образуется снежно-ледяной монолит с включениями продуктов взрыва, который увеличивает локальную устойчивость снежного пласта.

Взрывчатые вещества используются для оценки и ликвидации лавинной опасности. Выделяют три варианта воздействия взрыва на снежный покров на лавиноопасном склоне: 1) при взрыве образуется воронка, за пределами которой целостность снежного покрова не нарушается; это указывает на то, что снежный покров находится в локально устойчивом состоянии и лавинная опасность относительно небольшая; 2) снежный покров разламывается, происходит оседание и стабилизация снега, или он соскальзывает на некоторое расстояние, после чего приобретает устойчивое положение (это указывает на то, что снежный покров находится в состоянии, близком к пределу локальной устойчивости); в таком случае желательно повторить испытания на другом участке лавиноопасного склона; серия взрывов или вызовет сход небольшой лавины, или приведет к временной стабилизации снежного покрова на лавиноопасном склоне; 3) в результате взрыва зарождается лавина; это свидетельствует о том, что снежный покров находился в локально неустойчивом состоянии и в данном районе может существовать повышенная лавинная опасность на других лавиноопасных склонах.

Эффективность взрыва зависит от того, насколько удачно выбрано место заложения зарядов и их мощность.

В лавиносборе с отчетливо выраженной зоной зарождения лавины взрывать заряд целесообразно в верхней части этой зоны вблизи от предполагаемой линии отрыва. Иногда эффективными являются взрывы в нижней части зоны зарождения лавин, где в снежных плитах действуют продольные напряжения сжатия и где локальное нарушение устойчивости плиты может вызвать обрушение расположенных выше на склоне участков снежного покрова. Заряды лучше закладывать на некоторой глубине от поверхности снежного покрова, но это далеко не всегда возможно из-за лавинной опасности. Поэтому чаще приходится применять взрывы зарядов на поверхности снежного покрова.

Непосредственным импульсом для образования лавины часто является обрушение снежного карниза. Поэтому в тех местах, где над лавиноопасным склоном образуются снежные карнизы, целесообразно рассматривать возможности их искусственного обрушения. Для этой цели вдоль предполагаемой линии отрыва карниза бурят или пробивают скважины, в которые закладывают заряды (рис. 9.2). Возможно также взрывание серии поверхностных зарядов. Если карниз появляется ежегодно или даже несколько раз в течение зимы в одном и том же месте, то заряды можно закладывать заблаговременно до образования карниза и взрывать его при возникновении лавинной опасности.

9.4. ОБСТРЕЛ ЛАВИНООПАСНЫХ СКЛОНОВ

Возможности доставки взрывчатых веществ, закладки зарядов и проведения взрывов на склонах весьма ограничены из-за лавинной опасности. Более широкие возможности для оценки устойчивости снежного покрова и искусственного обрушения неустойчивых масс снега дает обстрел лавиноопасных склонов и снежных карнизов с помощью минометов и орудий.

Важное значение имеет выбор огневых позиций для обстрела лавиноопасных склонов. Они должны быть доступны при любых погодных условиях, в том числе при лавинной опасности. Позиции выбираются таким образом, чтобы с каждой из них можно было обстрелять наибольшее количество зон зарождения лавин и снежных карнизов, при этом они должны быть надежно защищены от искусственно вызываемых обстрелом лавин.

Выбор цели для обстрела определяется по топографической карте зоны зарождения лавин и по данным визуальных наблюдений. После того как будет проведена пристрелка и закреплено место позиции, в последующие лавиноопасные периоды стрельба может производиться и при отсутствии видимости — «слепым» способом — по известным уже координатам.

В Хибинах для обстрела лавиноопасных склонов в течение многих лет успешно применяются минометы. Они позволяют вести обстрел с заранее выбранных позиций при отсутствии видимости. В ряде случаев удается из одной позиции обстреливать зоны зарождения лавин в нескольких лавиносборах. Недостатком обстрелов из минометов является то, что мощность взрыва мины превышает оптимальную мощность взрыва, необходимого для проверки устойчивости снежного покрова и обрушения неустойчивых масс. В результате этого иногда нарушается поверхностный слой грунтов на склонах.

На Кавказе и в Средней Азии для обстрела лавиноопасных склонов применяются различные типы артиллерийских орудий. Здесь мощность взрыва снарядов также превышает оптимальную величину. Затруднения с применением орудий часто возникают из-за сложности выбора огневых позиций, доступных для доставки орудия и пригодных для обстрела лавиносборов по условиям дальности и траектории полета снаряда.

В США разработано несколько модификаций орудий, предназначенных для обстрела лавиноопасных склонов, которые получили наименование «Аваланчер». Особенностью этих орудий является то, что они стреляют с помощью сжатого воздуха. Снаряд представляет собой пластмассовую оболочку, в которой помещен заряд массой 1 кг и взрыватель, срабатывающий при погружении снаряда в снежный покров. Максимальная дальность стрельбы до 1500 м с превышением до 1000 м.

9.5. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО ИСКУССТВЕННОМУ ОБРУШЕНИЮ СНЕГА

Необходимым условием проведения работ по искусственному обрушению снежных масс является отсутствие людей на возможном пути схода лавины. Перед проведением взрывных работ или обстрелов должны производиться эвакуация людей и отвод механизмов из лавиноопасных зон, должно быть обеспечено также надежное ограждение этих зон на время проведения работ по опробованию устойчивости снежного покрова на склонах. При этом следует учитывать, что при неустойчивости снежного покрова взрывы и обстрелы одного склона могут вызвать обрушение и на других лавиноопасных склонах.

Каждый раз перед проведением взрывных работ и обстрелов следует тщательно проанализировать последствия искусственного обрушения снега и принять меры для ликвидации возможных разрушений объектов и расчистки снежных завалов. Так, при обрушении снежных масс, угрожающих нормальной эксплуатации автомобильной или железной дороги, приходится считаться с возможностью повреждения лавиной линий связи и электроснабжения. Необходимо также заблаговременно приготовить технику для быстрой расчистки дороги от снежных завалов.

ИСКУССТВЕННОЕ УДЕРЖАНИЕ СНЕГА НА ЛАВИНООПАСНЫХ СКЛОНАХ

10.1. СПОСОБЫ УДЕРЖАНИЯ СНЕГА НА СКЛОНАХ

На склонах гор, покрытых лесом, стволы деревьев удерживают снежный покров от сползания и препятствуют зарождению пластовых лавин. Вырубка леса или нарушение его естественного возобновления из-за вырубки подлеска и выпаса скота могут послужить причиной для образования лавин в тех местах, где они ранее не наблюдались. Эти лавины в свою очередь будут разрушать лесные массивы и способствовать появлению новых лавиноопасных участков. Поэтому одной из весьма важных мер для удержания снега на склонах и исключения возможности зарождения лавин является бережное сохранение лесов и лесопосадок на тех участках, где лес был вырублен или нарушен лавинами.

Лесопосадки обычно совмещают с мерами по защите от лавин, так как молодые саженцы в первые годы не только не препятствуют соскальзыванию снежного покрова, но и сами нуждаются в защите. При этом следует учитывать, что горные леса достаточно надежно удерживают снежный покров на склонах, но не могут препятствовать сходу лавин, зарождающихся в очагах, расположенных над верхней границей леса. Лавины в таких местах прокладывают себе путь через лес, создавая лавинные прочесы и вызывая дополнительную повалку деревьев снеговоздушными потоками. Тем не менее там, где это возможно, леса должны занимать одно из главных мест в программе защитных мероприятий против лавин. Посадки защитных лесов обычно сочетаются с застройкой склонов в зоне зарождения лавин снегоудерживающими сооружениями. Различные способы застройки склонов применяются давно. Известно, что в Альпах системы террас и канав для предотвращения соскальзывания снега сооружались уже в XVIII в. Наибольшее распространение снегоудерживающие сооружения получили в Швейцарии. К 1881 г. там уже было обезврежено 34 лавиносбора с помощью строительства столбовых заграждений, каменных стен, канав и террас (Фляйг, 1960). В последующие годы получили распространение массивные подпорные сооружения в виде стен высотой до 9 м. Начали применяться также решетчатые снегоудерживающие заборы из дерева, металла и бетона. К 1938 г. в Швейцарии было возведено около 1000 км подпорных сооружений.

Эксплуатация перечисленных снегоудерживающих сооружений показала, что они не всегда полностью удерживают снег.

Большой осторожности требуют доставка и размещение взрывчатых веществ (ВВ). Наиболее приемлемым ВВ для обрушения снега является аммонит № 6-ЖВ в патронах.

Для взрыва одиночных зарядов обычно используют огнепроводный шнур и капсюль-детонатор, при одновременном взрыве нескольких зарядов они соединяются детонирующим шнуром. Электродетонаторы и электрические детонирующие системы применяются ограниченно с принятием дополнительных мер предосторожности, так как в проводах могут возникать опасные токи за счет статистического электричества при снежных метелях и сильных электрических полях в атмосфере около горных хребтов.

Взрывные работы должны выполняться в строгом соответствии с требованиями «Единых правил безопасности при взрывных работах», а также необходимо учитывать требования техники безопасности передвижения и выполнения работ в лавиноопасных условиях. Эти дополнительные требования относятся особенно к доставке ВВ и страховке взрывника при закладке зарядов и его отходе в безопасное место.

В тех лавиносборах, где проверка устойчивости снежного покрова должна производиться неоднократно и где доставка ВВ в зону зарождения лавин затруднена, может оказаться рациональным строительство облегченного канатного подъемника, предназначенного специально для взрывных работ. Подъемник устанавливается таким образом, чтобы движущийся трос проходил над зоной зарождения лавин вблизи от потенциальной линии отрыва. Заряд подвешивается к тросу через дистанционно управляемое устройство, позволяющее опустить заряд на поверхность снежного покрова в намеченной точке лавиносбора и произвести взрыв.

При обстрелах лавиноопасных склонов необходимо уделять внимание точному учету и регистрации взрывов всех выпущенных мин и снарядов. В случае отказов необходимо разыскать и обезвредить невзорвавшиеся мины и снаряды. Из-за лавинной опасности эту операцию зачастую приходится откладывать до начала лета, когда лавинные отложения снега тают.

Были случаи, когда снег начинал двигаться между рядами удерживающих сооружений или поверх них и это приводило к образованию лавин. Особо неблагоприятные условия создались в зиму 1950/51 г., которая характеризовалась обильными снегопадами и катастрофическими лавинами. По данным Швейцарского общества исследований лавин, из 167 обследованных противолавинных комплексов полностью оправдали себя только 108 (Фляйг, 1960). Это послужило толчком для проведения специальных исследований взаимодействия снежного покрова с удерживающими сооружениями и разработки новых, более совершенных их конструкций, в частности сборных решетчатых щитов и сетчатых конструкций.

В 1961 г. Швейцарским институтом по исследованию снега и лавин были изданы «Указания по проектированию и строительству снегоудерживающих сооружений», которые в настоящее время применяются во многих странах, в том числе (с некоторыми уточнениями) и в СССР.

В инженерной практике известны следующие основные типы снегоудерживающих сооружений.

Канавы на склоне, расположенные по ходу горизонталей. Ширина, глубина и расстояние между канавами выбираются в зависимости от крутизны склона, характера поверхностного слоя грунтов и высоты снежного покрова. Для увеличения удерживающей способности канав землю, вынутую из них, укладывают в виде валов у внешнего края канав. При этом получают земляные террасы (рис. 10.1, а, б). Эффективность канав и земляных террас невелика. Они могут удержать снег и предотвратить возникновение осовов лишь на относительно пологих травянистых склонах, а на крутых склонах они вообще неприемлемы. Недостатком канав является их недолговечность и малая надежность. Бывают случаи, когда канавы являются причиной возникновения оползней и селевых потоков. Поэтому применять для удержания снега канавы и земляные террасы можно лишь в редких случаях, и то с большой осторожностью.

Террасы с подпорными стенками, как и земляные террасы, не обеспечивают надежного удержания снежного покрова на склонах. Их можно применять на относительно пологих склонах ($<30^\circ$) для предотвращения снежных осовов.

Свайные заграждения из рядов деревянных, металлических или железобетонных свай, выступающих над поверхностью склона. При достаточной частоте, высоте и прочности свай такие заграждения могут достаточно надежно удерживать уплотненный снежный покров на склонах крутизной до 30° , но они плохо удерживают сухой рыхлый, а также мокрый снег. Поэтому свайные заграждения целесообразно применять на тех склонах, где образуются только лавины из снежных плит, причем толщина снежного покрова небольшая и исключается возможность схода снежных плит поверх оголовков свай, а для образования пылевых и мокрых лавин нет условий.

Заборы и плетневые заграждения для защиты от сползания снежного покрова ненадежны и применяются в основном для изменения снегонакопления при метелевом снеготеносе. Они могут также оказывать влияние на процессы уплотнения и перекристаллизации снежного покрова и, таким образом, несколько повышать его устойчивость.

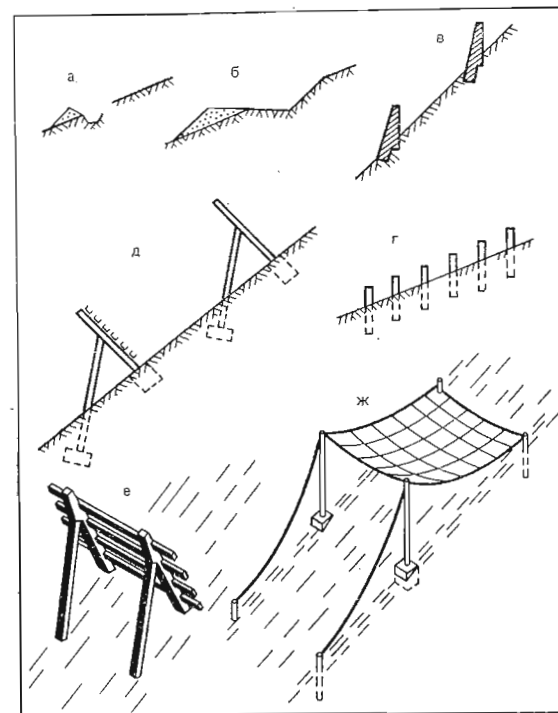


Рис. 10.1. Основные типы снегоудерживающих сооружений:
а — канавы; б — террасы; в — подпорные стенки;
г — свайные заграждения; д — металлические щиты; е — сборные железобетонные щиты; ж — сетки

Высокие подпорные стенки (рис. 10.1, в) широко использовались в Швейцарии, но, как указано выше, оказались недостаточно надежными и в настоящее время применяются редко.

Снегоудерживающие щиты — наиболее прогрессивные и надежные сооружения для удержания снега в зонах зарождения лавин. В практике применяются деревянные, металлические, сборные железобетонные и комбинированные снегоудерживающие сооружения. Обычно они представляют собой

установленную на фундаментах систему строек, подпорок и балок, на которых укрепляется решетка, служащая опорной поверхностью для снежного покрова (рис. 10.1, д, е). Опорная решетка устанавливается примерно перпендикулярно к склону или с отклонением верха вниз по склону на $10\text{--}15^\circ$ от перпен-



Рис. 10.2. Деревянные снегоудерживающие щиты

дикуляра. Она состоит из горизонтальных или расположенных в вертикальных плоскостях балок, между которыми имеются зазоры в пределах 30 см.

Для металлических сооружений применяют стальные трубы и стандартные стальные прокатные профили. В альпийских странах для этой цели широко используются специальные профили из легких алюминиевых сплавов. Элементы сборных же-

лезобетонных сооружений могут выполняться из предварительно напряженного бетона. Дерево используют преимущественно для изготовления опорных решеток, опирающихся на металлические или железобетонные несущие конструкции. Иногда из дерева выполняются и несущие конструкции (рис. 10.2).

Снегоудерживающие щиты устанавливаются в виде сплошных рядов вблизи разрывов или отдельно стоящих щитов в зоне зарождения лавин таким образом, чтобы исключить возможность образования лавин. Размещение щитов на склоне осуществляется с учетом локальных характеристик рельефа, уклона и характера поверхности склона в зоне зарождения лавин, наблюдающейся линии их отрыва и вероятного распределения снега после застройки склона. В тех местах, где возможны камнепады, опорные решетки усиливаются или дополнительно строятся специальные стенки для защиты от камней.

Снегоудерживающие сетки из тросов, проволоки и нейлоновых лент. Сетки укрепляются на вертикальных стойках и тросовых растяжках и выполняют функции опорных решеток. Они имеют некоторые преимущества перед другими снегоудерживающими сооружениями. Сетки позволяют применять относительно легкие стандартные элементы опорных конструкций, что существенно облегчает строительные работы на склонах. Сетки надежно удерживают снежные плиты и хорошо сопротивляются динамическим нагрузкам при образовании трещин в плите и ее подвижке. Они также затормаживают или полностью предотвращают сползание рыхлого сухого и мокрого снега. Широкое применение сооружений с сетками сдерживается из-за высокой стоимости и дефицитности сеток и тросов.

10.2. СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ МЕТЕЛЕВОГО СНЕГА

В ряде мест основной причиной зарождения лавин является скопление больших масс снега за счет ветрового снеготранспорта и образование мощных снежных карнизов. В таких условиях зачастую можно предотвратить сход лавины или хотя бы уменьшить ее объем и дальность выброса, ограничивая накопление снега и предупреждая образование снежных карнизов с помощью снегозадерживающих и снеговыводящих щитов. В некоторых случаях оказывается эффективной комплексная застройка лавиноопасных склонов сооружениями для регулирования снежных отложений и снегоудерживающими сооружениями.

Наблюдения за метелевым снеготранспортом в горах показывают, что уже при первой метели покрываются снегом впадины и плоские участки, в то время как возвышенные места и гребни гор обнажаются. У мест резкого увеличения крутизны склона и прогибов продольного профиля лавиносбора часть переносимого ветром снега откладывается в зонах ветровой тени

в виде рыхлой массы, которая может потерять устойчивость. У гребня склона растут снежные карнизы, обрушение которых может инициировать зарождение лавины из отложенного метелевого снега.

Регулирование метелевого снегопереноса заключается в задержании снега на наветренном склоне, сдувании снега в местах образования снежных карнизов и перераспределении снега в зоне его отложения. Для этой цели используются снегосборные щиты, выдувающие щиты и панели и кольктафели.

Снегосборные щиты представляют собой ветропроницаемые решетки, аналогичные тем, которые применяются для защиты от заносов автомобильных и железных дорог. Это могут быть заборы и щиты, не продуваемые в приземном слое, приподнятые щиты с разреженной нижней частью и решетки, продуваемые в приземном слое. Устанавливаются щиты на наветренном склоне таким образом, чтобы основная масса метелевого снега откладывалась перед гребнем. Размеры зоны действия ряда снегосборочных щитов определяются высотой щитов и крутизной наветренного склона (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Характеристики зон действия снегосборных щитов на склонах

Крутизна наветренного склона, град	Длина зоны действия щита (H — высота щита)		Снегосборность щита, $\text{м}^3/\text{пог. м}$
	перед щитом	за щитом	
0	$3H$	$12H$	$(10 \div 12) H^2$
10	$2H$	$8H$	$(7-10) H^2$
20	$1,5H$	$5H$	$(4-5) H^2$
25	$1H$	$4H$	$(3) H^2$

Выдувающие щиты устанавливаются за гребнем склона непрерывным рядом таким образом, чтобы нижний край щита возвышался над гребнем. Общая высота выдувающих щитов обычно принимается 4—6 м. При правильной установке щиты ликвидируют зону завихрений за гребнем, предотвращают образование снежных карнизов и направляют снеговой поток вниз по склону (рис. 10.3, а).

Кольктафель представляет собой вертикальный щит трапециевидальной формы (рис. 10.3, б), чаще всего деревянный. В последнее время начали разрабатываться металлические конструкции кольктафелей, в том числе с крестообразно расположенными щитами (рис. 10.3, в). Кольктафели воздействуют на ветровые потоки таким образом, что в снежном покрове у их оснований образуются ямы выдувания. Кольктафели устанавливаются в качестве дополнения к другим сооружениям для локального выдувания снега, например ниже выдувающих щитов

(рис. 10.4) или в качестве дополнения к снегоудерживающим сооружениям для разгрузки сильно заметаемых снегом подпорных сооружений. В отличие от выдувающих щитов, ко-

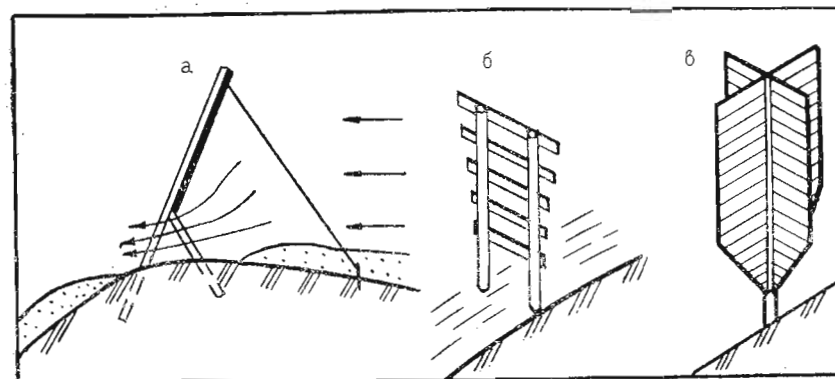


Рис. 10.3. Выдувающий щит (а) и кольктафели (б, в)

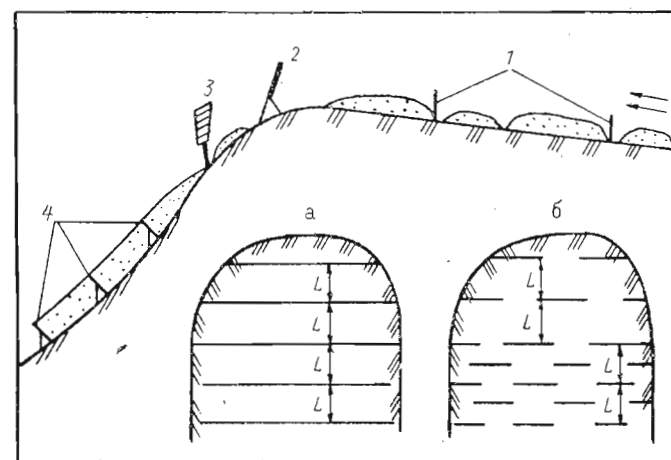


Рис. 10.4. Размещение снегосборных (1), выдувающих щитов (2), кольктафелей (3) и снегоудерживающих щитов (4): а — схема застройки зоны зарождения непрерывными рядами снегоудерживающих сооружений; б — то же рядами с разрывами и в шахматном порядке

торые эффективно работают при стабильном направлении метелевого снегопереноса, кольктафели работают при любом направлении снегопереноса.

Выбор типа и места расположения сооружений для регулирования снежных отложений производится на основании деталь-

ного определения локальных условий формирования снежного покрова и метелевого снеготранспорта. Они чаще всего возводятся в комплексе с сооружениями для удержания снега на лавиноопасном склоне.

10.3. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СНЕГОУДЕРЖИВАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ

Выбор типа и высоты снегоудерживающих сооружений. Тип сооружений определяется локальными особенностями зоны зарождения лавин, характеристиками снежного покрова и реальными возможностями использования тех-

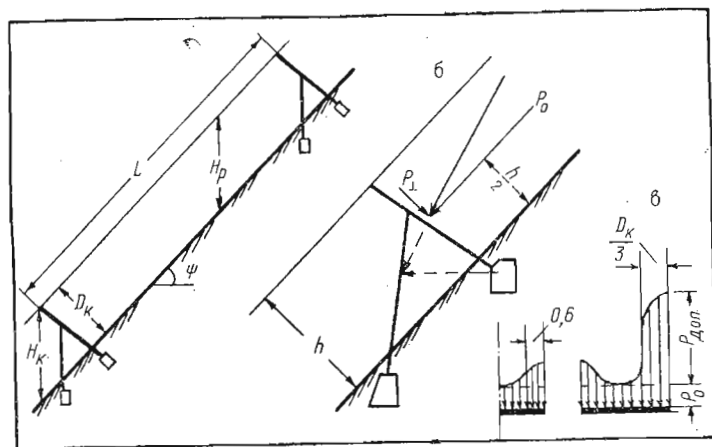


Рис. 10.5. Схема расчета давления на снегоудерживающие щиты:
а — расстояние между рядами щитов; б — составляющие нагрузки на непрерывный ряд щитов; в — дополнительные нагрузки на краевых участках щитов

или иных строительных материалов. Канавы, террасы, заборы, свайные ограждения и подпорные стенки имеют ограниченное применение на относительно пологих (крутизной менее 30°), главным образом для предупреждения нежелательных снежных осовов. Снегоудерживающие щиты и сетки применяются на склонах крутизной от 30 до 50° и лишь в редких случаях на склонах крутизной менее или более указанного интервала. Выбор материала и конструкции щитов и сеток производится на основании технико-экономических расчетов и сравнения различных вариантов застройки стартовой зоны лавиносбора.

Высота снегоудерживающей конструкции H_k (рис. 10.5) принимается равной расчетной высоте снежного покрова H_p в

месте строительства конструкции, которая определяется по формуле

$$H_p = H_o + H_y,$$

где H_o — максимальная высота (по вертикали) снежного покрова на склоне, где предусматривается его задержание, по данным наблюдений и снегомерных съемок в заданном районе за период не менее 20 лет; при отсутствии таких данных этот параметр определяют расчетным путем на основании данных сокращенных и длительных наблюдений на ближайших метеостанциях и снегомерных пунктах; H_y — предполагаемая дополнительная высота снежного покрова за счет метелевого снегонакопления и сползания снега после застройки склона.

Вертикальная высота конструкции H_k определяется как вертикальное расстояние между верхним краем опорной поверхности щита и сетки и склоном. При проектировании удерживающих конструкций чаще пользуются величиной эффективной высоты снегоудерживающих решеток и сеток D_k , характеризующей расстояние от верхнего края конструкции до грунта перпендикулярно к склону:

$$D_k = H_k \cos \psi. \quad (10.1)$$

Расстояние между рядами снегоудерживающих сооружений. Расстояние между сооружениями по линии падения L определяется таким образом, чтобы нижний ряд сооружений останавливал медленное течение снежного покрова и возможные подвижки снежных плит и чтобы была исключена возможность «переползания» снежного покрова через верхний край сооружений. При этом нижний ряд должен обеспечивать восприятие статистического давления и динамические нагрузки при движении рыхлого снега и при отрыве снежного пласта у верхнего ряда сооружений. В соответствии с рекомендациями Швейцарского федерального института исследований снега и лавин это расстояние следует назначать в зависимости от высоты снегоудерживающих конструкций, угла наклона и неровностей на поверхности склона по формуле

$$L = f_L H_k, \quad (10.2)$$

где f_L — расчетное относительное расстояние между рядами сооружений, определяемое на основании экспериментальных и теоретических исследований.

Ориентировочные значения относительного расстояния составляют:

ψ°	30	35	40	45	50
$f_L = \frac{L}{H_k}$	10—15	7—10	5—7	4—5	3—4

Меньшие значения f_L рекомендуются для склонов с гладкой поверхностью и большие — для склонов со значительными неровностями.

Размещение снегоудерживающих сооружений. Верхний ряд удерживающих сооружений размещают на расстоянии не более 15 м от наиболее высокого положения линии отрыва лавин в застраиваемом лавиноборе (или от линии выдувающих щитов и кольктафелей). Ряды сооружений располагаются перпендикулярно направлению сползания снежного покрова. Сооружения могут размещаться на склоне непрерывными рядами, с разрывами и в шахматном порядке (рис. 10.4, а, б) или комбинированным способом. Каждая из систем расположения сооружений имеет свои преимущества и недостатки. Так, расположение сооружений в шахматном порядке хорошо приспособляется для застройки на неровных склонах с локальными изменениями глубины снега, когда проявляется целесообразность использования сооружений разной высоты. Однако стоимость такой застройки выше, чем при застройке непрерывными рядами. При застройке рядами сооружений с разрывами возможны снежные осыпи в разрывах, а на края секций действуют повышенные давления.

При застройке рядами сооружений с разрывами интервалы между сооружениями в ряду не должны превышать 2 м и должны перекрываться опорными сооружениями ниже расположенного ряда. Ряды сооружений должны распространяться на всю ширину зоны зарождения лавин. Нижний ряд сооружений должен быть сплошным и оборудоваться решетками увеличенной высоты.

Снегоудерживающие сетки размещаются на склоне таким же образом, как и щиты, однако нижний ряд рекомендуется делать из жестких конструкций, способных затормозить возможное течение снежного покрова в зоне застройки.

Определение нагрузок на удерживающие сооружения. Опорная решетка снегоудерживающего сооружения испытывает статистическое давление снежного покрова. Это давление изменяется в течение зимнего периода и достигает максимальной величины чаще всего к началу снеготаяния, когда температура снега приближается к 0° и уменьшается коэффициент сдвиговой вязкости снега. На травянистых склонах из-за резкого уменьшения сцепления с поверхностью склона возможны подвижки снежного пласта, при которых опорная решетка будет дополнительно испытывать некоторые динамические нагрузки. Давление на опорную решетку неодинаково по высоте. Наибольшую нагрузку испытывают элементы решетки, контактирующие со средней по высоте частью снежного покрова. Однако для инженерных расчетов давление осредняется и применяется одинаковым по всей высоте решетки.

Расчет требуемой прочности снегоудерживающих сооружений производится для двух случаев загрузки. Первый случай

соответствует максимальной высоте снежного покрова, по которой определяется высота сооружения. Направленная параллельно склону составляющая нагрузки снежного покрова на единицу длины жесткой опорной поверхности сплошного ряда сооружений в результате течения и скольжения покрова между рядами (при расстоянии между рядами в соответствии с вышеизложенными рекомендациями) определяется по формуле

$$P_0 = \frac{\rho_{\text{ср}} g H_p^2}{2} K_1 K_2 \quad (\text{Н/м}^2), \quad (10.3)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ — средняя по высоте плотность снежного покрова, кг/м^3 ; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение силы тяжести; $H_p = H_k$ — расчетная высота снежного покрова, м; K_1 — коэффициент скольжения, учитывающий влияние шероховатости поверхности склона (табл. 10.2); K_2 — коэффициент, характеризующий ползучесть снега, принимаемый в зависимости от плотности снега:

ρ , кг/м^3	200	300	400	500	600
K_2	0,70	0,76	0,83	0,92	1,05

Помимо сил давления, направленных параллельно склону, на опорную поверхность сооружения действуют силы, вызываемые уплотнением и оседанием снега, которые направлены перпендикулярно к склону:

$$P_1 = P_0 \frac{f_0}{K_1 \tan \psi} \quad (\text{Н/м}), \quad (10.4)$$

где $f_0 = 0,5$ для рыхлого снега и $f_0 = 0,3$ для уплотненного снега; ψ — угол наклона склона.

При максимальной высоте плотность снежного покрова относительно небольшая. Так, для условий Альп она принимается равной 270 кг/м^3 для высот до 1500 м над ур. моря и увеличивается на 2% на каждые дополнительные 100 м высоты. Естественно, что для различных горных районов СССР эти значения будут отличаться от указанных показателей. Поэтому среднюю плотность снежного покрова при максимальной его высоте следует назначать на основании многолетних наблюдений в заданном районе.

Второй случай загрузки соответствует периоду, когда плотность и масса снежного покрова достигает наибольших значений, что обычно происходит в начале его таяния. К этому времени высота в результате его уплотнения уменьшается. Для расчетов принимают, что высота уплотненного снега $H_{2p} = 0,77 H_p$. Средняя плотность принимается по данным наблюдений. Составляющие нагрузки на опорную поверхность определяются по формулам (10.3) и (10.4). В этом случае точка приложения равнодействующей P_0 и P_1 смещается вниз и может увеличиться давление на нижнюю часть опорной поверхности сооружения.

Если между сооружениями в ряду по горизонтали имеются разрывы, то нагрузки на края опорной решетки увеличиваются за счет краевых эффектов при частичном обтекании сооружения снежным покровом. Увеличенные нагрузки действуют также на свободные края сквозного ряда сооружений и на края сооружений, располагаемых в шахматном порядке.

Для расчетов принимается, что направленная параллельно склону нагрузка на краевых участках опорных поверхностей около разрывов превышает основную нагрузку P_0 (формула (10.3)) примерно в 2 раза и действует на участке 0,60 м. А на свободном крае ряда сооружений дополнительная нагрузка превышает основную в 2—5 раза (увеличивается по мере увеличения коэффициента скольжения K_1) и действует на участке

$$\Delta l = \frac{D_k}{3} \quad (\text{см. рис. 10.5, в}). \text{ Расчетное давление на сетчатые}$$

удерживающие сооружения принимаются несколько меньше, чем на жесткие опорные решетки, так как уменьшаются динамические нагрузки при микродвижках. Сопротивление снега прорезанию в местах взаимодействия с сеткой повышается по мере увеличения скорости течения снега, поэтому затормаживание сползания снежного покрова происходит плавно. При расчете нагрузки P_0 принимается значение эмпирического коэффициента $K_2=0,5$ независимо от плотности снега. Силы, направленные перпендикулярно к склону, и краевые эффекты не учитываются.

При использовании описанной методики определения расчетных нагрузок на снегоудерживающие сооружения необходимо учитывать, что приведенные в табл. 10.2 значения эмпириче-

Таблица 10.2

Значения коэффициента скольжения K_1

Характер поверхности склона	Экспозиция склона	
	ЗСЗ—С—ВСВ	ВСВ—Ю—ЗСЗ
Крупнообломочная осыпь; склон, покрытый скальными глыбами	1,2	1,3
Склон, поросший кустарником высотой более 1 м; хорошо выраженные бугры высотой более 50 см; осыпь с поперечником обломков 10—30 см	1,6	1,8
Дерн с низкорослой травой, поросший кустарником высотой до 1 м; мелкообломочная осыпь с поперечником обломков до 10 см, чередующаяся с задернованным участком и мелким кустарником; слабо выраженные задернованные и поросшие мелким кустарником бугры высотой до 50 см	2,0	2,4
Гладкий дерн с высокой травой; гладкие скальные плиты с напластованием параллельно склону; щебень с мелкоземом, имеющий гладкую поверхность; увлажненные и заболоченные участки	2,6	3,2

ского коэффициента скольжения требуют уточнения для каждого горного района. Следует также учитывать возможность увеличения максимальной высоты снежного покрова из-за изменения условий метелевого снегопереноса после строительства опорных сооружений.

Несущий каркас и опорные решетки. Несущий каркас жесткого опорного сооружения рассчитывается на максимальные нагрузки снежного покрова при указанных двух случаях загрузки, воспринимаемые опорными решетками. Нагрузки на элементы опорной поверхности определяются из предположения о равномерном распределении давления на эту поверхность с учетом дополнительных нагрузок за счет краевых эффектов. Между горизонтальными балками рекомендуется оставлять просветы шириной до 30 см. Нижний просвет между грунтом и первой балкой может быть увеличен до 0,45 м. Применяются также решетки из балок, направленных перпендикулярно к склону и опирающихся одним концом о поверхность грунта. Просветы между балками в этом случае могут быть увеличены. Опорную поверхность располагают перпендикулярно к склону или отклоняют от перпендикуляра в сторону долины на угол до 15°. Опорную поверхность из сеток отклоняют на угол до 30°. Давление на сетку принимается равномерно распределенным.

Фундаменты. Устойчивость снегоудерживающих сооружений может быть обеспечена лишь при устройстве надежных фундаментов. Известны случаи, когда сооружения были разрушены и снесены вниз из-за недостаточной несущей способности фундаментов. Поэтому при проектировании этих сооружений помимо сведений о снежном покрове необходимо иметь надежные сведения о грунтах на рассматриваемом склоне. Для жестких опорных конструкций обычно применяются отдельные опоры — верхние для балок решетки и нижние для опорных стоек (рис. 10.6, а). В слабых грунтах верхние и нижние фундаменты соединяются балкой для увеличения жесткости со-

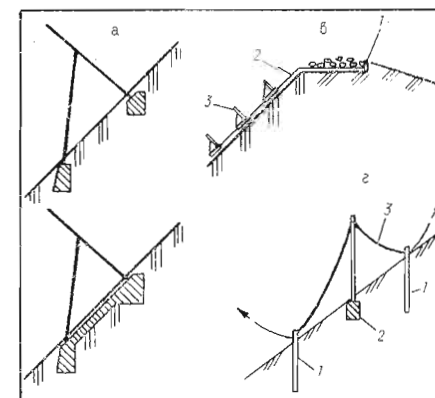


Рис. 10.6. Фундаменты снегоудерживающих сооружений:

а — в прочных грунтах; б — в слабых грунтах; в — анкерная заделка (1) тросов (2) для подвесных снегоудерживающих секций (3) на оползневом склоне; г — фундаменты для снегоудерживающих сеток: 1 — анкерный фундамент, 2 — фундамент под стойку, 3 — трос для укрепления сетки

оружения (рис. 10.6, б). При строительстве сетчатых сооружений, подвесных решеток и других специальных конструкций наряду с опорными применяются анкерные фундаменты, рассчитанные на восприятие растягивающих усилий.

Встречаются лавиноопасные склоны, где от строительства снегоудерживающих сооружений приходится отказываться из-за того, что грунты не обладают достаточной несущей способностью и возведение на них надежных фундаментов затруднительно. В тех случаях, когда выше участка склона с неустойчивыми грунтами имеются условия для устройства мощных анкерных фундаментов, возможна застройка склона с помощью подвижных щитов, подвешенных на тросах (рис. 10.6, в). Такая конструкция была применена в 1970 г. для защиты санатория «Сахалин», построенного в пределах зоны выброса лавин.

Организация строительных работ. Застройка склона выполняется только сверху вниз, начиная с самого верхнего ряда сооружений. Одновременно строится один ряд сооружений. Заготовка элементов конструкций производится на специальных площадках у подножия склона в стороне от застраиваемого склона. Застройка лавиноопасных склонов, как правило, выполняется в теплое время года. Подъем строительных материалов на склон следует выполнять до выпадения снега. Работы по подъему материалов на склон и монтажу конструкций выполняются поочередно. При выпадении твердых осадков работы на склоне должны быть прекращены до проведения профилактических мероприятий по устранению лавинной опасности.

Глава 11

ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЛАВИН

11.1. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЛАВИН

Одним из надежных способов защиты от лавин является изменение пути их движения с целью отвода снеголавинного потока в сторону от защищаемого объекта или направления его по строго фиксированному руслу. Достигают этого строительством лавинорезов, отбойных дамб и направляющих стенок.

Лавинорезы представляют собой клинообразные в плане конструкции, направленные острием против движения лавины. Их строят, чтобы разделить лавинный поток на две части и направить их в обход какого-то сооружения или защищаемого участка, ранее подвергавшегося действию лавин. Лавинорезы часто строят перед опорами мачт линий электропередачи. В таких случаях лавинный поток рассекается и обтекает защищаемую опору с боков. Лавинорез может быть использован в качестве основания для мачты (рис. 11.1).

Лавинорезы известны с давних пор. Так, в Давосе, в Швейцарии, существует церковь Богородицы, построенная на месте снесенной в 1602 г. лавиной церкви. Обращенная к склону задняя стена церкви сложена из камней в виде острого клина. Здание церкви неоднократно подвергалось ударам лавин, но благодаря лавинорезу сохраняется до настоящего времени. Жители гор иногда выкладывали из камней клинообразные массивы, защищающие постройки со стороны склона.

Лавинорезы строят из камня, дерева, бетона и железобетона. Деревянные лавинорезы делают в виде ряжей, заполненных камнем, с усиленной металлом носовой частью, каменные выкладывают из крупных камней на цементном растворе, бетонные строят в виде сплошных массивов бетона или бутобетона, для усиления носовой части может использоваться арматура. Возможно также использование сборных железобетонных конструкций. Боковые грани лавинорезов могут иметь продолжение в виде стенок, отводящих лавинные потоки по намеченному пути (рис. 11.2, а).

Для изменения направления движения лавины строят отбойные дамбы, расположенные под углом к лавинному потоку (рис. 11.2, б). Угол между отбойной дамбой и направлением лавинного потока следует задавать в пределах 20° и в исключительных случаях до 30° , так как при увеличении этого угла лавинный поток будет отклоняться не столько в сторону, сколько вверх, «перепрыгивая» через дамбу. Реальный угол отклонения лавинного потока при встрече с отбойной дамбой

составляет $10-20^\circ$. Для увеличения этого угла можно использовать пристраиваемую к отбойной дамбе криволинейную направляющую стенку, которая будет плавно отворачивать лавинный поток от его первоначального направления. Рабочую

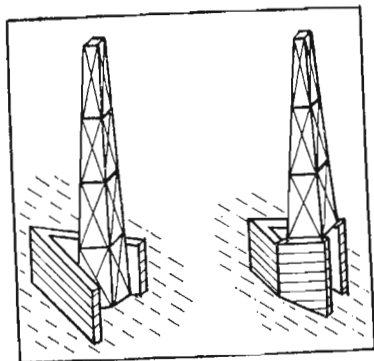


Рис. 11.1. Лавинорезы для защиты опор линии электропередачи

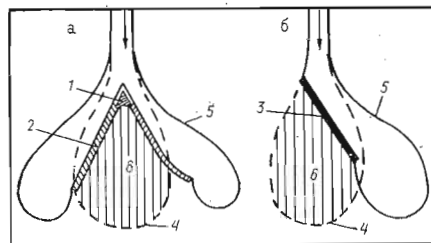


Рис. 11.2. Защита территорий с помощью лавинорезов (1), направляющих стенок (2) и отбойных дамб (3): 4 — граница зоны отложений лавин до строительства противолавинных сооружений; 5 — то же после постройки; 6 — защищенная территория

поверхность отбойных дамб желательно делать в виде вертикальной стенки, однако она может быть и наклонной (рис. 11.3). Рабочую стенку выкладывают из камня с заглаживанием поверхности или выполняют из бетона. Основное тело дамбы отсыпается из грунта и камней. Лавинонаправляющие стенки строят в местах, где нельзя допустить растекания лавинного потока и необходимо направлять его по фиксированному руслу. Так, при пропуске лавинного потока по крыше галереи применение направляющих стенок позволяет сузить ширину

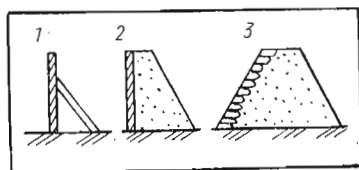


Рис. 11.3. Поперечное сечение направляющих стенок (1) и отбойных дамб (2 и 3)

потока и, таким образом, сократить длину галереи. Направляющие стенки, как указывалось выше, могут строиться в сочетании с лавинорезами и отбойными дамбами. Направляющие стенки должны иметь гладкую поверхность. Для их возведения используют железобетонные плиты или стенки на месте. Для усиления стенок они могут сочетаться с земляными дамбами наподобие отбойных дамб.

11.2. УМЕНЬШЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ И ДАЛЬНОСТИ ВЫБРОСА ЛАВИН

В Австрии и Швейцарии хорошо себя зарекомендовали лавинотормозящие сооружения в виде сборных железобетонных пирамидальных клиньев, устанавливаемых в шахматном порядке в верхней части зоны выброса (рис. 11.4). Эти клинья рас-

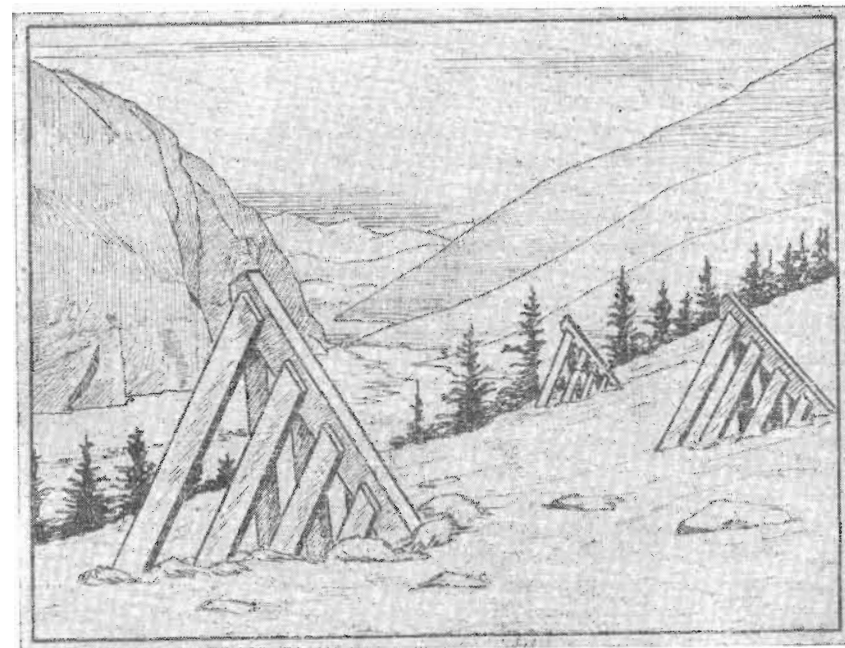


Рис. 11.4. Сборные железобетонные лавинотормозящие клинья

секают лавинный поток и направляют его струи друг на друга. Трение лавинного потока о клинья и взаимные удары лавинных струй уменьшают кинетическую энергию лавины и замедляют скорость ее движения.

Аналогичный эффект вызывают каменные и бетонные надолбы или искусственные каменно-земляные бугры на пути схода лавины. Так, для защиты трансканадской автомобильной дороги от снежных лавин на перевале Роджерса с успехом были использованы конусообразные насыпи высотой от 3 до 6 м, расположенные в шахматном порядке.

Замедляя скорость движения лавин, лавинотормозящие клинья, надолбы и холмы уменьшают предельную дальность выброса лавин и, таким образом, уменьшают лавиноопасную зону. Располагают их обычно на конусах выноса на участках, где крутизна лавинного пути становится меньше 20° . Следует

иметь в виду, что перечисленные лавинотормозящие сооружения теряют свою эффективность в тех случаях, когда сходят крупные повторные лавины. Первая лавина частично зарабатывает сооружения, а повторная лавина проходит поверх снежных отложений и лавинотормозящих сооружений.

К числу пока не реализованных лавинотормозящих сооружений относятся подвесные лавиногасители, рассчитанные на установку их на крутых участках лавинного пути в зоне транзита (Войтковский и др., 1974). Лавиногаситель представляет собой решетчатую пространственную конструкцию, через которую проходит лавинный поток. Элементы решетки, рассекая лавинный поток, оказывают тормозящее действие и уменьшают скорость потока. Лавиногаситель предлагается устанавливать на крутых участках лавинного пути, где он не будет зарываться снегом и будет сохранять работоспособность для взаимодействия с повторными лавинами.

В конце зоны выброса, где скорость движения лавины затухает, для ее полной остановки иногда устраивают защитные дамбы, которые обеспечивают безопасность расположенных за ними объектов. Потребность в такого рода дамбах чаще всего возникает в тех случаях, когда защищаемый объект находится вне пределов часто действующих лавин, но не исключена возможность воздействия крупных редкосходящих лавин при особо неблагоприятных снеголавинных условиях. Высота защитной дамбы должна быть такой, чтобы катастрофический поток не мог перехлестнуть через ее верх. Эта высота определяется из условий погашения скорости лавинного потока и столкновения всего его объема перед дамбой. Для повышения эффективности дамбы на пути движения лавины перед ней иногда устраивают искусственную выемку. Грунт из выемки используется для отсыпки дамбы. Такая выемка увеличивает рабочую высоту дамбы и способствует увеличению объема задерживаемого снега.

Защитные дамбы возводят часто в дополнение к лавинотормозящим сооружениям. Такая комбинация позволяет четко определить границы защищаемой территории и повысить надежность защитных мероприятий.

11.3. ПРОПУСК ЛАВИН НАД ЗАЩИЩАЕМЫМ ОБЪЕКТОМ

В Альпах и на Кавказе известны многочисленные примеры строительства домов и хозяйственных построек в лавинопасных зонах, когда задняя стена дома врезалась в крутой склон, а крыша делалась плоской с наклоном в сторону долины таким образом, чтобы лавина со склона могла беспрепятственно двигаться по крыше. На этом принципе были разработаны многочисленные проекты галерей, эстакад и навесов для пропуска лавин над железнодорожными и автомобильными дорогами.

Первые противолавинные галереи были сооружены в XVIII в. на дорогах в Швейцарских, Итальянских и Австрий-

ских Альпах. На проложенной в 1801—1804 гг. по приказу Наполеона дороге через Симплонский перевал уже была построена целая серия противолавинных галерей. Во второй половине XIX в. началось строительство галерей для защиты от лавин железных дорог на подступах к порталам перевальных

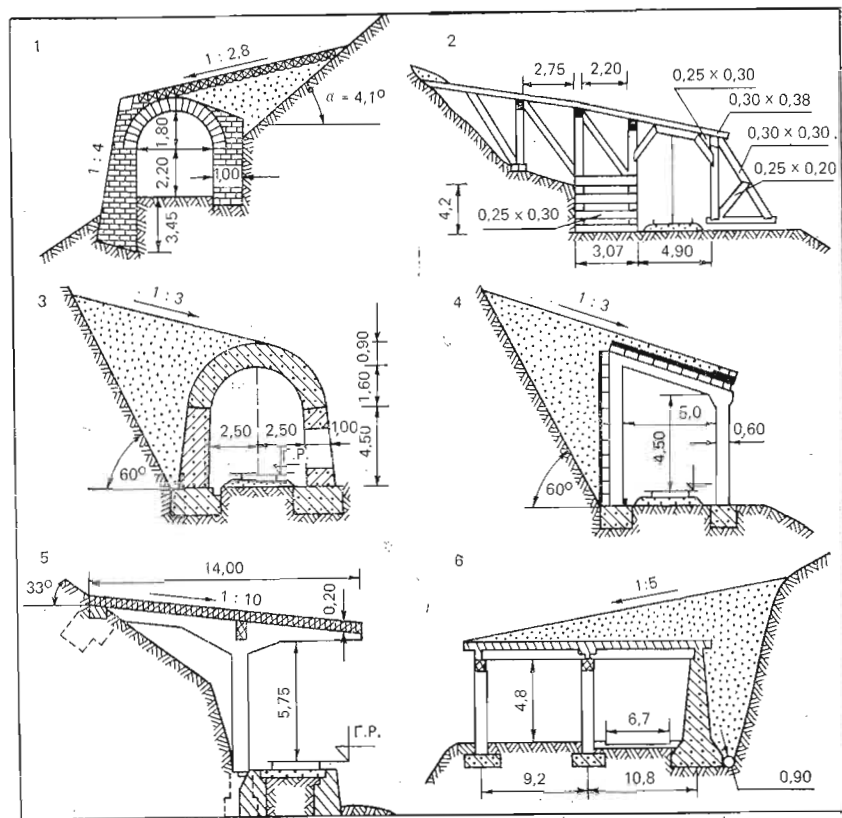


Рис. 11.5. Противолавинные галереи:

- 1 — арочная (Швейцария, 1870 г.); 2 — балочная деревянная (Канада, 1888 г.); 3 — арочная (СССР, Сахалин); 4 — рамная (СССР, Сахалин); 5 — консольная (Австрия); 6 — балочная (Канада)

тоннелей. Построенные в те времена на альпийских дорогах галереи представляли собой массивные арочные конструкции, сложенные из блоков песчаника или известняка (рис. 11.5, 1). В России каменные галереи арочной конструкции впервые были построены на Военно-Грузинской дороге в конце прошлого века. Широкое распространение получили также деревянные галереи (рис. 11.5, 2).

В XX в. вместо каменных арок начали строить арочные конструкции из бетона и железобетона (рис. 11.5, 3). В послевоенные годы преимущественное распространение получили железобетонные галереи рамной, балочной и консольной конструкций (рис. 11.5, 4, 5, 6; рис. 11.6). Галереи консольного типа строятся на участках железных и автомобильных дорог, пересекающих косогорным ходом транзитную зону лавиносбора

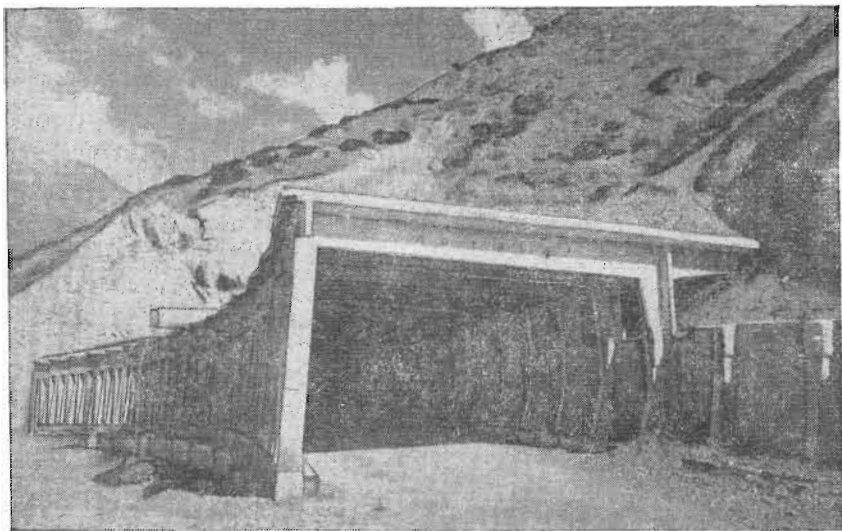


Рис. 11.6. Галерея на автомобильной дороге

в тех случаях, когда подгорный откос неустойчив, а с нагорной стороны фундамент подпорной стены можно опереть на прочный грунт.

Галереи рамного типа строятся в сейсмических зонах и на участках косогорного схода, где они будут испытывать повышенное боковое давление грунта и значительные силы трения при движении лавины.

Галереи балочной конструкции применяют в тех местах, где можно создать полку достаточной ширины и есть надежное основание для фундаментов под колонны.

На участках узких горных долин, где лавины угрожают дороге с двух сторон, и в зоне выброса лавин, где полотно дороги может быть засыпано слоем лавинного снега высотой более 10 м, имеют преимущества арочные галереи.

Галереи надежно защищают дорогу от лавин, но ограничением для их строительства является высокая стоимость и сложность ведения строительных работ на крутых склонах.

11.4. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТИВОЛАВИННЫХ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЛАВИН

Выбор вида и конструкции противолавинных сооружений и их размещение на местности производятся на основании технико-экономических расчетов с учетом конкретных снеголавинных условий и специфики защищаемого объекта. Эффективность и надежность противолавинных сооружений во многом зависят от того, насколько правильно были определены и учтены при проектировании параметры лавины, вероятность превышения расчетных параметров при неблагоприятных условиях и возможность схода повторных лавин.

Основными параметрами для расчета нагрузок на противолавинные сооружения являются скорость, размеры и плотность снеголавинного потока в местах его взаимодействия с сооружениями. В качестве расчетных принимаются параметры, характеризующие наибольшие в заданном лавиносборе по объему и дальности выброса лавины заданной техническими требованиями повторяемости. Так, для защиты магистральных железных дорог расчет противолавинных сооружений рекомендуется производить на воздействие лавины 1%-ной обеспеченности, т. е. лавины такого объема и дальности выброса, которые бывают не чаще 1 раза в 100 лет. Для менее ответственных объектов расчет противолавинных сооружений может производиться на воздействие лавин 2%- и даже 5%-ной обеспеченности, в зависимости от требуемой надежности защиты объекта. Принятие меньшей расчетной повторяемости лавин приводит к повышению лавинных нагрузок и существенному удорожанию противолавинных сооружений. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо выбирать наиболее обоснованные решения. При этом следует иметь в виду, что надежность работы противолавинных сооружений может быть повышена проведением комплекса профилактических мероприятий. В некоторых случаях расчетными могут быть одновременно лавины разных типов, например максимальные по объему и дальности выброса лавины из рыхлого сухого снега и максимальные по плотности лавины из мокрого снега.

Для правильного выбора противолавинных мероприятий и проектирования сооружений необходимо предварительно проводить снеголавинные изыскания. Важно, чтобы первый этап изучения снежного покрова в заданном горном районе и лавин проводился на стадии предпроектных инженерных изысканий, когда есть возможность рационально использовать лавинобезопасные участки и выбрать для размещения предполагаемых объектов наименее уязвимые места. Так, в 1967—1970 гг., в период, когда на трассе БАМ еще проводились изыскания и выбирались оптимальные варианты размещения трассы, проблемная лаборатория снежных лавин и селей МГУ провела оценку

лавинной опасности на трассе. На участке от Усть-Куга до Чары по долинам рек Купермы, Гоуджскит, Ангаракан, Хани было выявлено и охарактеризовано 294 лавиносбора (Лавинная и селевая опасность на трассе БАМ, 1980). На основании этих материалов проектировщикам удалось в большинстве мест проложить трассу вне лавиноопасных участков. Однако в ряде

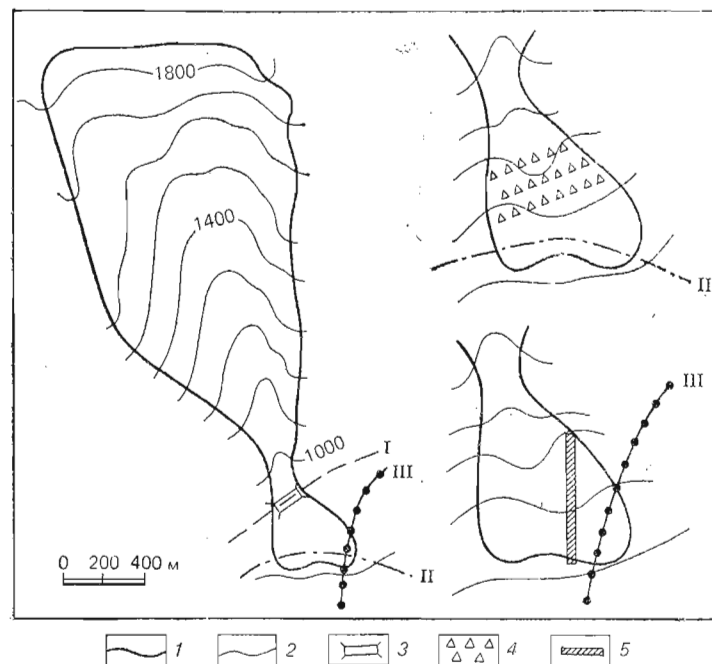


Рис. 11.7. Пример рекомендаций по защите трассы БАМ от воздействия лавин:

I, II, III — варианты расположения трассы; 1 — граница лавиноопасного участка; 2 — горизонтали; 3 — галерея; 4 — тормозящие надолбы; 5 — защитная дамба

мест трасса не могла обойти лавиноопасные зоны и пересекает лавиносборы. Для всех таких лавинсборов была проанализирована степень лавинной опасности и необходимость защиты трассы. Для наиболее опасных участков были разработаны рекомендации по защите трассы от воздействия лавин. Так как к этому времени месторасположение трассы еще не было окончательно установлено, рекомендации по защите разрабатывались применительно к нескольким вариантам прокладки трассы. На рис. 11.7 представлен пример рекомендаций по защите участка магистрали от лавин для трех вариантов пересечения лавиносбора. Такие рекомендации позволили выбрать оконча-

тельный вариант прокладки трассы с учетом лавинной опасности и наметить реальные способы защиты дороги от лавин.

Изучение снежного покрова и лавин на стадии предпроектных изысканий позволяет более полноценно производить последующие инженерные изыскания на стадии составления технического проекта, включать в эти изыскания более детальное изучение лавинного режима и предусматривать в проекте надежную защиту проектируемого объекта от лавин.

Для проектирования лавинотормозящих сооружений помимо параметров расчетной лавины необходимо иметь сведения о вероятности схода повторных лавин и их параметрах, метелевом снегопереносе, наличии камней в лавинном потоке.

Расчетная нагрузка на лавинорезы, отбойные дамбы и направляющие стенки задается в виде нормальных сил давления лавины на рабочую поверхность P_L и сил трения T , направленных касательно поверхности (рис. 11.8). Давление определяется по формуле

$$P_L = \rho_L v_L^2 \sin \alpha, \text{ Па}, \quad (11.1)$$

где ρ_L — средняя плотность лавинного потока (при отсутствии конкретных данных ее принимают в зависимости от типа лавины: из свежевыпавшего снега $\rho_L = 300 \text{ кг/м}^3$, из старого снега $\rho_L = 400 \text{ кг/м}^3$, из мокрого снега $\rho_L = 500 \text{ кг/м}^3$); v_L — скорость лавины в месте встречи с лавиноотклоняющим сооружением, м/с; α — угол между направлением движения лавины и поверхностью сооружения.

Силы трения определяются по формуле

$$T = P_L f, \text{ Па}, \quad (11.2)$$

где P — расчетное давление по формуле (11.1); f — коэффициент трения (для поверхностей из камня $f = 0,4$; для бетонных поверхностей $f = 0,3$).

Давление P_L и силы трения T условно принимаются равномерно распределенными по всей площади подвергаемой удару поверхности.

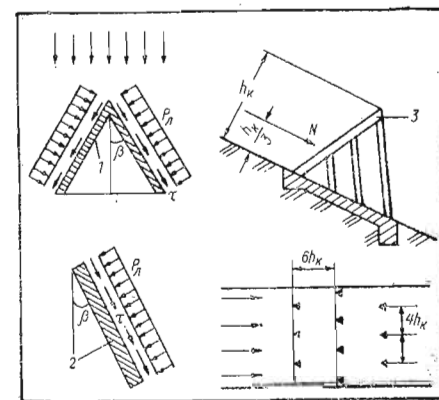


Рис. 11.8. Расчетная схема воздействия лавин на лавинорез (1), отклоняющую дамбу (2) и на тормозящие сооружения (3); 4 — расположение тормозящих сооружений в плане

Высота лавинонаправляющих сооружений назначается с некоторым превышением расчетной высоты снеголавиного потока. Требуемую высоту сооружения ориентировочно можно определить по формуле

$$h_c = \frac{h_n}{\cos \alpha}, \quad (11.3)$$

где h_c — высота рабочей поверхности лавинореза или отбойной дамбы, измеряемая перпендикулярно к склону; h_n — расчетная высота снеголавиного потока при подходе к сооружению, измеряемая перпендикулярно к склону; α — угол между направлением движения лавины и поверхностью сооружения ($\alpha \leq 30^\circ$).

Высоту лавинонаправляющих стенок определяют из расчета увеличения высоты лавинного потока при его сужении. Для криволинейных стенок следует дополнительно учитывать возможность повышения поверхности лавинного потока у стенки за счет центробежных сил.

Расчетную высоту лавинного потока определяют на основании инженерных снеголавиных изысканий. Для пылевых лавин определяют высоту основного снежного и снеговоздушного потоков. Высота лавиноотклоняющих сооружений может определяться исходя из расчетной высоты основного потока. Однако при выборе такого проектного решения необходимо учитывать, что снеговоздушный поток сможет распространяться в первоначальном направлении над сооружениями. Если же этого нельзя допускать, то необходимо увеличивать высоту отклоняющих сооружений, при этом верхняя часть их может быть облегченной.

Расчетную силу воздействия лавины на тормозящие постройки типа сборных железобетонных клиньев можно определить по формуле

$$N = \frac{\rho_n v_n^2}{2} F, \quad (11.4)$$

где N — суммарная нагрузка на лавинотормозящее сооружение, направленная параллельно склону, приложенная на высоте центра тяжести площади F , m^2 ; ρ_n — средняя плотность лавинного потока, kg/m^3 ; v_n — скорость лавины в месте встречи с сооружением, m/s ; F — площадь проекции сооружения на плоскость, перпендикулярную к направлению движения лавины: для треугольного клина $F = \frac{a_k h_k}{2}$, где a_k — ширина клина по низу; h_k — высота клина по перпендикуляру к склону (рис. 11.8).

Передние элементы лавинорезов и лавинотормозящих клиньев, непосредственно подвергаемые удару лавины, должны дополнительно рассчитываться на импульс силы от удара глыбы снега в наиболее опасное место (рис. 11.9).

Импульс силы принимается в виде треугольника с максимумом силы в начале

$$N_{\max}^0 = \frac{2}{3} \rho_{гд} v^2 \pi d_{\max}^2 \quad (11.5)$$

и продолжительностью

$$t_{уд} = \frac{d_{\max}}{2v}, \quad (11.6)$$

где $d_{\max}$ — максимальный диаметр глыбы снега в лавине, принимаемый по данным наблюдений за лавинами, сходящими

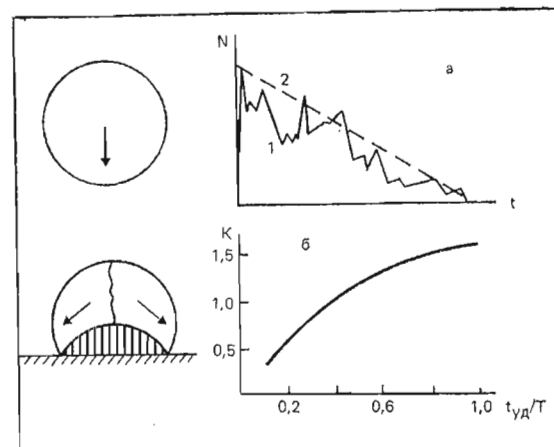


Рис. 11.9. Схема расчета силы удара снежной глыбы:
а — эпюры импульса удара: 1 — экспериментальная, 2 — расчетная; б — динамический коэффициент

в данном лавиносборе (порядка 0,5—1,5 м); $\rho_{гд}$ — плотность снежной глыбы; v — скорость движения глыбы.

Эквивалентная расчетная нагрузка на элемент сооружения, при которой деформация элемента соответствует его деформации при ударе глыбы, равна

$$N_{\text{эkv}} = K_d N_{\max}^0, \quad (11.7)$$

где K_d — динамический коэффициент (см. рис. 11.9), зависящий от отношения продолжительности действия импульса силы $t_{уд}$ к периоду собственных колебаний рассматриваемого элемента конструкций T (для железобетонных балок $T \sim 10^{-1}$ с).

Тормозящие сооружения располагают на конусе выноса в несколько рядов поперек направления движения лавин, где

крутизна лавинного пути менее 20° . Высоту лавинотормозящих сооружений следует принимать не менее высоты лавинного потока с учетом того, что поток может двигаться не по поверхности грунта, а по ранее отложенному или задержанному снегу.

Расстояние между лавинотормозящими сооружениями в ряду принимают равным $l \geq 4h_k$, а расстояние между рядами $S_p \sim 6h_k$ (h_k — высота сооружения по перпендикуляру к склону).

После прохождения одного ряда тормозящих сооружений скорость лавины уменьшается на величину

$$\Delta v = v_0 - v_1 = v_0 \frac{F'n}{2b_n h_n}, \quad (11.8)$$

где v_0 — скорость лавины при подходе к ряду сооружений; v_1 — скорость лавины после прохождения через ряд сооружений; F' — рабочая площадь поперечного сечения сооружения с учетом возможного уменьшения ее за счет отложенного снега перед сооружением; n — количество тормозящих сооружений в ряду; b_n — ширина лавинного потока; h_n — высота лавинного потока.

Снижение скорости лавины на промежутках между рядами тормозящих сооружений может быть определено графоаналитическим способом по С. М. Козику (см. гл. 5). Уменьшение скорости при прохождении лавины через последующие ряды определяется по формуле (11.8). Систему тормозящих сооружений желательно дополнять устройством защитной дамбы, размещаемой между защищаемым объектом и тормозящими сооружениями.

Защитные противолавинные дамбы часто проектируют в сочетании с лавинотормозящими сооружениями или с выемкой нагорной стороны дамбы. Желательно, чтобы расчетная скорость лавины в месте встречи с дамбой не превышала 20 м/с. Требуемую высоту противолавинной дамбы определяют по формуле

$$H_d = \frac{v_n^2}{2g} + h_n, \quad (11.9)$$

где H_d — высота дамбы по вертикали на бровке низового откоса, м; h_n — толщина лавинного потока.

Высоту дамбы следует проверять по условиям задержания всего объема лавин. Для увеличения аккумулирующей способности дамбы перед ней предусматривают искусственную выемку, размеры которой определяются с учетом максимального объема лавинных отложений.

Противолавинные галереи применяют для пропуска лавин над автомобильными и железными дорогами, где лавины локализованы в лотках или возможна их локализация возведением направляющих стен и дамб, которые должны выходить на

кровлю галереи и защищать ее порталы от завалов. Перекрытие проектируют с учетом статических и динамических нагрузок снега и сил трения лавины по его поверхности (рис. 11.10). Соответственно на эти нагрузки рассчитываются все несущие элементы галереи и фундаменты.

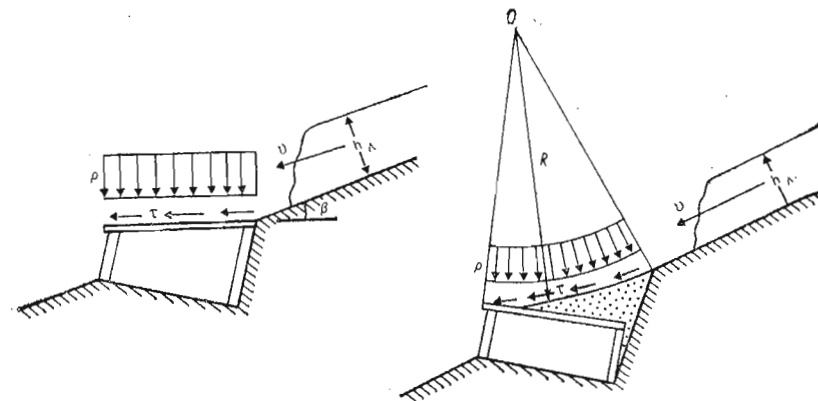


Рис. 11.10. Схема воздействия лавины на галерею

Давление лавины на кровлю галереи определяют по формуле

$$P_r' = P_n + \rho_n g h_n \cos \alpha_c, \quad (11.10)$$

где P_n — динамическое давление лавинного потока в соответствии с формулой (11.1); $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение силы тяжести; h_n — толщина лавинного потока, м; α_c — угол наклона кровли к горизонту.

Для уменьшения динамического давления лавинного потока на кровлю ее делают наклонной, уменьшая по возможности угол α_c между поверхностью кровли и примыкающим склоном. Применяют также амортизационные засыпки на кровле, плавно сопрягаемые со склоном (см. рис. 11.10). Динамическое давление на кровлю галереи в этом случае определяется по формуле

$$P_r'' = \rho_n h_n \frac{v_n^2}{R}, \quad (11.11)$$

где R — радиус сопряжения засыпки над галереей со склоном, м.

Силу трения лавинного потока по кровле галереи или по засыпке определяют по формуле (11.2).

Определение динамического давления лавины на кровлю галереи требует особо тщательного и вдумчивого задания расчетных параметров лавинного потока. Следует учитывать, что

обычно принимаемые для расчетов наибольшие по объему и дальности выброса лавины не обязательно будут оказывать наибольшее давление. Такие лавины имеют наибольшую скорость, однако плотность потока бывает относительно малой. В связи с этим появляется необходимость получения сведений о расчетных лавинах различного типа — из свежего снега, из снежных плит и из мокрого снега. Каждый из этих типов лавин будет отличаться по скорости, плотности и высоте лавинного потока. Соответственно и динамические давления будут различными. Для проектирования конструкции галереи выбираются наиболее невыгодные условия.

Прочность конструкции галереи проверяется также на нагрузку от слоя снега на кровле, отложенного при предшествующих снегопадах, метелях и сходах лавин, при этом не исключено возникновение и сил сдвига при подвижках снежного покрова на склоне и снежных осовах:

$$P_{oc} = \rho_{oc} g h_{oc} \cos^2 \alpha_c, \quad T = P_{oc} f, \quad (11.12)$$

где ρ_{oc} — плотность снежного осова или отложенного снега, кг/м³; h_{oc} — высота снега на кровле, м.

Возникновение такой ситуации, когда динамические и статические нагрузки одновременно достигнут максимальных значений, маловероятно, поэтому для расчетов галереи принимается из указанных расчетных нагрузок большая.

При строительстве галереи в долине она дополнительно рассчитывается на восприятие давления лавины на ее боковую стену. В некоторых случаях галерея может подвергаться боковому удару от лавины, сошедшей с противоположного склона долины.

В ряде мест лавины несут с собой значительное количество каменных обломков. В таких случаях при проектировании противолавинных сооружений необходимо учитывать вероятные повышенные нагрузки на сооружения при ударах камней.

Рассмотренные в данном параграфе положения изложены в соответствии с действующей «Инструкцией по проектированию и строительству противолавинных защитных сооружений (СН 517—80)». В настоящее время эти нормативы пересматриваются, основная цель его — разработка рекомендаций по методике определения расчетных параметров снежного покрова и лавин и совершенствование способов определения снеголавинных нагрузок на проектируемые сооружения.

Глава 12

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕДЕНИЯ РАБОТ И ОТДЫХА В ЛАВИНООПАСНЫХ РАЙОНАХ

12.1. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ В ЛАВИНООПАСНЫХ РАЙОНАХ

К числу наиболее часто требуемых видов работ в лавиноопасных зонах относятся: проведение геологоразведочных работ, инженерные изыскания, транспортные операции, строительство дорог, линий связи и различных народнохозяйственных объектов, строительство противолавинных сооружений, проведение работ по искусственному обрушению снега, обеспечение горнолыжного спорта и зимнего отдыха в горах. Планы организации работ должны включать характеристику местности, анализ метеорологических условий, оценку предполагаемой опасности и план действий.

Характеристика местности основывается на анализе сведений о рельефе территории и наличии лавиноопасных зон. Прежде чем планировать проведение работ в слабо изученных в лавинном отношении горных районах, следует выявить особенности рельефа по топографическим картам и на основании визуальных наблюдений проанализировать региональные закономерности снеголавинного режима и по возможности произвести предварительное дешифрирование аэрофотоснимков для выявления следов лавин и лавиноопасных участков. Начало геологоразведочных работ и инженерных изысканий в таких районах желательно планировать на летний период. При необходимости продолжения этих работ в лавиноопасный период нужно уточнить границы лавиноопасных зон и конкретизировать сведения о лавинной опасности.

Для проведения маршрутных снегомерных работ и проведения зимних стационарных снеголавинных исследований требуется предварительное составление схематической карты лавиноопасных зон и схем лавинных очагов. Желательно также иметь сведения о характеристике поверхности склонов и растительности, путях движения лавин, четких границах лавинобезопасных участков.

Ведение строительных работ в лавиноопасных районах обычно предусматривает необходимость предварительного составления еще на стадии инженерных изысканий и проектирования карты лавиноопасных зон и крупномасштабных карт лавиносборов с характеристиками вероятных лавин. Детальные сведения о рельефе и о лавиноопасных зонах необходимы также для мест зимнего отдыха в горах и горнолыжного спорта.

Климатические характеристики заданного района и конкретные метеорологические условия определяют время повышенной лавинной опасности. Их анализ дает возможность выбрать оптимальные сроки проведения работ в лавиноопасных районах, конкретизировать лавинную опасность и рационально организовать получение текущей метеорологической информации. Так как в намечаемом районе работ чаще всего метеостанция отсутствует, то анализ климатических характеристик и метеорологических условий приходится проводить на основании данных ближайшей метеостанции или снеголавинной станции с использованием аналогов и эмпирических связей. В последнем случае требуется особо тщательно изучать особенности местности и снеголавинного режима.

После того как сделан анализ местности, климата и метеорологических условий, приступают к оценке и классификации опасности района предстоящих работ. Выделяют четыре степени опасности.

1. Минимальная опасность устанавливается для участков, полностью защищенных от лавин естественными или искусственными противолавинными препятствиями и для мест, где условия на склонах таковы, что возникновение на них лавин маловероятно.

2. Небольшая постоянная опасность характерна для мест, где возможны крупные лавины, но сходят они редко, только при особо неблагоприятных снеголавинных условиях. Такая степень опасности относится также к постройкам и участкам, которые защищены препятствиями и противолавинными сооружениями, но могут быть подвержены воздействию особо крупных лавин редкой повторяемости.

3. Высокая непостоянная опасность принимается для участков, где достаточно часто зарождаются и сходят лавины опасных размеров. К ним относятся крутые склоны, на которых во время каждой метели может накапливаться достаточно снега для образования крупных лавин. Высокую опасность представляют также склоны, где возможен сход лавин из свежеснежавшего снега и образующихся вследствие перекристаллизации снежного покрова.

4. Высокая, не поддающаяся контролю, непостоянная опасность устанавливается для зон транзита и выброса лавин в лавиносборах, где возможен сход опасных лавин и нет возможности контролировать состояние снежного покрова и его устойчивость в зонах зарождения лавин.

Заключительный этап составления плана организации работ в лавиноопасных районах — составление конкретного плана действий по обеспечению безопасности работ, включающий в себя:

1. Цель, объемы и сроки выполнения работ.

2. Руководство работами и контроль за обеспечением безопасности. В плане следует четко определить руководителя и

его предполагаемое местонахождение; кто будет наблюдать за изменением лавинной ситуации, на кого возложен контроль за соблюдением правил ведения работ в лавиноопасных зонах.

3. Условия работы. В плане должны быть определены пути подъезда и подхода к местам выполнения работ, указаны лавинобезопасные места и убежища на случай объявления лавинной опасности. Для ведения строительных работ указывают места временного складирования строительных материалов и пути их доставки на строительные площадки, очередность выполнения работ и мероприятия, которые следует проводить при ухудшении лавинной ситуации. К числу основных характеристик условий работы относится также оценка лавинной ситуации и прогноз возможных его изменений на основании метеорологического прогноза и дополнительных наблюдений.

4. Сведения о количестве людей, транспорта и механизмов, направляемых в лавиноопасную зону с указанием, в каких конкретных местах они будут заняты.

5. Перечень мероприятий по обеспечению безопасности выполнения запланированных работ, куда включаются все принимаемые меры защиты. Определяется процедура запрета и разрешения продвижения, сигналы об ограничениях деятельности, последовательность действий по контролю за лавинной опасностью. Особо оговариваются вопросы организации поиска и спасения людей, пострадавших при лавинной катастрофе.

Работы в лавиноопасных зонах, как правило, проводятся в соответствии с принятым планом их организации. Однако уже в самих планах должны предусматриваться возможности оперативного изменения порядка работ при неблагоприятном изменении лавинной ситуации или при появлении непредвиденных планом опасностей.

12.2. ЗАЩИТА ОТ ЛАВИН ТЕРРИТОРИИ ДЛЯ ГОРНОЛЫЖНОГО СПОРТА

В районах лыжного спорта должен быть организован надежный контроль за состоянием снежного покрова и обеспечено своевременное закрытие лавиноопасных участков для доступа спортсменов и отдыхающих. Желательно также проведение работ по уплотнению снега на лыжных трассах и искусственному обрушению снега лавиноопасных склонов. Для этой цели выделяют специальные группы людей, включающие специалиста по лавинам, опытных лыжников-инструкторов и спасателей.

Должна быть налажена четкая информация о местах, где разрешено катание на лыжах. Лавиноопасные участки ограждаются знаками: «закрыто», «лавинная опасность», «берегись», «лавины». Помимо этих знаков применяются ограждения из цветной веревки и флажков и указатели пути обхода опасного участка.

При наступлении лавинной опасности лыжные трассы закрываются. После каждого снегопада и метели, прежде чем открыть трассу, следует оценить степень опасности и непосредственно проверить безопасность. Проверка безопасности использования трасс необходима также во всех случаях резкого ухудшения устойчивости снежного покрова, например при быстром росте слоя глубинной изморози и при интенсивном снеготаянии. По мере необходимости принимаются меры для ликвидации лавинной опасности путем искусственного обрушения неустойчивых масс снега.

Весьма эффективным для повышения устойчивости снежного покрова на лыжных трассах является его уплотнение, особенно на крутых участках. Уплотнение проводят систематически, начиная с первого снегопада, путем утаптывания снега лыжами или ботинками. Естественно, что такая операция может проводиться при отсутствии угрозы образования лавины во время утаптывания и схода лавин на трассу с соседних склонов. Для уплотнения снега на трассах применяются также специальные машины на гусеничном ходу, которые одновременно срезают снежные бугры и выравнивают поверхность трассы.

Уплотнение снега существенно уменьшает вероятность потери устойчивости снежного покрова вследствие процессов перекристаллизации и образования глубинной изморози. Оно не прекращает самих процессов метаморфизма, но ликвидирует пустоты в снежном покрове и исключает его резкие просадки. Это весьма важно для участков, где без уплотнения возможно зарождение лавины из снежных плит в процессе метаморфизма снега.

Перед открытием трасс после лавинной опасности производится непосредственная проверка устойчивости снежного покрова в виде контрольных спусков на лыжах специалистов из группы, отвечающей за защиту от лавин.

Многие лавинные проблемы в лыжных районах могут быть решены более детальным изучением снеголавинного режима и разработки планов контроля лавинной опасности. Для оперативной работы в дополнение к карте лавиноопасных зон и характеристикам лавиносборов составляются фотопанорамы, на которых отмечаются лавиноопасные участки и степень их опасности.

По мере накопления опыта план лавинного контроля уточняется. В особенности это относится к выработке наиболее эффективных маршрутов контрольных спусков и совершенствованию организационных мероприятий при возникновении лавинной опасности. В таких планах предусматриваются методы контроля на всех лавиноопасных участках, указываются маршруты проведения испытаний снежного покрова лыжниками и доставки взрывчатых веществ для контроля устойчивости снежного покрова с помощью взрывов. Предусматривается создание убежищ для контрольных команд и хранилищ для

инструмента и спасательного оборудования. Планируются организационные мероприятия на случай различных лавинных условий.

12.3. ПРАВИЛА ПОВЕДЕНИЯ НА ЛАВИНООПАСНЫХ СКЛОНАХ

Выход на лавиноопасный склон даже для опытных специалистов представляет некоторый риск, увеличивающийся при неустойчивой погоде. Статистика лавинных катастроф отмечает, что большинство обвалов, сопровождающихся гибелью людей, были вызваны самими жертвами.

Обычно следует избегать выхода на покрытые снегом склоны крутизной более 30°. При необходимости пересечь лавиносбор в период возможной неустойчивости снежного покрова лучше в зоне выброса, чем в зоне зарождения лавины или в лавинном лотке. Если же требуется пересекать стартовую зону лавин, то желательно это делать как можно выше, по возможности выше предполагаемой линии отрыва. Следует помнить, что лыжник на склоне может инициировать потерю устойчивости снежного покрова и вызвать сход лавины. Подниматься к месту пересечения лавиносбора следует по боковой гряде, окаймляющей лавинный лоток и зону зарождения лавин.

При необходимости подъемов и спусков в стартовой зоне следует придерживать края этой зоны. При растрескивании снежной плиты человеку, находящемуся на краю приходящего в движение снежного пласта, больше шансов спастись, чем находящемуся в центральной части зоны зарождения лавин.

При возможности выбора предпочтение отдается стартовым зонам, из которых лавины сходят на плоские открытые зоны выброса, по сравнению с зонами, где они выбрасываются в глубокие ложины.

Пересечение лавиноопасного склона производится поочередно. Один лыжник выезжает на склон, а другой остается в безопасном месте вне лавиносбора, откуда виден путь движения первого лыжника. В случае потери устойчивости снежного покрова лыжник стремится выскочить из пришедшего в движение участка снежного пласта. Опытные лыжники осуществляют такой маневр быстрым увеличением скорости спуска поворотом вниз по склону с последующим поворотом в сторону ближайшей границы лавиносбора. Если же выехавший на склон лыжник будет захвачен лавиной, то страхующий его товарищ наблюдает за попавшим в лавину лыжником и отмечает путь его движения в лавине, после чего принимает меры для его спасения.

После успешного пересечения склона лыжник выбирает позицию для наблюдения за спуском своего товарища, который начинает свой спуск только после сигнала ранее пересекшего склон лыжника.

Лыжникам, выходящим на опасный склон, не следует вдевать руки в петли на лыжных палках. Если человек попал в лавину, шансы на его спасение зависят от того, насколько свободны у него руки для того, чтобы ими защитить лицо, выдавить в снеге пространство для дыхания и, возможно, выбраться на поверхность. Если он не успеет выдернуть руки из петель, то они могут оказаться связанными зарывшимися в снег лыжными палками.

Небольшие внешне неопасные лавины представляют большую угрозу, если падают с обрывов в ущелья. Хотя погребенный в снежной лавине человек чаще всего погибает от удушья, во многих случаях смерть наступает из-за ударов, нанесенных увлекаемыми лавиной камнями и обломками деревьев. Особенно опасны снежные обвалы в начале зимы по склонам, где еще сохраняется много неровностей и выступающих камней.

Никогда не следует работать на лавиноопасных участках, путешествовать в горах в одиночку. Это основное правило, особенно во время лавиноопасных периодов. Группа, выполняющая работы по оценке лавинной опасности и искусственному обрушению снега, должна состоять как минимум из двух человек. Они должны вести себя таким образом, чтобы ни в коем случае не подвергаться опасности одновременно. В случае, если лавина застигнет одного из них, другой сможет откопать его или привести спасателей.

Захваченному лавиной человеку рекомендуется по возможности пытаться удержаться на поверхности лавинного потока и двигаться к его краю. В лавине из рыхлого снега целесообразно делать плавательные движения руками, пытаясь «плыть» на поверхности. Если же человек погружается в лавинный поток, то рекомендуется закрыть лицо руками, создавая пространство для дыхания, а при остановке потока попытаться взломать снег и поднять одну руку. Зафиксированы случаи, когда такие приемы спасли жизнь попавшим в лавину людям.

При выполнении работ по обрушению карнизов и искусственному нарушению устойчивости снежного покрова лыжами в верхних зонах небольших лавиносборов полезно пользоваться альпинистской веревкой. Человеку, страхующему выходящего на опасный склон лыжника, рекомендуется привязываться к дереву, камню или скальному выступу. Это повышает надежность страховки.

Для работ на особо опасных склонах целесообразно использовать «лавинный шнур» — яркую цветную нейлоновую веревку длиной не менее 15 м. Такая веревка ускоряет поиски попавшего в лавину человека и увеличивает вероятность его спасения. Во Французских Альпах для повышения эффективности лавинного шнура к его концу прикрепляют небольшой цветной баллон, наполненный гелием.

В лавиноопасных районах нельзя пользоваться только привычными и неизменными правилами. Характеристики снежного

покрова весьма многообразны и изменчивы. Предугадать все возможные варианты нарушения устойчивости снежного покрова практически невозможно. Поэтому выполняющие работы в лавиноопасных зонах должны тщательно готовиться к проведению намеченных работ и быть готовыми к непредвиденному ухудшению лавинной обстановки. Руководители должны иметь знания и опыт работы в лавиноопасных районах, а все работники должны предварительно проходить соответствующий инструктаж.

12.4. СПАСАТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Попавшие в лавину люди могут погибнуть от тяжелых травм во время перемещения лавинного потока и при ударах о деревья, камни и неровности рельефа. Однако в большинстве случаев смерть наступает от удушья. Снег попадает в рот жертвы и давит на его грудь. При остановке лавинного потока снег откладывается настолько плотно, что человек становится беспомощным и не может двигать ни руками, ни ногами. Единственная возможность спасти жизнь попавшего в лавину человека — это быстрые и правильно организованные спасательные работы. Шансы на то, что засыпанный лавиной человек останется живым, быстро уменьшаются по мере увеличения промежутка времени до его извлечения из снега. По данным статистики, при откапывании попавшего в лавину человека в течение 10 мин в живых остаются около 70%, а через 1 ч — 30%, а после 2 ч — менее 20%. Известны случаи, когда в живых оставались люди, засыпанные лавиной и откопанные через 3 сут и более, однако это исключительные случаи. Обычно 2 ч являются пределом времени, в течение которого засыпанный может оставаться живым. В снеге благодаря его пористости содержится достаточно воздуха для сохранения жизни человека. Однако в течение 2 ч вокруг лица человека, засыпанного лавиной, образуется ледяная маска, препятствующая дыханию. Поэтому при спасательных работах следует стремиться к тому, чтобы извлечь пострадавшего из лавины как можно быстрее. Поскольку человек, погребенный лавиной, может оказаться в особых условиях (например, в воздушном мешке), спасательные операции должны продолжаться не менее 24 ч.

Успех спасательных работ зависит от опыта и знаний руководителя работ и спасателей и наличия специального оборудования. Спасательные операции должен возглавлять руководитель или заранее назначаемый ответственный за технику безопасности работник, знакомый с правилами поиска и спасения людей, попавших в лавину.

В местах проведения массовых работ в лавиноопасных районах и на территориях для горнолыжного спорта желательны постоянно действующие службы, имеющие необходимый

персонал и спасательное оборудование. Работу службы следует организовать таким образом, чтобы буквально в считанные минуты после получения сигнала о несчастном случае группа спасателей могла отправиться к месту катастрофы. Важное значение имеет четко работающая сигнализация и быстрое оповещение членов спасательной команды, рациональное размещение помещений со спасательным оборудованием и обеспечение транспортом.

В складе спасательного оборудования должны храниться: лавинные зонды и лопаты, электрические налобные лампы, трос, нейлоновый шнур, аптечка первой помощи, разборные или специальные сани, шерстяные одеяла. Рекомендуются иметь также дополнительное оборудование: неприкосновенный запас продовольствия, горные лыжи и специальные чехлы для них для подъема на склон по снегу, химические грелки, дополнительные наборы зондов, керосиновую печку, мешок с походной кухней, палатку, керосиновые фонари, портативный радиоприемник, простейшее медицинское реанимационное оборудование.

При поиске засыпанных лавиной людей необходимо принимать прежде всего также решения, которые повышают вероятность отыскания пострадавшего живым. Так, можно организовать тщательный поиск, который дает почти полную гарантию отыскания пострадавшего, но это потребует длительного времени и снижает шансы найти его еще живым. Поэтому обычно рекомендуется сначала производить быстрые поверхностные поиски и редкое прощупывание снежных отложений до тех пор, пока остается надежда извлечь засыпанного лавиной человека живым.

Первой задачей является установление наиболее вероятного местоположения пострадавшего. По показателям свидетелей или по приметам устанавливают место, где был пострадавший перед тем, как обрушилась лавина. При возможности устанавливают точку, где пострадавший попал в лавину и где его видели в последний раз. По этим точкам и на основании сведений о лавиносборе определяют вероятную траекторию движения в лавине и участок первоочередного поиска. Любые выступы по поверхности лавинного пути, где задерживается снег, могут задержать и пострадавшего. Деревья, скалы и другие препятствия на пути движения лавины также могут задержать движение пострадавшего.

После выявления наиболее вероятных мест нахождения пострадавшего производят быстрый осмотр поверхности снежных завалов в этих местах и поиск признаков засыпанного лавиной человека (высунутая из снега рука, снаряжение, конец лавинного шнура). При отсутствии внешних следов приступают к зондированию с помощью металлических щупов. Наиболее распространены щупы из металлических трубок диаметром 10—15 мм, длиной 3—4 м. Применяются также составные щупы,

которые легче переносить, однако они недостаточно жесткие для зондирования завалов из снега повышенной плотности.

Известно много случаев, когда извлеченные из лавины люди не проявляли признаков жизни и тем не менее удалось сохранить им жизнь. Поэтому желательно, чтобы в спасательной команде был опытный врач. Когда человек найден, в первую очередь нужно освободить его голову и быстро очистить от снега его рот, нос и глаза. Остальные спасатели осторожно откапывают тело засыпанного. Если человек дышит нормально, то следует определить, насколько он переохладился. Если у него побелели от замерзания части тела (чаще всего пальцы и уши) или наблюдается резкое понижение температуры тела и уменьшение частоты пульса, надо принимать срочные меры для согревания пострадавшего. Для этого его очень осторожно переносят в закрытое от ветра и снега помещение или хотя бы под временно натянутый тент, где пострадавшего при необходимости переодевают, производят растирание, закутывают в одеяла или помещают в большой спальный мешок, прикладывают грелку. При телесных повреждениях оказывают соответствующую помощь.

Если у извлеченного из лавины человека нарушено или совсем не отмечается дыхание, то прежде всего необходимо принять меры для восстановления и поддержания дыхательного процесса, используя приемы искусственного дыхания и портативные кислородные аппараты. Искусственное дыхание проводится до тех пор, пока не удастся восстановить дыхание потерпевшего или пока не будет зафиксирована его смерть. При этом нельзя забывать и о переохлаждении спасаемого.

После оказания первой помощи пострадавшего следует по возможности быстрее отправить в больницу. При этом надо соблюдать меры предосторожности, особенно при ушибах и переломах, при перебоях дыхания. Важно, чтобы при организации спасательных работ было предусмотрено достаточное количество медикаментов, медицинских приборов и приспособлений. Это особенно касается помпы для дыхания, респиратора, кислородного аппарата и других приспособлений для поддержания дыхания пострадавшего.

- Акифьева К. В. Методическое пособие по дешифрированию аэрофото- снимков при изучении лавин. — Л., 1980. — 50 с.
- Божинский А. Н., Лосев К. С. Основы лавиноведения. — Л., 1987. — 280 с.
- Войтковский К. Ф. Механические свойства снега. — М., 1977. — 136 с.
- Войтковский К. Ф., Эльмесов А. М., Херхеулидзе И. И. Под- весной сборной лавиногаситель//Лавины Приэльбрусья. — М., 1974. — С. 158—165.
- Гляциологический словарь/Под ред. Котлякова В. М. — Л., 1984. — 528 с.
- Голубев В. Н., Войтковский В. К. Количественные характеристики структуры снега//Мат. гляциал. исслед. Вып. 31. — М., 1977. — С. 164—168.
- Гофф А. Г., Оттен Г. Ф. Экспериментальное изучение снежных обва- лов//Снег и снежные обвалы. — Тбилиси, 1936. — С. 61—79.
- Данилова Е. М., Эглит М. Э. Движение лотковых лавин//Мат. гляци- ал. исслед. Вып. 31. — М., 1977. — С. 65—74.
- Залиханов М. Ч. Снежнолавинный режим и перспективы освоения гор Большого Кавказа. — Ростов, 1981. — 376 с.
- Инструкция по проектированию и строительству противолавинных защитных сооружений СН 517—80. — М., 1981. — 19 с.
- Исаенко Э. П., Иванов А. В., Васильев А. Б. Вопросы оператив- ного прогноза лавинной опасности на железнодорожной линии Южно- Сахалинск—Холмск//Снег и лавины Сахалина. — Л., 1975. — С. 93—102.
- Карта лавиноопасных районов СССР. Масштаб 1:7 500 000. — М., 1971.
- Козик С. М. Расчет движения снежных лавин. — Л., 1962. — 76 с.
- Куваева Г. М. и др. Физические свойства снежного покрова Большого Кавказа. — М., 1967. — 190 с.
- Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова. — Л., 1957. — 179 с.
- Лавинная и селевая опасность на трассе БАМ. — М., 1980. — 190 с.
- Лавиноопасные районы Советского Союза//Под ред. Г. К. Тушинского. — М., 1970. — 200 с.
- Лосев К. С. По следам лавин. — Л., 1983. — 136 с.
- Матвиенко В. С., Гербер А. Р. Экспериментальные исследования взрыва в снеге//Проектирование, постройка и содержание железных до- рог в сложных физико-географических условиях. — Новосибирск, 1972. — С. 53—65.
- Москалев Ю. Д. Динамика снежных лавин и снеголавинные расчеты. — Л., 1977. — 205 с.
- Отуотер М. Охотники за лавинами. — М., 1972. — 270 с.
- Практическое пособие по прогнозированию лавинной опасности. — Л., 1979. — 200 с.
- Руководство по снеголавинным работам (временное). — Л., 1965. — 398 с.
- Саатчян Г. Т. Снег и снежные обвалы. — Тбилиси, 1936. — С. 1—59.
- Савельев Б. А., Лаптев М. Н., Лаптева Н. И. Строение, состав и физико-механические свойства снега в Хибинах и их изменение в про- цессе метаморфизма//Снег и лавины Хибин. — М., 1967. — С. 201—239.
- Северский И. В., Благовещенский В. П. Оценка лавинной опас- ности горной территории. — Алма-Ата, 1983. — 220 с.
- Снежные лавины. — М., 1964. — 208 с.
- Строительная климатология и геофизика. СНиП 2.01-82. — М., 1983. — 136 с.
- Тушинский Г. К. Лавины. — М., 1949. — 213 с.
- Тушинский Г. К. Защита автомобильных дорог от лавин. — М., 1960. — 152 с.
- Указания по расчету снеголавинных нагрузок при проектировании сооруже- ний. ВСН 02-73. — М., 1975. — 20 с.
- Фляйг В. Внимание, лавины. — М., 1960. — 224 с.
- Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. — М., 1955. — 492 с.
- Эглит М. Э., Свешникова Е. И. Математическое моделирование снеж- ных лавин//Мат. гляциал. исслед. Вып. 38. — М., 1980. — С. 79—83.
- Эглит М. Э., Вельтишев Н. Н. Исследования математических моделей пылевой снежной лавины//Мат. гляциал. исслед. Вып. 53. — М., 1985. — С. 116—119.

Предисловие	3	7.5. Определение расчетных параметров снежного покрова и лавин	93
Глава 1. История развития лавиноведения	4	Глава 8. Прогнозирование лавинной опасности	95
1.1. Лавинные катастрофы	4	8.1. Виды прогнозов	95
1.2. Исследования лавин	7	8.2. Прогноз лавин, вызываемых снегопадами и метелями	96
Глава 2. Снежный покров в горах	12	8.3. Прогноз лавин, вызываемых перекристаллизацией снега	101
2.1. Твердые осадки	12	8.4. Прогноз лавин из мокрого снега	102
2.2. Формирование снежного покрова	14	8.5. Составление лавинных прогнозов с помощью ЭВМ	103
2.3. Стратиграфия и структура снежного покрова	16	8.6. Локальные прогнозы лавинной опасности	105
2.4. Физические свойства снега	18	Глава 9. Профилактические мероприятия для защиты от лавин	108
2.5. Метаморфизм снежного покрова	24	9.1. Организационно-хозяйственные противолавинные мероприятия	108
2.6. Термический режим и таяние снежного покрова	28	9.2. Искусственное обрушение снега с лавиноопасных склонов	110
Глава 3. Механические свойства снега	31	9.3. Механизм воздействия взрыва на снежный покров	111
3.1. Основные закономерности деформирования снега	31	9.4. Обстрел лавиноопасных склонов	114
3.2. Уплотнение снега	32	9.5. Организация работ по искусственному обрушению снега	115
3.3. Ползучесть снега	36	Глава 10. Искусственное удержание снега на лавиноопасных склонах	117
3.4. Разрушение снега	38	10.1. Способы удержания снега на склонах	117
3.5. Сопротивление снега сдвигу	39	10.2. Сооружения для регулирования отложений метелевого снега	121
3.6. Сопротивление снега разрыву	42	10.3. Основы проектирования снегоудерживающих сооружений	124
3.7. Твердость снега	44	Глава 11. Инженерные мероприятия для непосредственной защиты от лавин	131
Глава 4. Зарождение лавин	46	11.1. Изменение направления движения лавин	131
4.1. Зона зарождения и путь движения лавин	46	11.2. Уменьшение скорости движения и дальности выброса лавин	133
4.2. Уплотнение и течение снежного покрова на склонах	47	11.3. Пропуск лавин над защищаемым объектом	134
4.3. Показатели устойчивости снежного покрова	50	11.4. Основы проектирования противолавинных сооружений для непосредственной защиты от лавин	137
4.4. Причины нарушения устойчивости снежного покрова	53	Глава 12. Обеспечение безопасности ведения работ и отдыха в лавиноопасных районах	145
4.5. Классификация лавин	58	12.1. Организация работ в лавиноопасных районах	145
Глава 5. Движение лавин	61	12.2. Защита от лавин территорий для горнолыжного спорта	147
5.1. Характер движения лавин	61	12.3. Правила поведения на лавиноопасных склонах	149
5.2. Механика движения лавин	62	12.4. Спасательные работы	151
5.3. Графоаналитический способ расчета скоростей движения лавины	65	Литература	154
5.4. Дальность выброса лавин	68		
5.5. Плотность и размеры лавинного потока	70		
5.6. Воздушные волны и снеговоздушные потоки	71		
5.7. Взаимодействие лавин с препятствиями	73		
Глава 6. Лавиноопасные районы СССР	75		
6.1. Обзорная карта лавиноопасных районов	75		
6.2. Районирование лавиноопасных территорий СССР по типам лавинообразования	77		
6.3. Картографирование лавинной опасности	83		
Глава 7. Наблюдения за снежным покровом и лавинами	88		
7.1. Организация снеголавинных работ	88		
7.2. Экспедиционные работы	88		
7.3. Стационарные наблюдения	90		
7.4. Инженерные снеголавинные изыскания	91		

В 1990 ГОДУ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ВЫПУСТИТ КНИГУ:

Сальников С. Е., Губанов М. Н., Масленникова В. В. КОМПЛЕКСНЫЕ КАРТЫ ОХРАНЫ ПРИРОДЫ: СОДЕРЖАНИЕ И ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ. — 7 л. — 1 р. 40 к.

В монографии, посвященной актуальному направлению прикладного тематического картографирования, характеризуются экологическая терминология, предмет и задачи природоохранного картографирования. Представлены методика разработки мелкомасштабных комплексных карт охраны природы оценочно-рекомендательного направления, принципы природоохранной дифференциации территории на ландшафтной основе. По-новому освещаются вопросы отображения особо охраняемых природных территорий и акваторий, мероприятий, имеющих природозащитное и природовосстановительное назначение.

Для географов, картографов и экологов.

Темплан 1990 г., № 129

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Войтковский Кирилл Фабианович

ЛАВИНОВЕДЕНИЕ

Зав. редакцией И. И. Шехура
Редактор Л. М. Батыгина
Художник Л. Е. Безрученков
Художественный редактор Б. С. Вехтер
Технический редактор Г. Д. Колоскова
Корректоры Н. В. Каргышева, Л. А. Костылева

ИБ № 3381

Сдано в набор 22.04.88.
Подписано в печать 09.01.89.
Л-14004. Формат 60×90/16. Бумага тип. № 2.
Гарнитура литературная. Высокая печать.
Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 10,25.
Тираж 1700 экз. Заказ 356. Изд. № 4880.
Цена 35 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство Московского университета.
103009, Москва, ул. Герцена, 5/7.
Типография ордена «Знак Почета» изд-ва МГУ.
119899, Москва, Ленинские горы