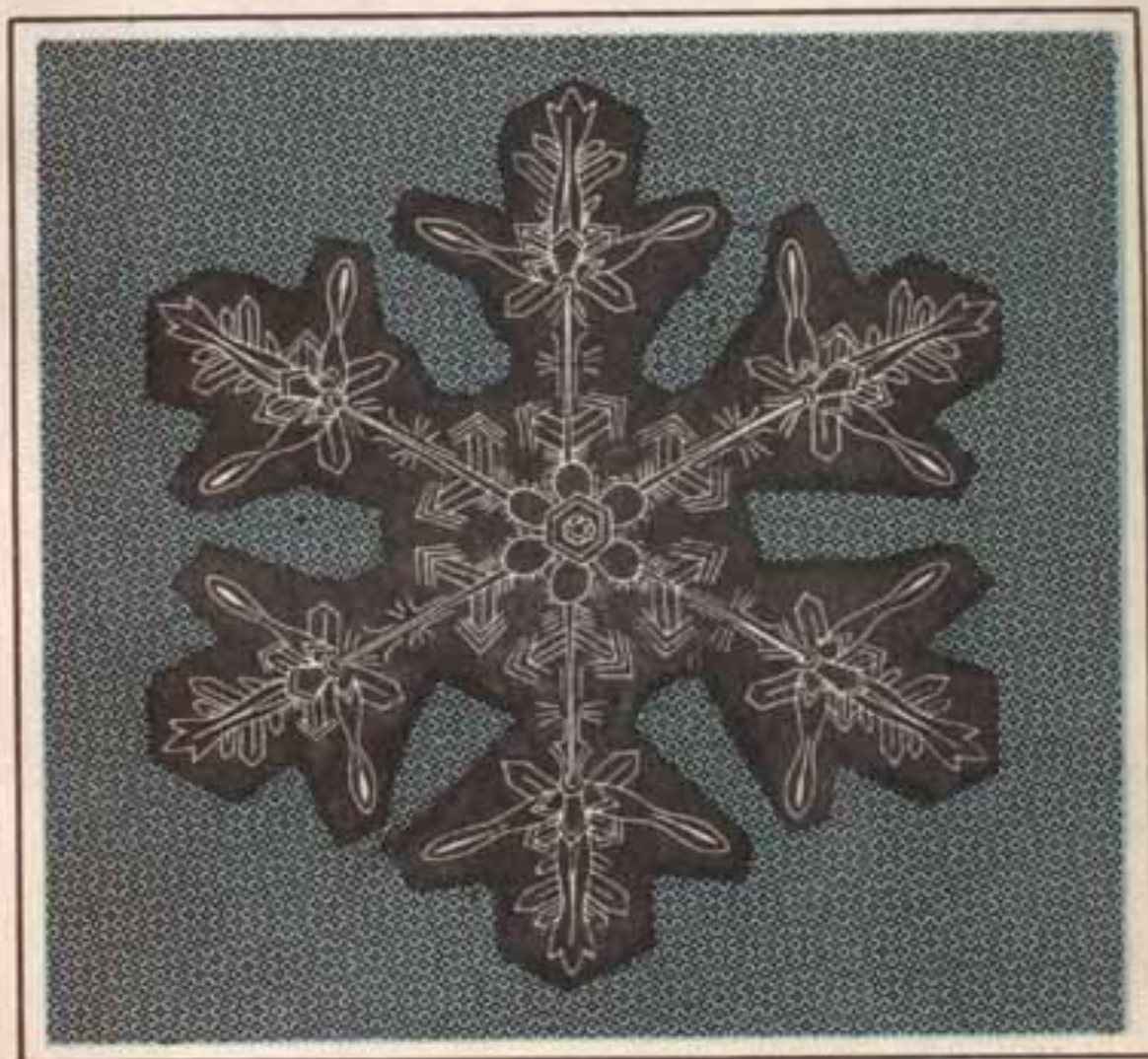


А.Н. ДЮНИН
В ЦАРСТВЕ
СНЕГА



ИЗДАТЕЛЬСТВО · НАУКА ·
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Академия наук СССР, Сибирское отделение
Серия "Человек и окружающая среда"
Ответственный редактор чл.-кор. АН СССР П. И. Мельников
Издательство "Наука"
Сибирское отделение .Новосибирск 1983

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие автора

Глава первая. Снеговедение - новая наука?

- Свидетельства истории
- Снеговедение - ветвь гляциологии
- Снег и ледниковые периоды
- Инженерное снеговедение

Глава вторая. Необычные свойства снега

- Теплофизика снега. Его испарение
- Чудо метаморфизма
- Теплопроводность снега
- Радиационные свойства снега
- Твердение снега
- Разнообразие снежных кристаллов
- Стратиграфия снежного покрова

Глава третья. Бураны

- Классификация метелей
- Начало буранов
- Зона разгона
- Транспортирующая способность метелей
- Предельная дальность переноса снега
- Законы снежных заносов
- Метелевый рельеф
- Горные метели
- "Метелевое электричество"
- Есть ли метели на Марсе?

Глава четвертая. "Белая смерть"

- География лавин
- Физика лавин
- Дальность выброса лавин
- Удар лавины
- Прогноз лавин
- "Дактилоскопия" лавин

Глава пятая. Борьба со снежными фуриями

- Проблема уборки снега
- Защита от буранов
- Первые шаги в борьбе с лавинами
- Современные средства защиты от снежных лавин

Глава шестая. Снег служит человеку

- Снегомелиорация
- Снегопахание
- Сибирские фрукты и снег

- Снежный транспорт
- Снег - строительный материал
- Снег и спорт
- Снег-летописец
- Снег и охрана окружающей среды

Примечания

Литература для дополнительного чтения

Книга посвящена проблемам современного снеговедения - недавно сформировавшейся науки о снежной мантии нашей планеты, призванной наряду с другими науками о Земле сохранить и улучшить природу. Автор рассказывает о свойствах снежного покрова, о причинах, вызывающих жестокие бураны и грозные горные лавины, о средствах укрощения этих опасных явлений, о многочисленных формах использования снега - от дорожных тоннелей в снежной толще Гренландии до защиты нежных плодовых культур от вымерзания.

Для широкого круга читателей - инженеров, преподавателей, студентов, учащейся молодежи.

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Книга, предлагаемая читателям и освещающая в популярной форме современное состояние снеговедения как ветви общей гляциологии, написана, пожалуй, впервые на эту тему и в такой форме.

Сведений о науке снеговедение пока нет ни в одной энциклопедии, так как она оформилась сравнительно недавно в связи с резким усилением темпов освоения Заполярья, Антарктиды, севера Сибири, Канады, Аляски. Снег - решающий погодный фактор, он оказывает влияние на все отрасли народного хозяйства и особенно в районах сурового климата. Снеговедение, бурно развивающееся в СССР и за рубежом, становится серьезной, многосложной современной дисциплиной, общенаучная значимость которой весьма велика, а практические приложения неисчислимы.

Но, как и в любом новом деле, в учении о снеге остаются еще нерешенные проблемы, ждущие своих энтузиастов. То, что "обыденный" снег раньше плохо изучался, может показаться курьезом, но нетрудно привести множество примеров подобного отставания в изучении и других обычных явлений. Не надо забывать и то, что снеговедение имеет дело с материалом, требующим применения специальных разделов физики в механики, тончайших методов экспериментальных и полевых наблюдений, которые разработаны недавно.

Главная цель, поставленная автором, - вызвать у читателя интерес к Снежной Мантии нашей Планеты, к большим проблемам ее исследования и практического использования, а также к проблемам защиты от таких снежных фурий, как бураны и горные лавины.

Автор глубоко признателен члену-корреспонденту АН СССР П. И. Мельникову, поддержавшему идею издания книги и взявшему на себя тяжкий труд ее редактирования, и члену корреспонденту ЛИ СССР О. Ф. Васильеву - рецензенту, оказавшему огромную помощь ценнейшими советами и критическими замечаниями.

ГЛАВА ПЕРВАЯ СНЕГОВЕДЕНИЕ - НОВАЯ НАУКА

Как необыкновенно красивы, как трагичны золотые, зеленые, в пышной листве, багряные, алые, неопавшие деревья под шапками снега/.. Каждая ветка на дереве под слоем снега, каждая железка в ограде, каждый его завиток - все белое, игольчатое, пуховое.

Ольга Кожухова, Рано утром и поздно вечером

Трудно себе представить леса и равнины, величавые горы, да и всю нашу жизнь без снега, без его очарования. Он, пушистый, искрящийся, кипенный, дарит нам радость, учит прекрасному с самого детства.

Однажды было сказано, что в каждой капле дождя отражается весь мир. В каждой снежинке предстают перед нами красота и гармония природы.

Снег - чудеснейшая особенность нашей планеты. Он образуется на всех континентах в огромных количествах. Ежегодно снегом покрывается до 130 миллионов квадратных километров - четвертая часть всей поверхности Земли вместе с океанами.

Восьмая часть покрываемой снегом территории приходится на ледники, в том числе на ледяные щиты Антарктиды и Гренландии. Снег, отлагающийся там, почти полностью расходуется на питание ледников, постепенно превращаясь в лед и обновляя таким образом тела ледяных гигантов.

Треть заснеженной территории планеты составляют морские льды в Арктическом и Антарктическом бассейнах. Снежное укрытие есть одно из главных условий существования паковых (Пак - толстый и плотный многолетний лед в полярных водах) льдов.

Свободную от ледяного панциря сушу покрывает половина Снежной Мантии. При ее таянии увлажняется почва, рождаются родники, возникают речные половодья.

Всем известно, что снег образуется не на земной поверхности, он - детище высоких слоев атмосферы. Облака состоят из мелких снежинок и переохлажденных капель воды, и поэтому даже дожди, жидкие осадки могут иметь своим прямым предшественником атмосферный снег.

В круговороте влаги на планете Земля, от которого, зависит существование всего живого, снег играет решающую роль. Без него безвозвратно нарушилось бы существующее устойчивое состояние ледников и большая часть суши превратилась бы в безводную и безжизненную пустыню.

Можно предполагать, что столь распространенный в природе материал достаточно хорошо изучен и свойства его общеизвестны. У многих термин снеговедение вызывает скептическую улыбку: ну что нового можно найти в снеге? Какие тайны он еще хранит в наш атомный и космический век?

Тридцать лет тому назад, начиная весьма неохотно по настоятельному требованию моего учителя профессора В. Е. Еврейскова изучение снежных заносов на сибирских железных дорогах, я тоже думал, что снег - предмет заурядный, недостойный серьезного внимания инженера. Но уже первые шаги показали, что Еврейсков был прав, что я неожиданно для себя вступил в неизведанное царство, на нехоженные тропы познания. Приведу небольшой пример из своих блужданий по одной из таких, казалось бы ясных, троп.

Тогда много говорилось и писалось о возможности переноса на большой высоте масс метелевого снега через железнодорожные пути, станции и даже через поселки. Предполагалось, что снежинки дробятся при взаимных столкновениях в мелкую пыль и эта пыль способна переноситься ветром на большие расстояния и высоко над земной поверхностью. Я разделял это мнение, но экспериментально оно никем не подтверждалось. Надо было как-то изучить процесс дробления снежинок.

Посоветовавшись с геологом П. Д. Долгих, мы решили применить для этой цели геологический ситовой комплект с механическим просеивателем РФ-1. По нашему предположению, после длительного сотрясения в ситовом комплекте снег должен был дробиться, менять свою структуру, гранулометрический состав благодаря увеличению доли мелких фракций.

Тайно, чтобы никто не смеялся над нами, начали сеять снег в маленьком сарайчике. Сеять снег - какое смешное занятие для практического инженера. Мы надеялись управиться быстро, руководствуясь известными инструкциями по определению гранулометрического состава грунтов, Вскоре убедились, что

эти инструкции для снега непригодны. Надо было научиться просеивать снег! Это оказалось канительным занятием. Для разработки одной лишь методики достоверного гранулометрического анализа снега потребовалось несколько зимних месяцев.

Впоследствии оказалось, что мы первыми начали измерять гранулометрический состав снега ситовым способом. Никто до нас этого не делал. Выдающийся швейцарский снеговод Марсель де-Кэрвен, исследуя структуру снега, применил в 1948 году (тоже впервые!) иной способ - отмучивание снежинок в охлажденном керосине. Он пришел к выводам, сходным с нашими, однако ситовой способ удобнее и надежнее.

Но, увы, цель наших непредвиденно долгих экспериментальных исканий не была достигнута. Снежные кристаллики отличались необычайной прочностью и не хотели дробиться. Более того, после длительного просеивания снежной пробы ее солидная часть куда-то таинственно исчезала.

Долго ломали мы головы в поисках причин пропажи снега. Все пути механических потерь его были перекрыты. Куда же он девается? Уж не испаряется ли?

И, как убедились позднее, при просеивании действительно происходило усиленное испарение разделенных, диспергированных снежных частиц. Это сразу натолкнуло на мысль, что при метелевом переносе снега значительная его часть испаряется, минуя жидкую фазу. Такой переход от твердого состояния к газообразному называется возгонкой. На этой основе через несколько лет возникло новое объяснение причин иссушения северных и сибирских степей после их распахки, когда снежный покров становился легкой добычей ветра.

Аппетит приходит во время еды! Мы с П. Д. Долгих мерзли часами возле тарахтящего просеивателя. Моя судьба решилась здесь: отсюда, от крохотного дровяного сарайчика начался путь убежденного исследователя. Именно тогда изменилось мое отношение к снегу как к достойному предмету серьезных теоретических и прикладных изысканий.

Долгое время какой-то признанной науки о снеге не существовало. Ни его роль в формировании климата, ни законы его распределения в равнинах и в горах не были предметом пристального внимания исследователей. С незапамятных времен снег не изучали, его только описывали.

СВИДЕТЕЛЬСТВА ИСТОРИИ

Древние обитатели теплого Средиземноморья почти не знали, что такое снег, и в их письменных источниках он долго не упоминался. Впервые снег вошел в историю как фактор, достойный внимания, после дерзкого броска армии Ганнибала через Альпы. Полибий, так писал о роковом для Ганнибала дне 7 ноября 218 года до нашей эры: "Приближался заход Плеяд, и вершины Альп покрывались уже снегом... Вследствие трудностей пути и снега Ганнибал потерял почти столько же людей, как и при подъеме на горы... И лишь только они подошли к узкому месту, по которому не могли пройти ни слоны, ни выючные животные, ибо обрыв, крутой и до того,... стал еще круче после новой (снежной) лавины, войско снова упало духом и трепетало от страха".

Изучением свойств снега и льда в древности почти никто не занимался, за исключением римского ученого-энциклопедиста Гая Секунда Плиния Старшего, который в главе третьей 31-го тома своей 37-томной "Естественной истории" впервые кратко описал не только внешние признаки льда (не снега!), но и указал на уменьшение со временем размеров ледяных кусков без их видимого таяния. Снег же не интересовал исследователей вплоть до начала XIX столетия.

В 1814-1816 гг. выдающийся русский физик и электротехник академик Петербургской Академии наук Василий Владимирович Петров заинтересовался физическими свойствами снега. Именно ему принадлежит открытие возгонки, или сублимации, снега. Академик Петров по праву считается зачинателем физического снеговедения. Сформулированные им экспериментальные законы сублимации снега и льда необычайно точны. Они полностью подтверждены в настоящее время.

В Японии, почти одновременно с В. В. Петровым снегом заинтересовался Дой-Тошицура, выполнивший очень много скрупулезно строгих зарисовок снежных кристаллов под микроскопом. Что его побудило к этому занятию, которому он посвятил всю свою жизнь, неизвестно. До Дой-Тошицуры многие исследователи зарисовывали снежинки, но их рисунки были малоправдоподобными или, в лучшем случае, неточными. Подробный обзор их работ можно найти в обстоятельной монографии А. Д. Заморского. Дой-Тошицура считается первым японским снеговедом. Его альбом, ставший библиографической редкостью, хранится в Зале почета Института низких температур Хоккайдского университета.

Работы В. В. Петрова и Дой-Тошицуры долгое время оставались забытыми. После них физическое снеговедение не развивалось в течение ста лет. Климатологические разделы снеговедения были созданы великим русским климатологом Александром Ивановичем Воейковым в конце XIX столетия. Он добился введения обязательных снегомерных наблюдений на всех русских метеорологических станциях, начиная с 1890 года.

Но все это были отдельные, местные прорывы в мир снежных проблем.

СНЕГОВЕДЕНИЕ - ВЕТЬ ГЛЯЦИОЛОГИИ

Снег - один из видов природных льдов Земли. К ним относятся, кроме снега, ледники, ледяной покров озер, реки морей, шуга, подземные льды, наледи, изморозь, иней, град, ледяные включения в мерзлых грунтах. Паука о природных льдах называется гляциологией от латинского слова "гляциес", означающего холод, лед. Долгое время гляциология считалась чисто описательной наукой о ледниках, и только о ледниках. В шестидесятых годах среди гляциологов СССР разгорелась дискуссия о том, считать или не считать снег и снежный покров предметом гляциологии.

В настоящее время снеговедение "вторглось в гляциологию всерьез и навсегда. Теперь не только в СССР, но и во всем мире гляциология считается наукой, изучающей все виды природных льдов, в том числе и снег.

Сама гляциология как новая наука превращается из описательно-географической в количественную, физическую науку. Такой же представляется и ее ветвь - снеговедение, или хионология (От слова "хионос" (греч.) - снег). В становлении и развитии снеговедения неоценимы заслуги выдающегося физико-географа профессора Гавриила Дмитриевича Рихтера. В 1965 году им опубликован первый в мире "Словарь основных терминов и понятий по снеговедению", где снеговедение понимается как "часть гляциологии, посвященная всестороннему изучению снега и снежного покрова".

Г. Д. Рихтер поистине всколыхнул "снежную целину". Он провел в послевоенное время несколько координационных снеговедческих совещаний с широким Представительством ранее работавших разрозненно специалистов различных ведомств.

В настоящее время координация всех отечественных исследований по снеговедению сосредоточена в Секции гляциологии Междуведомственного Геофизического комитета при Президиуме Академии наук СССР. Она продолжает дело, начатое Г. Д. Рихтером и его школой.

СНЕГ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПЕРИОДЫ

Даже чистое ледниковедение немыслимо без изучения снежного покрова. Все виды природных льдов так тесно связаны друг с другом, что детальное исследование одного вида без других невозможно. Обратимся к отдаленному прошлому. Не всем известно, что именно снег был главным виновником великих оледенений, полностью менявших лицо нашей планеты и судьбы ее обитателей.

Причины образования и чередования великих оледенений еще во многом неясны. Непонятно, какой климатический "спусковой механизм" побуждал мириады снежинок к старательному сооружению

громадных ледяных крепостей в горах и на равнинах. Существует множество теорий ледниковых периодов, и из них нет ни одной общепризнанной. Чаще всего развитие оледенений связывают с понижением температуры поверхности Земли. Но похолодание - лишь один из многих факторов, способствующих оледенению.

В настоящее время наука располагает впечатляющими сведениями об истории великих оледенений. Отчетливые и вполне достоверные следы древнейших оледенений Земли, найденные в Канаде и Южной Африке, соответствуют событиям, происходившим 1,7-2,6 миллиарда лет тому назад. Признаки оледенений давностью около 200 миллионов лет обнаружены в Южной Америке, Африке, Индии и Австралии. Эти части суши тогда составляли протоконтинент Гондвану с высочайшими горными системами.

Лучше всего изучены следы грандиозных оледенений четвертичного периода (плейстоцена), называемого еще антропогеновым периодом, так как именно в этот период, длившийся около трех миллионов лет, появился и сформировался человек как вид класса млекопитающих. Плейстоцену предшествовали десятки миллионов лет очень теплого, "райского" климата, по-видимому, вплоть до более древних гондванских оледенений.

Антропогеновый период был самым суровым в истории Земли. Число плейстоценовых циклов оледенение - потепление определяется разными исследователями от 4 до 17. По А. И. Москвитину, их было восемь (рис. 1).

Необходимость приспособления к суровым климатическим условиям сыграла немалую роль в становлении *Homo sapiens* (Человека разумного).

Примерно два с половиной миллиона лет тому назад колоссальные ледники Окского оледенения толщиной 2-3 км двинулись впервые после "райских времен" из Арктики в умеренные широты. По хронологии А. И. Москвитина, Земля испытала с тех пор еще семь таких же грозных нашествий (гляциалов), разделявшихся кратковременными межледниковьями (интергляциалами) по 20-25 тысяч лет каждое. На долю теплых межледниковый четвертичного периода пришлось не более 10% всего времени.

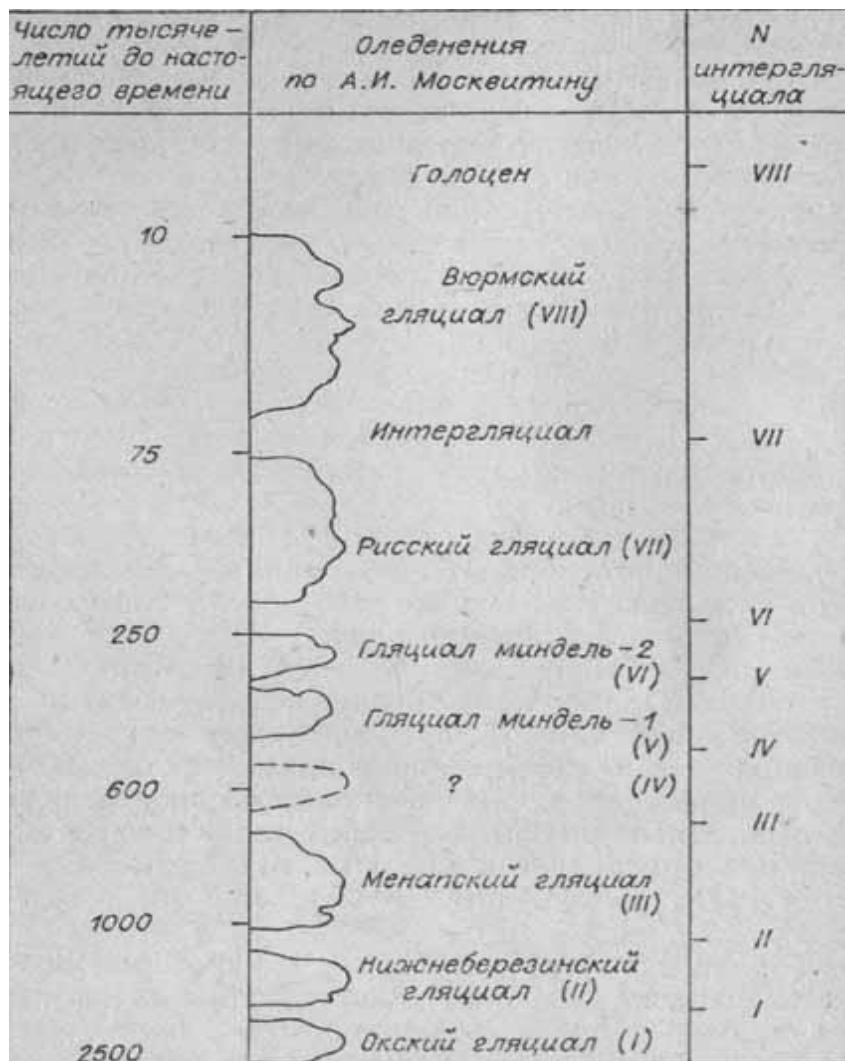


Рис. 1. Ледовый режим антропогенного (четвертичного) периода.

Ледники живут долго и отступают неохотно. Последний, Вюрмский, гляциал длился более 60 тысяч лет, а предпоследнее, Рисское оледенение продержалось в два раза дольше. Материковые ледники Северного полушария были намного обширнее, чем современный антарктический щит. На их образование расходовались огромные массы воды из Мирового океана. Уровень морей снижался на 80-120 м, обнажая прибрежное дно. На месте Берингова пролива простиралась отмель, послужившая мостом для древнейших переселенцев из Евразии в Америку.

Мы живем в середине или в конце последнего, восьмого, интергляциала. Подавляющая часть покровных ледников Северного полушария отступила и исчезла примерно 7-10 тысяч лет тому назад. Новый длинный ледниковый период может начаться через несколько сотен или тысяч лет, если техногенные климатические изменения не отдалят или, наоборот, не ускорят его наступление.

Установлено, что ледниковые массы создаются и поддерживаются снегопадами, а снег имеет атмосферное происхождение.

Что же нужно для рождения ледника?

Каждый ледник при формировании проходит три стадии: атмосферный снег - снежник - ледник. Главное условие создания ледника - неисчезающий снежник, живущий в течение многих лет. Снежником называется скопление снега, чаще всего навешанное ветрами и существующее в течение части или всего теплого времени года после того, как окружающий снежный покров уже всюду исчез, стаял.

Снежник теряет свою массу за счет таяния и испарения. Масштабы поверхностного испарения снежника малы в сравнении с таянием. Для таяния одного квадратного метра плоского снежника толщиной H (м) и

средней массовой плотностью ρ (кг/м³) (Массовой плотностью вещества называется его масса, содержащаяся в единице объема) потребуется тепла $L_n H \rho$ (Дж/м²), где L_n - скрытая теплота плавления снега (Дж/кг). Если G - средний за период таяния приток тепла Дж/м²с), то полное время таяния снежника T (с) найдем по простой формуле

$$T = (L_n H \rho) / G.$$

Следовательно, время таяния снежника прямо пропорционально его первоначальной толщине и средней плотности и обратно пропорционально среднему притоку тепла за период таяния. Чем больше выпадает снега и чем меньше приток тепла к снежнику, тем вероятнее его сохранение к следующей зиме.

Таким образом, одного лишь снижения притока тепла, вызванного общим похолоданием, может оказаться недостаточно для роста снежника. Нужны снегопады и благоприятные условия метелевого снегонакопления.

При резком усилении снегопадов снежник переживет лето даже при неизменном тепловом и ветровом режиме. Что-то подобное может, например, получиться на берегах Арктического бассейна, если ликвидировать плавучие паковые льды, увеличив тем самым интенсивность испарения со свободной поверхности Северного Ледовитого океана.

Советский специалист, моряк Е. С. Гернет в 1930 году впервые выдвинул гипотезу цикличности плейстоценовых оледенений, связав их со снежно-ледовой обстановкой на Земном шаре. Через четверть века аналогичная гипотеза опубликована американскими геологами В. Л. Стоксом, М. Юингом и В. Донном.

Согласно их гипотезе, разделяемой одним из крупнейших гляциологов членом-корреспондентом АН СССР Б. М. Котляковым, Северный Ледовитый океан оттаивал, если в его воды проникали теплые течения Атлантического и Тихого океанов. Атмосфера увлажнялась, это вызывало обильные снегопады и бураны. Снежники возвышенностей не успевали стаять за лето. Свежие снега откладывались на старогодние слои, уплотнявшиеся до состояния льда.

Оледенение Северного полушария началось с Гренландии. Этому, по-видимому, способствовало планетарное похолодание, вызванное Антарктидой. Образовавшийся ледник вырос в высоту до 2-4 км, расплзаясь в стороны и постоянно обновляясь новыми снегопадами. Он рос бы и выше, но, став заоблачным, лишился источников питания.

Ледник, дитя снегопадов и метелей, вызванных климатическими метаморфозами, сам становился могущественным климатоформирующим фактором, далеко распространяя свое холодное дыхание и образуя все новые и новые "дочерние" ледники. Е. С. Гернет образно назвал их "ледяными лишаями".

Вокруг Северного Ледовитого океана постепенно создавалось таким образом колоссальное, разорванное только в Сибири ледяное ожерелье шириной в тысячи километров, а уровень морей, в свою очередь, понижался за счет ледников на 90-100 м. На пути теплых течений образовывались перешейки и отмели. Изолированный ими от теплых течений Северный Ледовитый океан замерзал, влажность воздуха уменьшалась, снегопады убывали. Ледники, лишенные снежного питания, становились тоньше, таяли, сбрасывали айсберги в море, за счет чего уровень моря повышался. Теплые течения снова прорывались на север, и цикл начинался заново.

Заметим, что нужна гигантская тепловая энергия, чтобы испарить в атмосферу океаническую влагу - примерно 2500 кДж на один литр. При кристаллизации облачных снежинок, крошечных строителей ледников, лишь часть этой энергии идет на подогрев атмосферы и поверхности Земли. Часть ее излучается безвозвратно в космос.

Механизм великих оледенений очень сложен, но человечество должно научиться управлять им. Нельзя позволить стихиям открыть дорогу новому гляциалу, который своей ледяной поступью может придавить

цивилизацию на сотни тысяч лет. Снеговедению должно принадлежать решающее слово при разработке глобальных проектов предотвращения этой опасности.

Е. С. Гернет - автор первой попытки создания одного из таких проектов. Он предложил уничтожить Гренландский ледник, или, как его иногда называют "Гренландский щит", этот "спусковой крючок" гляциалов Севера, очаг возможного в будущем распространения "ледяных лишаев" по Северному полушарию.

Сейчас Гренландский щит сбалансирован. Ежегодный приход массы снега здесь около 500 Гт (одна гигатонна равна 10⁹ т). Испаряется и тает примерно 300 Гт/год. Убыль путем откола айсбергов около 200 Гт/год. Приходная и расходная части баланса составляют всего лишь 0,02% сосредоточенного там льда. Если лишить ледник снежного питания и ежегодно убирать снег, выпадающий на его поверхности, то баланс ледниковой массы резко нарушится, и примерно через 2000 лет Гренландский щит полностью исчезнет.

Последствия этого события не ограничатся лишь устранением опасности нового гляциала. В Заполярье резко потеплеет, Северный Ледовитый океан освободится от паковых льдов, и на его берега вернется климат, существовавший 10 млн. лет назад, когда там царила богатейшая растительность. Правда, придется бороться с заболачиванием Арктики после таяния вечной мерзлоты и ограждать дамбами густонаселенные берега морей, так как уровень Мирового океана поднимется на 9 м, но все это не выходит за пределы технических возможностей человечества.

Е. С. Гернет предложил использовать для уборки гренландского снега специальные "снеговые танки", которые собирали бы его в свои "трюмы" и сбрасывали затем на побережье. Для уборки снега с ледника площадью 1,7 млн км² потребовались бы сотни миллионов "танков", что нереально. Более приемлемо зачернение снега золой или другими материалами. Тогда ускорится таяние и испарение снега и льда под лучами Солнца. При трехразовом зачернении ледника в год потребуется 50-100 млн. т. угольной пыли и золы. Это количество не покажется чрезмерным, если его сравнить с мировой добычей угля, составившей к 1981 году около 4 млрд. т/год.

Как мы видим, человечество уже теперь способно, управляя снежным покровом, повлиять на ход даже таких событий, как планетарное оледенение.

ИНЖЕНЕРНОЕ СНЕГОВЕДЕНИЕ

Пусть у читателя не сложится впечатление, что снеговедение имеет объектом изучения только глобальные проблемы. У снеговедения масса "сиюминутных" земных дел, о чем в основном и повествуется в этой книге.

Если есть общая наука, то должна существовать ее прикладная часть, определяющая ее "выход" в практику. В шестидесятые годы возникла инженерная гляциология и, разумеется, ее существенная часть - инженерное снеговедение (Этот термин впервые введен профессором Д. М. Мелышковым). Технические науки порождаются техническим опытом. Опыт борьбы со снегом на железных дорогах насчитывает 150 лет, но это не значит, что таков возраст инженерного снеговедения. Наука не может существовать без теоретического ядра, а оно начало формироваться в снеговедении лишь в нашем столетии. И прикладные задачи снеговедения вовсе не ограничиваются борьбой со снегом на дорогах.

Чем шире освоение восточных территорий СССР, той обширнее круг задач инженерного снеговедения. Например, в зоне влияния Байкало-Амурской магистрали, проходящей преимущественно в районах Забайкальской горной страны, строители встречаются с лавинами, горными снежными заносами, особо интенсивными снегопадами. В северной части трассы Сургут - Уренгой в течение девяти месяцев в году "работают" метели, достигающие неслыханной интенсивности. Природные, гляциальные процессы по своей значимости и размаху здесь существенно отличаются от сходных явлений, наблюдаемых в хорошо изученных областях СССР. При проектировании, постройке и эксплуатации инженерных сооружений в

суровых физико-географических условиях жизненно необходим строжайший учет всего комплекса прямых и обратных связей между сооружениями и природной средой.

На осваиваемых восточных территориях природа сурова не только к людям, но и к любым проявлениям жизни. Животный и растительный миры здесь очень чувствительны к техногенным изменениям ландшафта. Например, если будет уничтожена растительность, задерживающая снег, то метели снимут снежный покров, обнажив грунт. Неминуемо погибнут животные, зимующие в снегу: зайцы, лисы, лемминги и другие. К сожалению, инженерная экология пока еще переживает зародышевую стадию, а гляциологические аспекты охраны природы вообще не изучены и хуже всего отражены в технических проектах инженерных сооружений.

Разработка инженерно-гляциологического раздела прикладной экологии - инженерной гляциоэкологии - главная задача инженерной гляциологии и инженерного снеговедения. Гляциологи должны вооружить инженеров методами прогноза влияния льда и снега на возводимые постройки, а также поведения природных льдов, в том числе снега, под влиянием сооружений. Без этого невозможно обеспечить в северных районах гармоничное слияние инженерных сооружений с природной средой.

ГЛАВА ВТОРАЯ НЕОБЫЧНЫЕ СВОЙСТВА СНЕГА

Я подолгу оставался среди облаков... Художественный узор снежинок складывался на моих глазах из вздрагивающей сырости.

А. Грин. Состязание в Лиссе

Снег поразительно изменчив. Такие привычные физические свойства, как плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость, влажность, диэлектрическая постоянная, скорость распространения звука и т. д., для снега принципиально не могут длительно сохраняться, быть неизменными. Меняется, трансформируется решительно все, вплоть до структуры, формы и размеров снежинок, их связности. Достаточно сказать, что плотность снега способна изменяться от 0,01 до 0,7 г/см³, причем верхний предел соответствует тому состоянию снега, когда мы еще вправе его называть снегом. При дальнейшем увеличении плотности снег превращается в лед, в корне отличающийся по свойствам от своего предшественника.

Чем же объяснить причуды и непостоянство Снежной Королевы? Тем, что колыбель жизни на Земле - вода - существует в уникальных условиях, совсем близко от так называемой тройной точки фазовых переходов, различной для разных веществ.

Под фазовыми переходами подразумевают переходы вещества из газообразного состояния (фазы) в жидкость, затем превращение его в твердое тело. В системе координат, по абсциссе которой откладывается температуры, а по ординате - давления, существует точка, соответствующая состоянию вещества во всех трех фазах, т.е. в газообразном, жидком или твердом виде. Это - тройная точка для данного вещества. Например, тройная точка гелия соответствует давлению 25 атм. и температуре, всего на 18°С превышающей абсолютный нуль (-273,15°С). В земных условиях гелий - устойчивый газ. Тройная же точка воды попадает в область обычных земных температур и давлений.

На диаграмме фазовых состояний атмосферной влаги (рис. 2) по оси ординат отложены давления насыщенного пара в воздухе в миллибарах (мбар) или гектопаскалях (гПа). Эти давления называют частичными, или парциальными, так как они - лишь часть атмосферного давления, обусловленная паром.

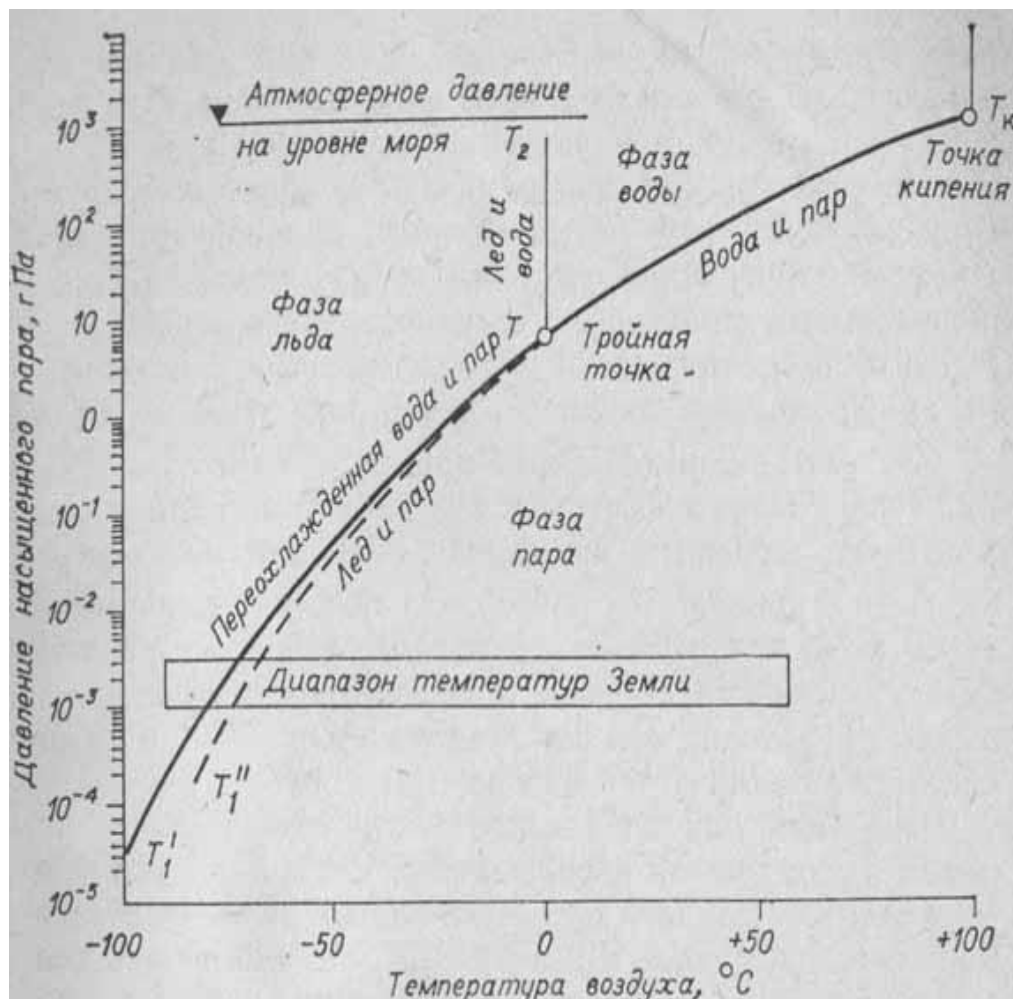


Рис. 2. Диаграмма фазовых состояний атмосферной воды.

Воздух бывает сухим, влажным или переувлажненным. Парциальное давление пара в сухом воздухе равно нулю. Во влажном воздухе влага остается в парообразном состоянии, если давление пара меньше предела насыщения, зависящего от температуры воздуха. Если предел насыщения паром достигнут, начинаются переходы из фазы пара в фазы воды или льда. При давлении насыщенного пара 6,1 мбар, температуре 0°C и общем атмосферном давлении 1013 мбар равновероятно существование всех трех фаз воды. Таково удивительное свойство тройной точки воды. Это точка глубоких качественных метаморфоз. Приближаясь к ней, вода в любой фазе начинает как бы "готовиться" к подобным метаморфозам тем активнее, чем ближе тройная точка.

На рис. 2 переход через кривые ТТ₁', ТТ₁'', ТТ₂, ТТ_к тоже связан с фазовыми превращениями, но в них участвуют только по две фазы. Очень интересен переход через кривую ТТ₁''. Переохлажденная вода редко встречается в природных условиях, так что при температурах ниже 0°C фазовые переходы между паром и льдом происходят, минуя жидкую фазу. Так в атмосфере кристаллизуется и испаряется снег.

Вода имеет еще одну критическую точку - точку кипения Т_к (см. рис. 2). При давлении 1013 мбар и температуре 100°C она закипает и не может далее существовать в жидкой фазе. Давление насыщенного пара становится равным полному атмосферному давлению.

Диапазон температур поверхности Земли, показанный на рис. 2, далек от точки Т_к, но включает в себя тройную точку Т, точку вечного беспокойства, изменчивости и непостоянства.

Весь великий круговорот воды на Земле, бег облачных армад, гул водопадов, грозная краса океанов, буйство пург, величавое спокойствие ледников своим существованием обязаны тому, что наш мир живет в рассмотренном узком диапазоне температур и давлений. В конечном счете, этому обязано и появление самой жизни на Земле.

Снежное царство - сложный мир. Сложность не только в близости снега к тройной точке фазовых переходов, но и в том, что снег - неоднородная среда, состоящая из льда, пор, наполненных воздухом и водяным паром, примесей различного происхождения и талой влаги. Снежная метель - явно двухфазный поток, состоящий из несущего воздушного потока и несомой твердой взвеси - снежинок.

Попытки теоретического изучения свойств снега с помощью упрощенных моделей однородной однофазной среды были, как правило, неудачными. В настоящее время для изучения снега, льда и снежоледовых явлений (питание ледников) используются такие разделы современной физики, как механика сплошных многокомпонентных сред, статистическая физика, аэрогидромеханика, теплофизика, электродинамика. В современном теоретическом снеговедении, как и в гляциологии в целом, широко применяется тензорное исчисление.

ТЕПЛОФИЗИКА СНЕГА. ЕГО ИСПАРЕНИЕ

В снежном покрове постоянно происходят весьма сложные процессы переноса массы и тепла. Особенно интересны процессы испарения и кристаллизации. Проще их описать на примере отдельной снежинки.

Найдем интенсивность испарения ледяного шара (сферы) радиуса r . Под интенсивностью испарения подразумевается переход в пар массы льда (g) за единицу времени (s), отнесенный к единице площади испаряющейся поверхности (m^2). Используя диффузионную теорию Д. Максвелла, найдем для ледяного шарика:

$$I = D \frac{1}{r} (e_n - e_\infty),$$

где D - коэффициент диффузии водяного пара (m^2/s); e_n - содержание массы насыщенного пара в воздухе (g/m^3); e_∞ - фактическая влажность воздушной среды (g/m^3). Концентрация пара e (g/m^3) легко выражается через уже знакомое нам парциальное давление пара p :

$$e = (216/T)p,$$

где T - абсолютная температура испаряющейся поверхности в градусах Кельвина.

Разность $(e_n - e_\infty)$ называют дефицитом влажности воздуха. Если воздух насыщен водяным паром, испарения не будет. При перенасыщении воздуха паром $(e_n - e_\infty) < 0$ и $I < 0$, и тогда происходит не испарение, а рост ледяного шара. Этот вывод приложим и к снежинкам - ледяным кристаллам сложной формы.

Мелкие ледяные и жидкие частицы испаряются при дефиците влажности воздуха поразительно быстро. Нетрудно показать, что время полного испарения ледяного шара, имеющего форму сферы, будет равно

$$t = \rho_c r^2 / 2D(e_n - e_\infty),$$

где ρ_c - плотность массы льда. Следовательно, время полного испарения ледяного шарика пропорционально квадрату его радиуса. Частица радиусом 0,1 мм исчезнет в 100 раз быстрее частицы радиусом 1 мм при одном и том же дефиците влажности воздуха.

Опытные данные подтверждают сказанное. Чем меньше становится снежинка, тем быстрее она испаряется. Чем выше температура среды, тем испарение интенсивнее.

Испарение требует значительных затрат тепла - 1570 кДж на 1 кг массы снега при температуре 0°C и по 4,2 кДж/кг на каждый градус ниже нуля; используется тепло самих снежинок и воздушной среды, так что охлаждаются обе фазы, если одновременно нет кристаллизации, сопровождающейся выделением тепла.

Срок жизни свободно парящей снежинки составляет десятки минут. Пусть снежный облачный слой находится на высоте 2 км над поверхностью земли. Средняя скорость падения снежинок равна 1 м/с. Значит, от облака до земли снежинка падает в течение 2000 с, или 33 мин. При низкой температуре снег успевает упасть на землю и образовать снежный покров. При высокой температуре и большом дефиците влажности воздуха снежинки испарятся, не достигнув земли, и в таком случае "тучи есть, а снега нет". В горах расстояние от облаков до земли значительно меньше, чем на равнинах. Это одна из главных причин того, что в горных районах снега выпадает намного больше, чем в равнинных.

Испарение с плоской поверхности снежного покрова очень мало. Снег интенсивно испаряется тогда, когда он раздроблен, диспергирован в атмосфере или разделен на отдельные куски, окруженные воздушной средой.

В 1957 году М. М. Михайлов, изучая снежный покров в дубравах Чувашской АССР, обнаружил наибольшие запасы снеговой влаги не в самом лесу, а на маленьких полянах площадью не более 0,16 га. Г. В. Грудинин недавно исследовал это странное обстоятельство в лесах Минусинской котловины. В лесу с сомкнутыми кронами к концу зимы было заметно меньше снега, чем на находящихся рядом открытых полянах. Оказалось, что снег, задерживаемый кронами и обдуваемый со всех сторон, испарялся во много раз быстрее, чем снежный покров на земле, в строгом соответствии с теорией.

Бывают ли в природе другие случаи, когда снег рассеивается, диспергируется в воздухе наподобие сахара, размешиваемого ложкой в чае? Самый типичный и общеизвестный феномен такого рода - метель! Но это тема следующей главы.

ЧУДО МЕТАМОРФИЗМА

До сих пор мы говорили об отдельных снежных частицах. Снег же есть совокупность очень многих частиц, взаимодействующих друг с другом. Испаряются снежинки, летящие в воздухе и лежащие как на поверхности, так и внутри снежного покрова. Мелкие частицы снега испаряются быстрее крупных, но в снежном покрове воздушные поры невелики, так что при испарении мелких снежинок поры настолько быстро насыщаются влагой, что начинается обратная кристаллизация из пара. Процесс протекает односторонне - растут только крупные частицы, то есть вещество как бы перегоняется с мелких снежинок на крупные. Это явление напоминает жизнь бактерий: крупные бактерии пожирают мелкие и растут за их счет.

Чем тоньше ледяное образование и чем больше кривизна его поверхности, тем быстрее оно испаряется. Время исчезновения выпуклостей и выступов ледяных частиц сложной формы тоже приблизительно пропорционально квадрату радиуса их кривизны. На вогнутых поверхностях события развиваются иначе. Кривизна их обратная, и испарение заменяется кристаллизацией. Пар, "стекая" с кончиков лучей снежных звездочек, кристаллизуется в их углублениях. Ядра звезд становятся крупнее и массивнее. Кристаллы меняют свою форму.

Кристаллизуется пар и в местах пересечений лучей разных снежинок-звезд. Звезды смерзаются. Между снежинками образуются все более и более прочные связи, снег, как говорят, твердеет.

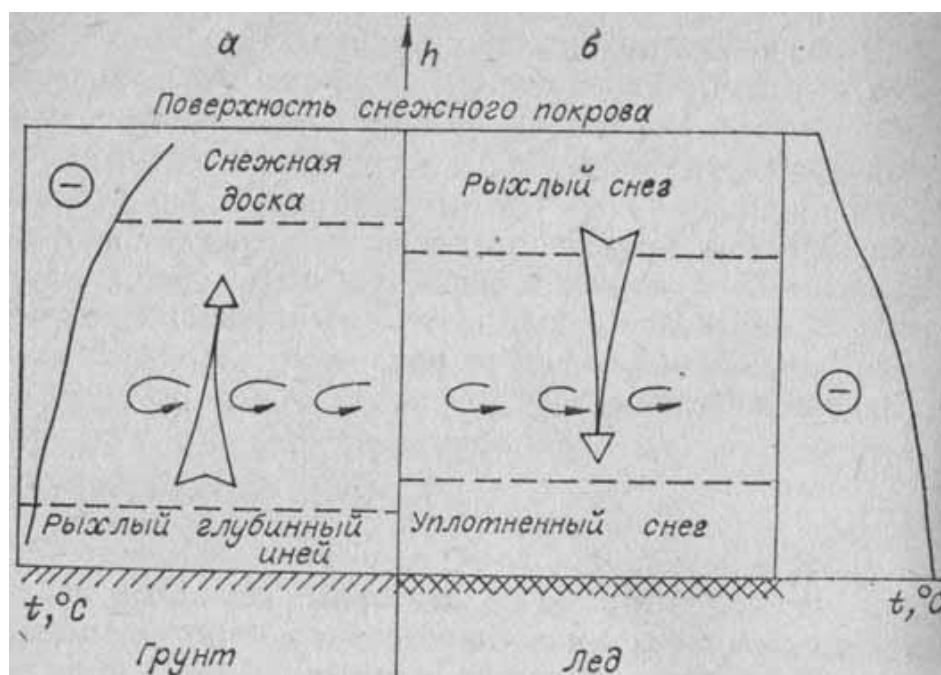


Рис. 3. Миграция пара в снежном покрове: а - при понижении температуры от подстилающей поверхности до внешних слоев снежного покрова (снизу вверх); б - при повышении температуры в том же направлении.

Пути перекачки пара в снежном покрове проходят вдоль его горизонтальных слоев и поперек их, как показано на схеме (рис. 3). Многое зависит от изменения температуры в толще снежного покрова. Обычно в нижних слоях, прилегающих к грунту, температура зимой выше, чем на дневной поверхности (см. рис. 3, слева). Мы уже знаем, что давление пара, насыщающего воздух, тем ниже, чем выше температура воздуха (см. рис. 2). Поэтому пар в таком случае устремляется снизу вверх. Низ снежного покрова разрыхляется и образуется глубоинный иней, а вверху, где кристаллизуется поступающий снизу пар, возникает уплотненный слой, называемый часто снежной доской. Эта доска хорошо выдерживает лыжника, а при сильном морозе и пешехода.

Первые исследователи Антарктиды встретились с неожиданной и неприятной особенностью антарктического снега. Его податливость и рыхлость сильно затрудняла движение лыжников и особенно взлет и посадку самолетов. Трудности антарктических лыжных переходов - одна из основных причин трагической гибели экспедиции Роберта Скотта к Южному Полюсу в 1912 году. На антарктическом леднике, как, впрочем, и на других, температура поверхности снега, как правило, выше его глубинных температур, и пар переносится сверху вниз - верхние слои разрыхляются, нижние уплотняются (рис. 3, справа). Уплотнение, фирнизация нижележащего снега происходит в этом случае как за счет давления верхних слоев, так и переноса массы и тепла. Характер послойного горизонтального переноса массы в обоих случаях а и б (см. рис. 3) один и тот же: лед перегоняется с мелких частиц на крупные.

Фирнизация - превращение обычного снега в фирн, то есть плотную среду, состоящую из ледяных комочков и зерен, ничего общего не имеющих с первоначальными кристаллами снега. Плотность фирна варьирует от 0,35 до 0,8 г/см³. Фирн образуется на ледниках, так как именно на них направления силы тяжести и внутриснежной миграции пара, как правило, совпадают. Эта принципиальная особенность метаморфизма ледникового снежного покрова стимулирует рост ледника. Фирн - закономерная переходная стадия между снегом и ледником. Фирн, постепенно уплотняясь, переходит в лед.

Со временем любой снежный покров полностью меняет свою структуру. Он становится более крупнозернистым. Радикально меняется форма зерен. Глубоинный иней, например, состоит из крупных пирамидальных кристаллов размером до 5-10 мм, совершенно не похожих на первоначальных атмосферных снежинок-красавиц. Появление глубоинного инея на горных склонах - грозный предвестник лавинной опасности.

Кристаллизация пара в углублениях и на пересечениях снежинок, на более крупных снежинках за счет испарения мелких, а также дальнейшие стадии метаморфизма снега - сложный и до сих пор еще в деталях не изученный процесс. Кристаллизация не происходит равномерными слоями и непрерывно во времени. Форма объемных приращений кристалла должна соответствовать, по принципу М. Кюри, минимуму свободной поверхностной энергии при данном объеме. Для капли воды это шар, для кристалла льда - шестигранник, шестигранный цилиндр и их сочетания. Динамический метаморфизм снега и льда подробно исследован профессором П. А. Шумским.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СНЕГА

Передача тепла в любой среде выполняется тремя основными способами: 1) теплопроводностью от нагретых областей к холодным без перемещения вещества, 2) конвекцией, или перемещением тепла вместе с веществом в порах среды, 3) излучением. В сплошных непрозрачных твердых телах тепло передается только первым способом, а в пористом и прозрачном снеге - всеми тремя. Кроме того, при нагревании или охлаждении снега в его толще происходят фазовые переходы, причем нагревание сопровождается испарением или таянием, охлаждающим среду, а охлаждение, наоборот, - замерзанием или конденсацией с выделением скрытой теплоты фазовых переходов.

Картина теплопередачи в снеге очень сложна и еще не исследована в полной мере. При опытных оценках теплопроводности и других теплофизических свойств снега обычно используют модель снега как сплошной непрозрачной однородной среды и применяют уравнение Фурье:

$$Q_T = -\lambda T(dT/dN),$$

где Q_T - поток тепла (Вт/м^2); T - температура; p - расстояние, отсчитываемое по направлению передачи тепла (м); λT - коэффициент теплопроводности (Вт/мК). Чем меньше коэффициент теплопроводности λT , тем лучше теплоизоляционные свойства тела.

Приведем значения λT для льда, снега и других известных теплоизоляторов:

Материал	Массовая плотность, г/см^3	λT , Вт/м.К
Дерево	0,209	
Асбест	0,126	
Войлок	0,0377	
Воздух 0,013	0,025	
Лед 0,100		2,302
Снег:		
плотный	0,50	0,712
обычный	0,25	0,176
свежевыпавший	0,10	0,0293

Низкая теплопроводность снега объясняется обилием в нем сложных и мелких воздушных пор. Чем больше плотность снега, тем выше его теплопроводность, так как частицы льда проводят тепло почти в 100 раз интенсивнее, чем воздушные промежутки между ними.

Снег оказывается одним из наиболее совершенных естественных теплоизоляторов. Он сильно сокращает потери тепла земной поверхностью излучением в атмосферу и в Космос, но зато отражает много радиационной тепловой энергии, получаемой извне.

РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СНЕГА

Очень своеобразны особенности теплообмена снега с окружающей средой, осуществляемого в форме лучистой энергии.

Снег поглощает и отражает солнечные лучи, то есть прямую солнечную радиацию. Но на поверхность снежного покрова попадает не вся радиация, непосредственно излучаемая Солнцем. Проходя атмосферу, она ослабляется и частично рассеивается капельками воды, пылью, газами воздуха. Некоторая доля рассеянной солнечной радиации возвращается в Космос, но заметная ее часть попадает на земную поверхность. Достигающие снега прямая и рассеянная радиации составляют полную, или суммарную, солнечную радиацию.

Солнечная радиация имеет широкий диапазон длин волн - от коротковолновых фиолетовых лучей до длинноволновых красных, включая ультрафиолетовую и инфракрасную части спектра.

Излучает не только Солнце, но и сама Земля и ее атмосфера, подчиняясь общему закону Стефана - Больцмана для излучения любых тел:.

$$Q_T = \sigma_T b_T T^4,$$

где Q_T - полный поток излучения тепла; T - абсолютная температура тела; σ_T - постоянная излучения абсолютно черного тела, полностью поглощающего любую радиацию, падающую на его поверхность; b_T - коэффициент относительной излучательной способности, характеризующий отклонение излучательной способности данной поверхности от свойств абсолютно черного тела, для которого $b_T = 1$.

Излучение атмосферы в поверхности Земли преимущественно "красное", длинноволновое. Снег поглощает и отражает все перечисленные виды радиации.

Однако снег не может только поглощать и отражать внешние потоки радиационной энергии, не излучая сам. Он в любых условиях, даже при жесточайших морозах, излучает длинноволновую инфракрасную радиацию, невидимую глазом.

Каков же коэффициент излучательной способности b_T для снега? Можно предполагать, что кипельно-белый снег очень далек по радиационным свойствам от черного тела и его $b_T \ll 1$. Многочисленные эксперименты в лабораторных и природных условиях дали парадоксальные результаты. Для только что выпавшего снега $b_T = 0,985 - 0,995$; для старого, "лежалого" крупнозернистого $b_T = 0,97 - 0,98$. Снег излучает почти точно так же, как абсолютно черное тело. Более того, снег в этом смысле наиболее "черен" по сравнению со всеми другими природными образованиями на поверхности Земли.

Интересно, что по своей излучательной способности Солнце тоже близко к абсолютно черному телу. Получается, что спящее Солнце и белейший снег предельно черны с позиций термодинамики излучения.

П. П. Кузьмин объясняет это свойство тем, что поверхность снежного покрова имеет огромное количество пор сложной формы с очень маленькими "выходами" на поверхность. Известно, что можно создать искусственную модель абсолютно черного тела в виде так называемого "черного поглотителя", взяв сосуд с небольшим входным отверстием. Через него лучи проникают и выходят, претерпевая множество отражений, намного ослабляющих их энергию. Например, раскрытые окна домов, малые в сравнении с размерами комнат, извне кажутся черными, независимо от цвета комнатных стен. Поры снежного покрова играют, по-видимому, роль таких черных поглотителей.

Коэффициент излучательной способности "стареющего" снежного покрова падает, так как уменьшается количество поровых отверстий, выходящих на поверхность. Сами отверстия становятся крупнее за счет укрупнения зерен снега и его фирнизации. "Окна" расширяются и "сереют". Долго пролежавший, тусклый и даже грязный снег оказывается "белее" свежеснежного!

Полнота поглощения снегом потока радиационной энергии зависит от прозрачности снега, от его светопропускаемости. По П. П. Кузьмину, солнечные лучи способны пронизывать снег на глубину до 30- 70 см в зависимости от его структуры, плотности, влажности и чистоты. Зимний сухой снежный покров глубиной 0,5 м и более можно считать практически непроницаемым для солнечной радиации. Мокрый весенний снег непроницаем для лучей при толщине 10- 30 см.

Коэффициент отражения солнечной радиации (альбедо снега), как правило, очень велик. Для плотного чистого снега он колеблется от 0,85 до 0,95, а в Арктике и Антарктиде альбедо снега достигает 0,98, т. е. почти вся энергия солнечной радиации, падающая на снег, им отражается и большей частью уходит безвозвратно в Космос. Это приводит к значительному охлаждению территории.

Снег отражает солнечные лучи не как зеркало, расположенное горизонтально, а как матовая поверхность, равномерно рассеивающая свет во все стороны. Это объясняется разнообразной ориентировкой множества поверхностных снежинок. Лишь не более 3% всех кристалликов случайно оказываются наклоненными почти горизонтально. Только они отражают лучи зеркально, вызывая всем знакомый эффект искристости снега: видны крупные блестки, отливающие иногда цветами радуги. Искристость снега в лунные ночи создает неизгладимое впечатление!

Всем известно, как тает снег в первые дни весны, когда температура воздуха еще ниже нуля, а солнце ощутимо греет. Таяние начинается не сверху, а в глубине снежного покрова под поверхностной прозрачной ледяной пленкой. Это явление называют "парниковым эффектом". Снег совершенно непрозрачен для лучей длинных волн красной части спектра. Он их почти полностью отражает. Зато коротковолновые лучи проходят сквозь тонкий поверхностный слой снега свободно. Этот слой становится своеобразным "ледяным стеклом", не пропускающим собственное длинноволновое излучение глубинных слоев и защищающим их тем самым от охлаждения. В Сибири этот механизм часто обеспечивает таяние и сток основной массы снега при отрицательных температурах воздуха. В горах "парниковый эффект" создает причудливые формы, напоминающие согбенные фигуры монахов - "кающиеся снега".

ТВЕРДЕНИЕ СНЕГА

В 1958 году под руководством автора был смонтирован первый аэродинамический капал для получения искусственной метели - маленький, длиной около 7 м и сечением 0,15 x 0,15 м². Подготовительные работы перед первым пуском канала затянулись до ночи. В канал насыпали снег слоем 3 см, тщательно проглажив его поверхность тяжелым металлическим листом. Среднюю скорость воздушного потока по сечению канала можно было доводить до 20 м/с.

Мы знали, что первые смещения снежинок вызываются приземным ветром со скоростью 2-3 м/с. Утром канал включили на эту скорость, но ни одна снежинка не стронулась с места. Стали постепенно увеличивать скорость ветра до максимума, но и при этом поверхность снега в канале не шелохнулась. Метель не получалась. В природных условиях такой сильный ветер выдирал бы весь снег до грунта.

Что произошло? Оказывается за ночь снег в канале затвердел. Проглаживание металлическими листами усилило его твердение, а под воздействием ветра, скорость которого постепенно увеличивалась, этот процесс завершился образованием прочной поверхностной корки, не поддающейся ветровому сносу.

Поверхность снега твердеет очень быстро. В дальнейшем мы рыхлили снег перед продувкой ситами. Время от завершения рыхления до продувки не должно было превышать 2-3 минут, иначе искусственная метель не начиналась.

До сих пор не найдены способы надежного определения твердости снега и не изобретены соответствующие измерительные приборы. Для определения твердости металлов, как известно, используется принцип вдавливания в металлическую поверхность более твердого шарика или конуса, предложенный английским инженером Бринелем. Этот принцип не годится для снега, твердость

которого варьирует в обширнейших пределах - от "твердости" эфемерного снежного пуха до твердости льда. Все попытки изготовления и применения приборов, построенных по принципу Бринеля, были неудачными. Отсутствие приборов вынудило даже такого авторитетного гляциолога, как профессора Л. Лыбурти, применять следующую классификацию твердости снега, определяемую воистину подручными способами:

Класс 1. Очень мягкий снег (проникают четыре пальца). Класс 2. Мягкий снег (проникает один палец). Класс 3. Твердый снег (проникает карандаш). Класс 4. Очень твердый снег (проникает нож). Среди гляциологов встречаются и богатыри-мужчины, и слабые женщины. Пальцы тоже бывают разные. Но для определения твердости снега пока нет ничего лучшего.

Свойство твердения снега играет важную роль в его распределении, сохранении и практическом использовании. К сожалению, изучено оно еще очень плохо.

РАЗНООБРАЗИЕ СНЕЖНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Слово кристалл происходит от древнегреческого слова кристаллос - лед. Древние греки не рисовали снежинки, но видели их.

Самое удивительное свойство снега - ошеломляющее количество форм снежных кристаллов. Единственная их общность - подчинение "закону шестигранности", или гексагональности. Были попытки построения "идеального кристалла льда" в соответствии с гипотетическим строением элементарной молекулярной кристаллической решетки, показанной на рис. 4,а. Именно так представляется гексагональный характер связей между атомами водорода (Н) и кислорода (О). О форме "идеального" кристалла льда можно получить представление по рис. 4, б (рисунок Н. И. Стулова из книги А. Д. Заморского). Но таких "идеальных кристаллов" нет ни на Земле, ни в атмосфере.

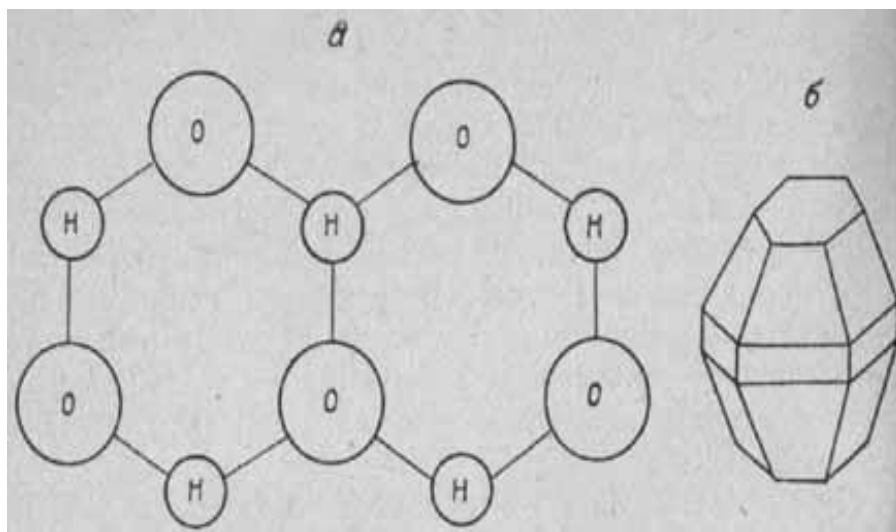


Рис. 4. Схема кристаллической решетки льда на молекулярном уровне (а) и форма гипотетического кристалла льда (б) по Н. И. Стулову.

Форм снежинок огромное количество, и все они не "идеальны". В 1954 году Комиссией снега и льда Международной ассоциации научной гидрологии была разработана Международная классификация снега. Атмосферные снежинки в ней разделены на 10 больших классов (рис. 5): пластинки, звезды (дендриты), столбики, иглы, пространственные дендриты, увенчанные столбики, неправильные кристаллы, крупа, ледяной дождь, град. Каждый класс делится на разновидности, а именно: поломанные кристаллы, частицы, покрытые изморозью, но не настолько, чтобы их можно было отнести к крупе, сложные частицы, такие, как хлопья снега, состоящие из нескольких самостоятельных снежных кристаллов, и, наконец, мокрые или не полностью растаявшие частицы. Недостаток этого важного документа - слабая проработка классификации форм зерен в снежном покрове, где разнообразие форм,

созданных процессами переноса массы и тепла и молекулярной перекристаллизации, по меньшей мере на порядок богаче, чем у атмосферных снежинок.

Снежинки атмосферные и составляющие снежный покров неоднородны и по форме, и по размерам. Для полного представления о структуре снега нужен структурный анализ. Микроструктурный анализ снега, как излагалось выше, можно выполнить методом просеивания с микрофотографированием фракций. На рис. 6 даны микрофотографии частиц разных фракций свежевыпавшего звездчатого снега. В одном и том же снеге, как видно, формы и размеры частиц потрясающе разнообразны.



Рис. 5. Классы снежинок по Международной классификации снега.

Чем объяснить такое разнообразие? Конечно, немалая роль принадлежит здесь примесям, особенно разным микрочастицам, оказавшимся ядрами кристаллизации. Это могут быть самые различные частицы пыли, дыма. А. Д. Заморский описывает случай, когда в ядре снежинки было найдено мелкое насекомое - полная аналогия с реликтовыми формами, обнаруживаемыми в янтаре. Но главная причина богатства форм снежных кристаллов - теплофизические условия их образования, роста и метаморфизма.

Многие восхищались причудливой красотой снежных кристаллов и мечтали получить их искусственно. Однако долго никто не мог догнать в этом деле природу. Профессору Хоккайдского университета У. Накайя первому удалось вырастить искусственные снежинки. В 1935 году Накайя создал в городе Саппоро маленькую лабораторию с холодильной камерой, где можно было изменять в широких пределах температуру и влажность воздуха. Первая снежинка в этой камере им выращена 12 марта 1936 года. Теперь на месте лаборатории разбит парк и воздвигнут монумент в память об этом событии.

Всю жизнь Накайя посвятил опытам по выращиванию снежинок и изучению условий их формообразования. Итог его большого труда - знаменитая диаграмма зон образования снежинок разных форм в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха (рис. 7).

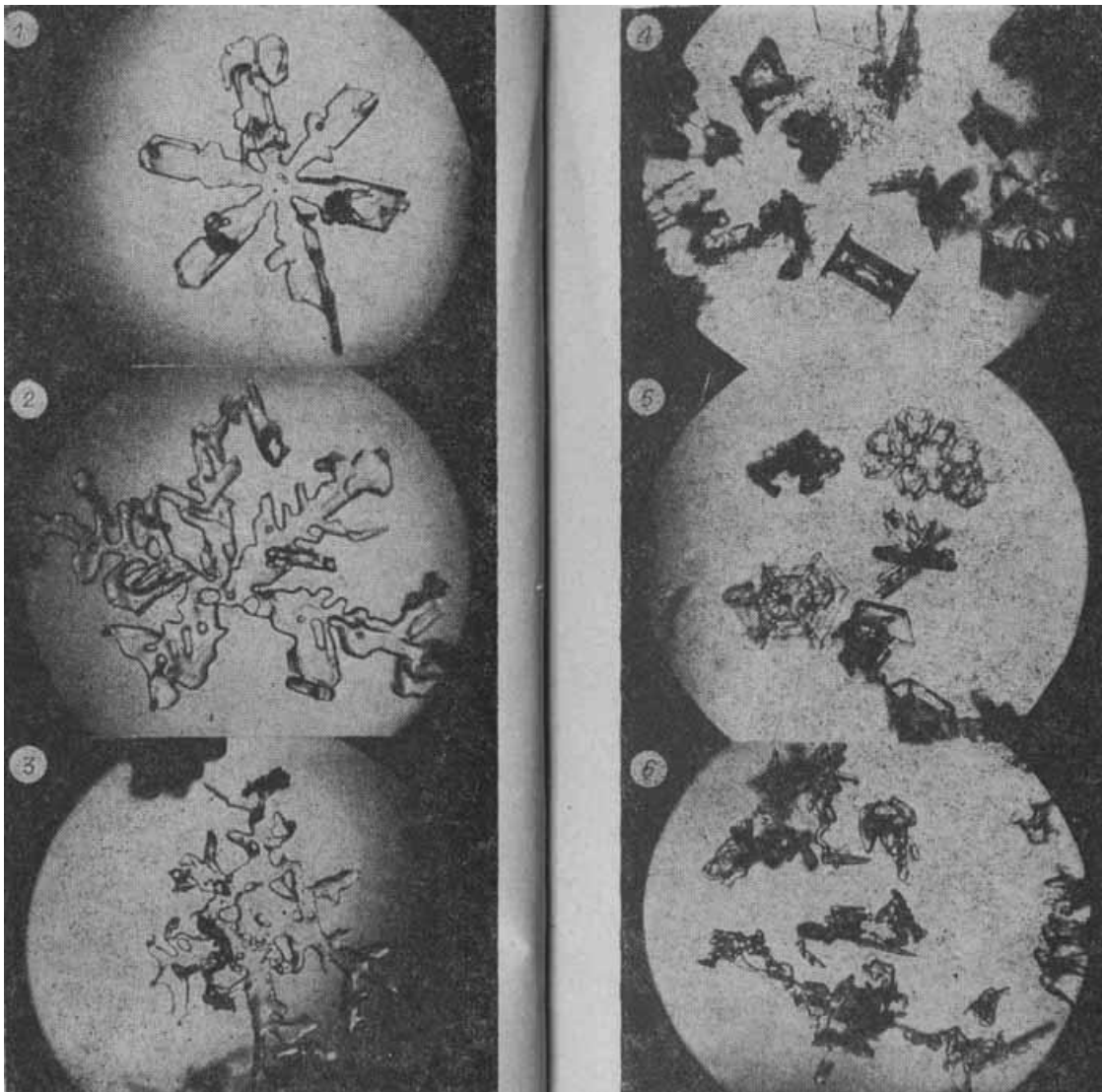


Рис. 6. Микрофотографии частиц снежного покрова.

1, 2, 3 - дендриты (звезды), выпавшие при температуре -12° -15°C (1- сразу после выпадения, 2 - через сутки после снегопада, 3- после кратковременной оттепели), увеличение $\times 10$; 4, 5-столбики, пластинки и их сrostки ("ежи") в свежеснеге при температуре -16°C , увеличение $\times 37$; 6 - игольчатый свежеснег при температуре ниже -20°C . Увеличение $\times 37$.

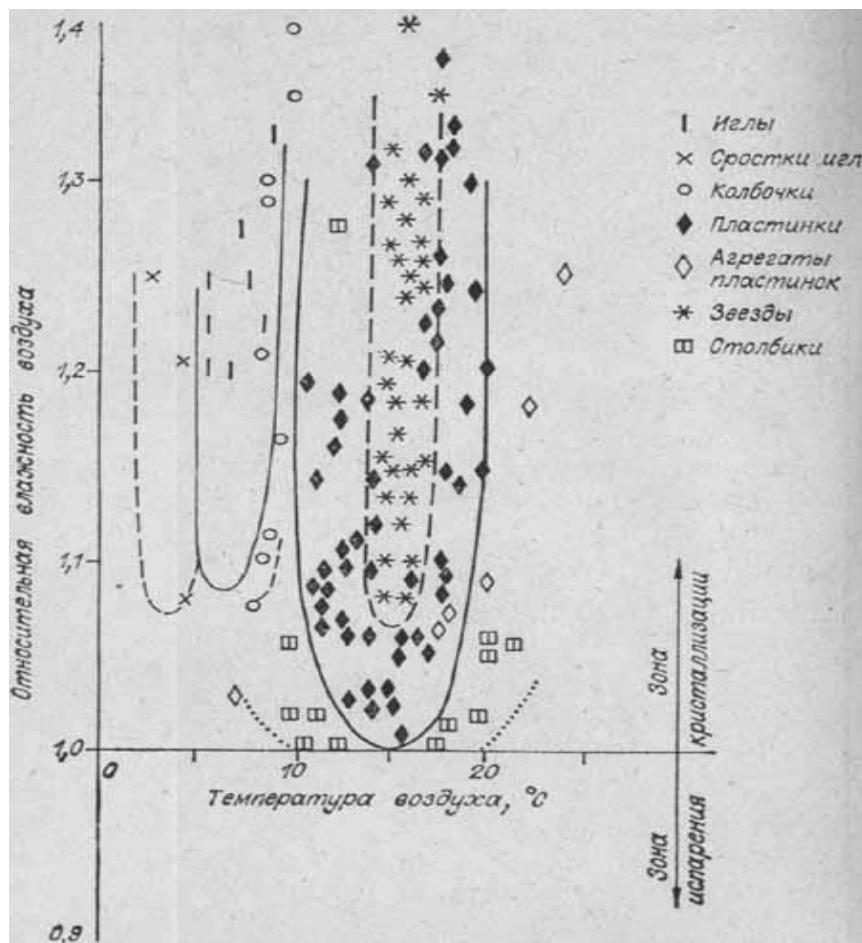


Рис. 7. Зоны образования снежинок разных форм по У. Накайя.

Относительная влажность воздуха определяется по формуле

$$S = e/e_n,$$

где e - фактическая влажность; e_n - влажность, соответствующая насыщению воздуха парами воды при данной температуре.

Кристаллизация паров воды возможна, как видно из рис. 7, только при $S > 1$, т.е. в режиме перенасыщения. Диаграммой демонстрируется закономерная, но очень сложная связь между формообразованием снежинок, температурой и влажностью воздуха. Неожиданным и загадочным оказалось то, что самые красивые кристаллы - снежные звезды появляются в очень узком температурном интервале: от -14 до -17°C при $S > 1,06$. Для вторжения других форм кристаллов эта область почему-то закрыта. Теория диаграммы Накайя пока отсутствует.

СТРАТИГРАФИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

После выпадения снежинок на поверхность Земли начинается их "вторая" жизнь в составе снежного покрова, жизнь своеобразная, полная загадок. Здесь мы встречаемся еще с одним малоизвестным замечательным свойством снега.

Структура снежного покрова зависит от внешних и внутренних факторов. Вследствие низкой теплопроводности снега метаморфические изменения его структуры протекают обычно медленно и отражают историю главных метеорологических событий зимы. Снежный покров, как говорят, обладает индикационными свойствами. Структура снега, его текстура (Текстура снежного покрова - характер его слоистости) и даже форма метаморфизованных кристаллов дают важную информацию о каждом из этих

событий аналогично структуре и текстуре геологических образований. Полная характеристика структуры и текстуры снега называется его стратиграфией.

Индикационные свойства снежного покрова можно в принципе использовать для оценки всех элементов местного микроклимата и общей физико-географической ландшафтной обстановки района. Инженерно-методическое решение этой проблемы означало бы возможность получения на изыскательской стадии важнейшей информации об условиях строительства инженерных сооружений в плохо изученных районах на основании сравнительно простого и кратковременного анализа стратиграфии снежного покрова в конце зимы.

Исследования прогностических свойств снежного покрова открывают путь к созданию новых, значительно более надежных методик расчетов снеговых паводков и снегового стока (части общего стока рек за счет снеготаяния), определения глубины сезонного промерзания грунта, прогноза условий снегозаносимости и лавинной опасности и т. д.

Э. Г. Коломыц первым предложил и применил для исследования индикационных свойств снежного покрова кристалломорфологические методы. Применяемые в настоящее время способы анализа стратиграфии снега, сводящиеся к разделению его по мелко-, крупно- и среднезернистый и глубинную изморозь, дают мало пользы как в научном, так и в практическом смысле. При наблюдениях за снегом на метеорологических станциях не используется даже Международная классификация снега, существующая уже четверть века. Методика Э. Г. Коломыца предусматривает обстоятельный анализ всей снежной толщи, всех ее слоев, вплоть до единичных кристаллов, с использованием самых элементарных средств.

Форма атмосферной снежинки отражает условия ее рождения в атмосфере - влажность, температуру, запыленность, давление, освещенность, ветровой режим и т. д. Форма кристалла, медленно выросшего в толще снега, - итог еще более богатой и, главное, локальной гаммы событий, длящихся недели и месяцы.

Индикационными свойствами обладает также рельеф слоистости и дневной поверхности снежного покрова, отражающий действие приземных ветров. Подробнее об этом сообщается в следующей главе, посвященной буранам. Очень ценны как источник информации жидкие и твердые примеси, электризация снежного покрова, его пористость, механические свойства снега в целом и послойно.

Но не только об истории прошедшей зимы может поведать нам снежная летопись. Снег не исчезает на ледниках и способен хранить информацию об условиях своего рождения десятки тысяч лет! Об этом мы расскажем в конце книги.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ БУРАНЫ

*Снежинки те изящны и прекрасны,
Как женщины,
Но, кто б подумать мог,
Что вся воздушность их
и танцы в вихре страстном -
Всего лишь навсего двухфазовый поток,
Строжайшему анализу подвластный!
Марина Шарловская*

Зима в Северном полушарии - время метелей и заносов. Если полевой снег не защищен растительностью, то под действием ветра он приходит в движение. Над местностью поднимается белая пелена. Видимость резко снижается. Все живое пытается найти укрытие от ледяного дыхания метели.

Часто наземная пурга сопровождается густым снегопадом. Плотные снежные шквалы налетают сверху, снизу, со всех сторон, глушат, ослепляют. Свет фонарей меркнет в нескольких шагах. Люди могут заблудиться рядом с жилищем.

Все, что мешает стремительному бегу метели, замедляется ею под громадными сугробами. Дороги становятся непроезжими, нарушается движение поездов, заносятся улицы, по ним прекращается движение.

Метель сметает снег с полей, обрекая их на иссушение. Чрезмерные метелевые навевания, наоборот, замедляют таяние снега, и посевы озимых вымокают и гибнут.

В Южном полушарии, в Антарктиде, частые и сильнейшие на Земле метели свирепствуют почти круглый год на всей прибрежной полосе протяженностью свыше 30 тыс. км. Скорость метелевых ветров достигает 300 км/ч и более. Для теплящейся там жизни метели являются проблемой помер один.

Метель - достаточно серьезный природный фактор, с которым нельзя не считаться. Надо знать ее законы и повадки. Но, как ни странно, научные исследования метелей начались лишь в XX столетии. Причин тому было много. Одна из них заключалась в отсутствии мотивов, так как наиболее "метельные" районы земного шара еще не были освоены.

Другая причина - трудность исследований. Проблема метелей в своей основе проблема гидродинамическая. Ее можно рассматривать как частный случай гидродинамики многокомпонентных потоков, которая, в свою очередь, является ветвью механики сплошных многокомпонентных сред. Общеизвестны другие ее частные случаи, как, например, движение речных наносов или такие аналоги метели, как песчаные и "черные" бури, а также гидро- и пневмотранспорт и т. д. Но гидродинамика многокомпонентных потоков относилась, да и теперь еще относится к наименее разработанным разделам общей гидродинамики.

Впрочем, и само снеговедение как наука сравнительно недавно находилось в самом начальном периоде становления и не могло располагать необходимыми для изучения снежных метелей данными.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТЕЛЕЙ

Любая наука, становясь на ноги, прежде всего создает свой язык, терминологию, классификацию изучаемых ею фактов. "Метелеведение" практически не имело своего общепризнанного языка, классификаций вплоть до пятидесятих годов нашего столетия.

Метель - очень сложное природное явление. Ветровой поток с включением снега ведет себя иначе, чем чистый ветер, так как метелевые снежинки влияют на скорость и турбулентность ветра. В метели принимают участие как снег, отложенный на поверхности земли, так и зародившийся в облаках и еще не достигший земли. Поведение и закономерности метелей существенно зависят от рельефа (орографии) местности. Наконец, действие метели определяется силой ветра, массой поднятого им снега и характером движения метелевых снежинок. Поэтому метели в настоящее время классифицируются по нескольким признакам.

По признаку источника появления несомых ветром снежинок различают:

- 1) верховую метель - снегопад при ветре до приземления атмосферных снежинок, после чего они становятся уже частицами снежного покрова. В верховой метели участвуют только атмосферные снежинки. Верховая метель в чистом виде наблюдается, например, если снег выпадает при ветре над кустарником, лесом, незамерзшим водоемом. Верховая метель условно отличается от спокойного снегопада по скорости ветра. Снегопад считается спокойным, если скорость ветра на высоте 10 м (примерная высота флюгеров метеорологических станций) не превышает 3 м/с;
- 2) низовую метель, т. е. перемещение ветром вдоль земной поверхности как только что упавших, так и ранее отложенных снежных частиц;
- 3) общую метель, т. е. сочетание верховой и низовой метелей.

По признаку рельефа подстилающей поверхности различают:

- 1) метели на равнинной и слабо пересеченной местности и

2) горные метели.

По признаку силы ветра, скорость которого V_ϕ измеряется на высоте флюгера метеорологических станций, выделяются следующие виды метелей: 1) слабые при скоростях ветра V_ϕ менее 10 м/с; 2) обычные при V_ϕ от 10 до 20 м/с; 3) сильные при V_ϕ от 20 до 30 м/с; 4) очень сильные при V_ϕ от 30 до 40 м/с и 5) сверхсильные при V_ϕ свыше 40 м/с.

Метели двух последних категорий можно назвать катастрофическими, так как они сопровождаются колоссальными заносами и нередкими разрушениями строений. Верхний предел скоростей антарктических сверхсильных метелей достигает на Земле Адели - 90 м/с.

По насыщенности снегом различаются:

- 1) насыщенные метели, когда ветровой поток переносит количество снега, соответствующее его максимальной транспортирующей способности. "Грузоподъемность" низовой метели, как будет показано ниже, имеет предел, зависящий главным образом от скорости ветра;
- 2) ненасыщенные метели, когда вес снега, переносимого ветром, меньше максимума, насыщающего ветровой поток. Обе группы относятся только к низовым метелям.

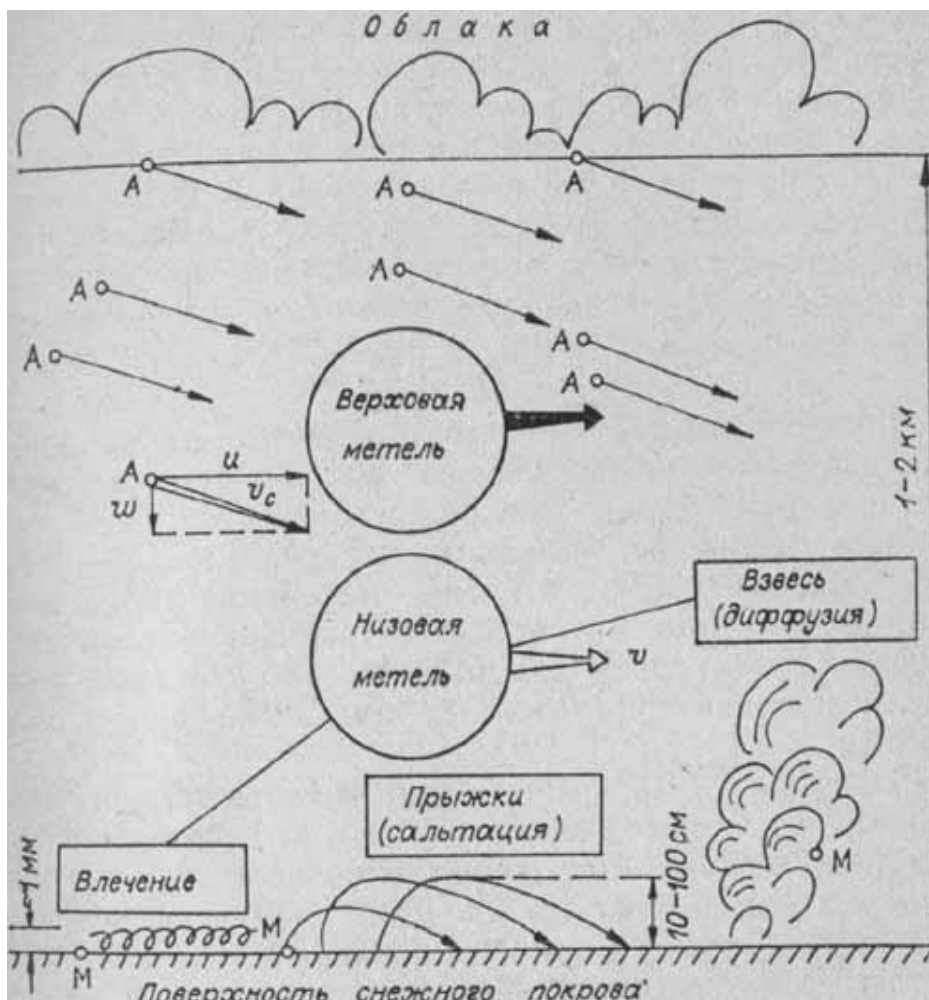


Рис. 8. Виды метелей и способы движения метелевых частиц.

Известны следующие способы движения метелевых частиц:

- при верховой метели 1) падение атмосферных снежинок;
- при низовой метели 2) влечение вдоль поверхности снежного покрова или земли;
- 3) сальтация, или прыжки, когда снежинки подсакаивают сперва почти вертикально вверх, а затем снижаются по отлогой кривой;
- 4) витание, или диффузия, когда снежинки, сорванные со снежного покрова, поднимаются ветром и витают высоко над поверхностью земли.

На рис. 8 наглядно показаны верховая и низовая метели и соответствующие им способы движения метелевых снежинок. Участники верховой метели - атмосферные снежинки А падают вниз со скоростью w и перемещаются ветром в горизонтальном направлении со скоростью u . Равнодействующая скорость снежинки

$$v_c = \sqrt{w^2 + u^2}$$

Составляющая и немного отличается от горизонтальной составляющей скорости ветра в той же точке, так как атмосферные снежинки опережают поступательное движение воздушных струй, переходя при падении, как правило, в слои с постепенно уменьшающимися средними скоростями ветра. Кроме того, воздушная среда смещается относительно снежных частиц вследствие турбулентных пульсаций воздушного потока,

Толщина слоя верховой метели соответствует расстоянию от земли до облаков (1-2 км), которое в горах резко сокращается. Облачный слой может примыкать к горам и обходить их. Сразу или через некоторое время после падения на землю снежинки А становятся уже частицами М снежного покрова и участниками низовой метели. В низовой метели слой влечения имеет толщину не более 1 мм. Слои сальтации, самой распространенной формы движения частиц низовой метели, достигает в высоту до 100 см. Движение частиц низовой метели в виде взвеси (витание) происходит в приземном слое воздуха высотой обычно не более 10 м. Австралийские гляциологи на основании своих многолетних наблюдений на Земле Адели в Антарктиде полагают, что высота подъема взвешенных частиц низовой метели достигает 300 м и выше.

В общей метели могут проявлять себя все четыре формы движения снежинок. Так "расчленяется" сложное и внушительное явление, называемое метелью.

Метель, как и пылевая буря, способна формировать рельеф снежного покрова, вдоль которого она мчится. При малых скоростях ветра на поверхности снега отчетливо виден тонкий вибрирующий слой влекомых снежинок, постепенно создающих правильную рябь, похожую на рябь пустынных барханов и на подводную рябь песчаных пляжей. При усилении ветра на поверхности снега появляются своеобразные волны и барханчики, медленно перемещающиеся в направлении ветра. Эти и другие формы рельефа, образующиеся в результате метели, сами оказывают влияние на структуру метелевого потока.

Между снежными и пылевыми бурями много сходства, но есть и различия. Во-первых, может существовать лишь "низовая песчаная метель", так как песок не зарождается в атмосфере. Во-вторых, доля взвеси в пылевой буре неизмеримо выше. Очень мелкие, размером до 0,001 мм и менее, частицы пыли способны подниматься на высоту более 2-3 км, формируя мощные пылевые тучи. Такие тучи, зародившись, например, над Сахарой, способны пересечь Атлантический океан. А появление африканской пыли над Европой усилилось в последние десятилетия в связи с небывалым наступлением африканских пустынь на юг континента. Низовая метель могла бы порождать такие же "тучи", если бы мелкие снежинки быстро не испарялись. В предыдущей главе сообщалось об их недолговечности и ее причинах.

НАЧАЛО БУРАНОВ

Для возникновения метели нужны определенные условия. Для верховой метели обязателен снегопад. Низовая же метель может начаться и без снегопада, но для этого необходим ветер достаточной силы, чтобы привести в движение поверхностные частицы снежного покрова. Если поверхность снега рыхлая, достаточно небольшой скорости ветра для начала влечения незакрепленных снежинок. "Начальная скорость ветра" по флюгеру V_{ϕ} , при которой могут смещаться отдельные свободно лежащие снежинки, равна 3-4 м/с.

Если поверхностный слой снежного покрова затвердел, между его частицами возникает сцепление. Ветер в таком случае должен быть достаточно сильным для того, чтобы вырвать наименее закрепленные частицы из этой брони. В дальнейшем при неизменном ветре вырванные частицы, "бомбардируя" снежный покров разрушают связи между снежинками и своими ударами побуждают к движению все новые и новые снежинки.

Подвижность снежных частиц существенно зависит от их размера. Мелкие сдуваются ветром легче, чем более тяжелые и крупные. Кроме того, очень мелкие снежинки прочнее связаны между собой.

В метелевом снеге преобладают наиболее подвижные частицы размером от 0,2 до 0,4 мм. Поразительно, что средние размеры метелевых снежинок почти одинаковы на всем земном шаре - в Сибири, Канаде, Скандинавии, Антарктиде. И это при необычайном разнообразии кристаллических форм и размеров снежинок! Так же однородны размеры переносимых ветром частиц минеральной пыли, кварцевых песчинок и даже речных донных наносов.

ЗОНА РАЗГОНА

Как бы ни было обширно снежное поле, у него есть границы - лесные опушки, русла рек и оврагов, постройки, берега озер, водохранилищ и т. д. Пусть ветер начинает свой бег от какой-либо наветренной границы покрытого снегом поля, называемого гляциологами снегосборным бассейном. Снежная метель не может сразу в полную силу "вспыхнуть" на этой границе. Нарастание масс переносимого метелью снега осуществляется постепенно, по мере разрушения поверхностного снежного покрова прыгающими, сальтирующими частицами.

Может показаться, что удары легких кристалликов недостаточны для разрушения смерзшейся снежной корки. В действительности же опытные данные свидетельствуют о внушительном действии сальтации. В аэродинамическом канале устанавливался параллелепипед из очень плотного смерзшегося снега. На расстоянии 1,2 м от него на дно канала насыпался слой рыхлого снега на протяжении 1,5 м. При скорости ветра $V_{0,05} = 18$ м/с слой снега был сдут за 12 с. За это время параллелепипед потерял в весе 2,2 г. Он покрылся выщербинами от жестоких ударов изящных и хрупких снежинок,

Но одновременно с разрушительной деятельностью сальтации усиливается противодействие сдуванию снежного покрова благодаря метелевой сепарации зерен, так как мелкие зерна в начале поля сдуваются и остаются крупные и менее подвижные. Кроме того, как отмечено в предыдущей главе, под влиянием сильного ветра и ускоренных им метаморфических явлений в снеге усиливается сцепление между поверхностными снежинками, поверхность снежного покрова твердеет. Взаимное влияние трех противоречивых факторов (абразивное действие метели, сепарация зерен и твердение поверхности снежного покрова) очень усложняет процесс. В конце концов через какое-то время и на некотором расстоянии X_p от наветренной границы снегосборного бассейна общий перенос снега достигает предельно возможного максимума. Расстояние X_p названо длиной зоны разгона (см. примечание 4 в главе первой).

Почти такая же картина наблюдается при развитии пылевой бури, разница лишь в том, что сдуваемая поверхность почвы укрепляется, видимо, только под влиянием сепарации зерен.

Закон развития пылевых и снежных бурь, как впервые предположил английский геофизик Р. Бэгнольд, вероятно, сходен с законом показательной функции $f(x) = Q^x$. Если каждая снижающаяся после прыжка частица выбивает p частиц, то после k прыжков в движение вовлекается p^k частиц. Допустим, в грубом приближении, что величина k пропорциональна длине переноса снега, начиная от границы поля, а значение $k = k_0$ соответствует длине разгона X_p , по достижении которой наступает насыщение метели с равновесным режимом сдувания и аккумуляции. После k прыжков общий перенос снега в процентах от максимума составит $p(k - k_0) \cdot 100$.

Пусть $k_0 = 60$, а $k = 40$. Тогда при разных значениях n (число выбиваемых после каждого удара частиц) отношение E_c снегопереноса при $k = 40$ к максимальному снегопереносу при $k_0 = 60$, в процентах, примет следующие значения:

n	1,05	1,1	1,5	2,0
E_c	37,6	14,8	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}

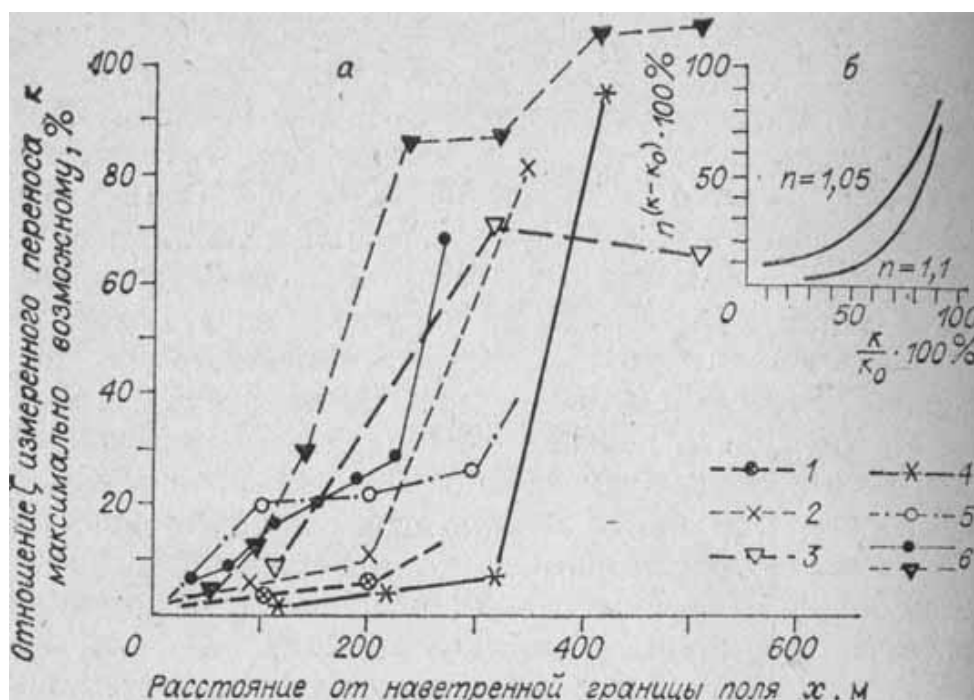


Рис. 9. Развитие метели и пылевой бури в зависимости от расстояния до наветренной границы ровного поля, покрытого снегом или обнаженной почвой.

а-полевые данные: б-изменение функции $n^{(k-k_0)} \cdot 100$ при $k_0 = 60$ и значениях n , равных 1,05 и 1,10. № усл. обозн. на рис.

Материал	Наблюдатель	Высота замера, м	Скорость ветра, м/с
Снег	Д. М. Мельник	1,0	9,00
	А. К. Дюнин	1,6	8,47
1,6	8,58		
1,6	9,51		
1,6	15,22		

Если закон показательной функции здесь действует и число n больше 1,05, то кривая развития переноса твердых примесей такова, что на первых двух третях зоны разгона перенос составит меньше 1/3 возможного максимума.

На рис. 9, а приведены данные Д. М. Мельника, наши, канадских почвоведов В. Чипила и Р. Майлна. В полевых условиях измерялся перенос твердых примесей во время метелей и пылевых бурь на разных расстояниях x от наветренных границ полей. По ординате отложены отношения измеренного веса переносимых ветром твердых частиц к максимально возможному в процентах. Пылевые бури быстрее достигают максимального насыщения твердыми частицами, чем метели, ввиду отсутствия метаморфического сцепления поверхностных зерен. Кроме того, ветер иссушает почву, увеличивая ее податливость к раздуванию.

Кривые графика изменения показательной функции $n^{(k-k_0)} \cdot 100$ при $k_0=60$, $n=1,05$ и $n=1,10$ представлены на рис. 9, б. Реальные кривые, построенные по опытным точкам, повторяют вогнутую форму показательной функции. Участки их интенсивного роста сдвинуты к концу зоны разгона. Из 20 прыгающих снежинок, по-видимому, в среднем лишь одна или две при каждом прыжке вовлекают в поток по две частицы.

Остальные или только повторяют прыжки, или вырывают из снежного покрова по одной новой частице, а сами прекращают сальтацию.

Это, конечно, всего лишь очень грубые "теоретические" соображения. Теории зоны разгона еще нет, как и не создана еще достаточно корректная теория приземного пограничного слоя двухфазного потока.

Длина зоны разгона X_p есть функция времени. В начале метели она сравнительно невелика, но быстро возрастает по мере укрепления ветром поверхности снежного покрова. Через короткое время (порядка десятков минут) величина X_p достигает максимума (300 - 500 м) и стабилизируется. Устойчивое значение X_p при пылевых бурях достигается намного медленнее. По наблюдениям В. Чипила, через час после начала пылевой бури X_p составляет 6 м и лишь через 5 дней непрерывной бури она достигает 800 м.

Важное практическое значение имеет то, что в большей части зоны разгона действует ненасыщенная метель, которая способна сдувать и переносить гораздо больше снега, чем несет фактически. Поэтому в зоне разгона она выметает на своем пути весь снег, способный к сдуванию, даже в пологих понижениях. При устойчивых направлениях метелевых ветров выгодно, например, прокладывать дороги в пределах зоны разгона, где нет условий для отложения снега не только на ровных площадках, но даже и в дорожных выемках небольшой глубины.

В горах снегосборные бассейны на плато и в долинах, как правило, малы, и там низовые метели не успевают "разогнаться".

Плотные полезащитные лесные полосы служат границами располагающихся между ними снегосборных бассейнов. Сразу же за пределами создаваемой лесными полосами "ветровой тени" начинается безаккумулятивная зона разгона, и снег нередко сдувается полностью на протяжении сотен метров. Это вынуждает применять между полосами дополнительные средства снегозадержания. Заметим, что в самом начал разгона, где перенос снега слаб, а ветер силен, снежный покров особенно тверд. Здесь сохраняется полоса очень плотного, монолитного снега шириной 15-30 м.

ТРАНСПОРТИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ МЕТЕЛЕЙ

Пусть за одну секунду через один метр ширины метелевого потока переносится масса снега, равная Q г/м*с. Эта величина называется общим расходом снега. Когда пройдена зона разгона, метель становится насыщенной снегом. Масса переносимого снежного груза далее не увеличивается и колеблется около какого-то среднего значения Q_n , которое и называется транспортирующей способностью метелей.

Общий расход снега найдется из выражения

$$Q_H = \int_0^H q_z \cdot dz,$$

где H - потолок (Предельная высота поднятия снежинок над земной поверхностью низовой метелью) взвешивания, снежинок (обычно $H \approx 2-3$ м); q_z - удельный расход снега (г/м²с), измеренный на высоте z специальными приборами, называемыми метелемерами.

Важная особенность низовых метелей - их приземленность. Удельный расход снега q_z на высотах 0-5 см на 2-3 порядка больше, чем на высотах свыше 30 см, как это видно из рис. 10, где показаны результаты точных измерений q^2 в аэродинамическом канале при скоростях ветра $V_{0,2}$ ($z = 0,2$ м) от 9,72 до 30,4 м/с.

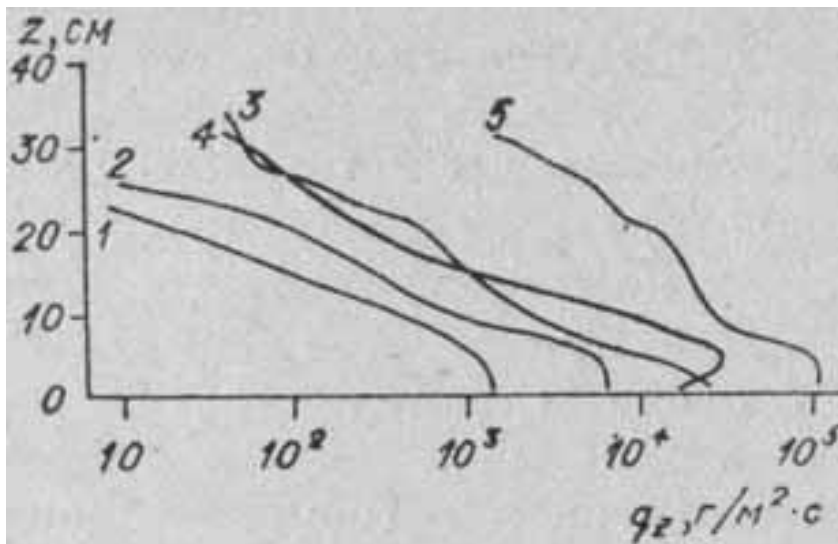


Рис. 10. Изменение удельного расхода снега q_z по высоте z .

1- $V_{0,2}=9,72$ м/с; 2 - $V_{0,2}=13,8$; 3 - $V_{0,2}=17,8$; 4 - $V_{0,2}=24,2$; 5 - $V_{0,2}=30,4$ м/с.

Поддавливающая часть снега при низовой метели переносится в слое высотой 20 см даже при сильнейших бурях.

В СССР и за рубежом накоплено множество метелемерных измерений, дополненных лабораторными данными. Было предложено около двадцати эмпирических формул для вычисления Q_n как функции скорости ветра. Результаты расчетов по этим формулам сильно расходились в связи с тем, что при метелемерных измерениях, как правило, не учитывали насыщенность метелей и не всегда правильно оценивали погрешность метелемеров. Корректные аналитические выражения для Q_n найдены общим дедуктивным методом с использованием основных положений механики многокомпонентных потоков. Общность аналитических выражений позволила привлечь данные изучения других сходных взвесенесущих потоков. Исследователи песчаных и "черных" бурь Р. Бэгнольд, В. Чинил и их последователи также накопили изрядный и достоверный экспериментальный материал.

Еще богаче опытные данные о движении твердых примесей в водных потоках, о движении донных речных наносов. Оказалось, что транспортирующая способность низовых метелей, пыльных бурь и взвесенесущих водных потоков (для донных наносов) описывается одним аналитическим выражением:

$$Q_H = \Phi \frac{(v_z - v_{kz})^3}{g \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_s} \right) \ln \frac{z}{\delta}} \text{ г/м} \cdot \text{с}_z$$

где Φ - безразмерный множитель, являющийся сложной функцией многих параметров; V_z - скорость потока, измеренная на высоте z от подстилающей поверхности; V_{kz} - скорость потока, соответствующая началу переноса твердых частиц и измеренная на той же высоте z ; ρ , ρ_s - массовые плотности соответственно несущей среды и твердых частиц; δ - размер бугорков шероховатости поверхности, вдоль которой течет поток; g - ускорение силы тяжести, м/с².

Для вывода этой формулы была применена теория двухфазных потоков профессора Феликса Исидоровича Франкля и общая теория турбулентного пограничного слоя. Теоретическое изучение метелей как частного и очень сложного случая двухфазных потоков не ограничилось, безусловно, одним выводом формулы для Q_n . На рис. 11 найденное общее аналитическое выражение сопоставлено с опытными данными В. Н. Гончарова и Г. Н. Лапшина, Р. Бэгнольда, В. Чинила и других исследователей для движения песка в гидрлотках, для песчаных, пыльных и снежных бурь. Для всех этих потоков коэффициент Φ близок к некоторой постоянной величине, примерно равной 0,01. Опытные данные,

относящиеся к трем физически различным взвесенесущим потокам, достаточно хорошо соответствуют теоретической кривой в пределах шести порядков изменения величины.

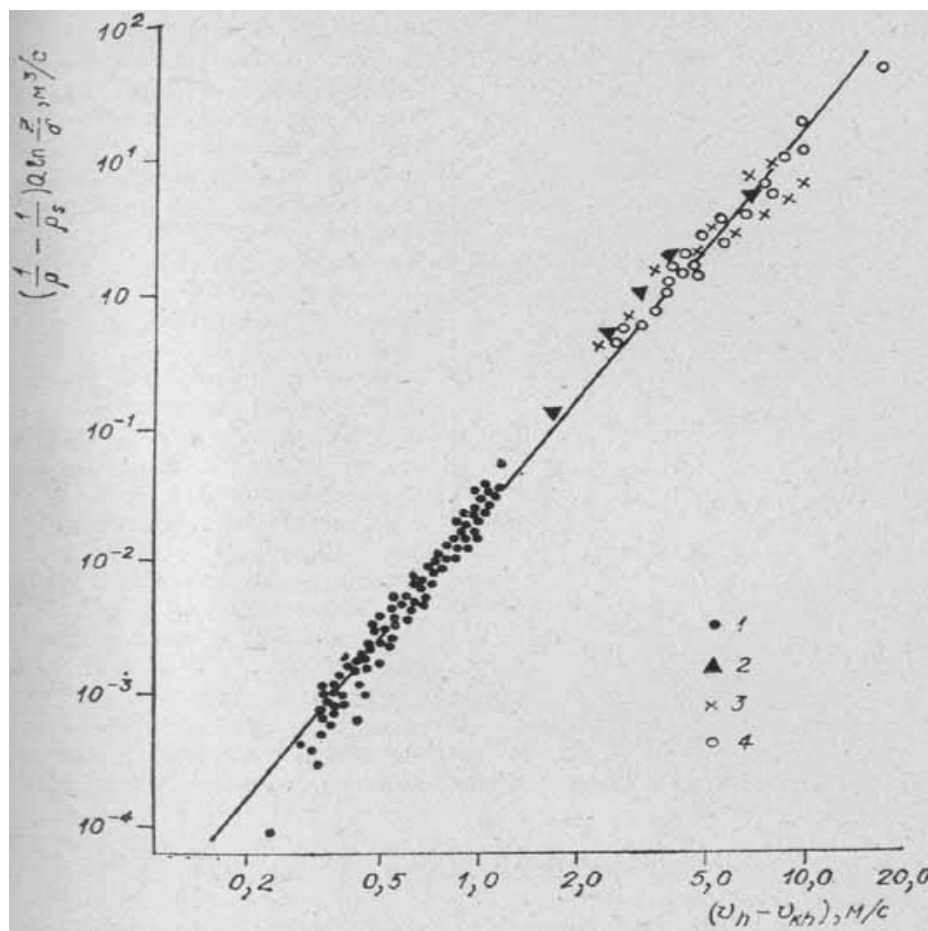


Рис. 11. Сравнение общего расхода твердых частиц в различных двухфазных потоках по данным: 1 - В.Н. Гончарова; 2 - Р. Бэгнольда; 3 - В. Чипила; 4 - А. К. Дюнина

После подстановок значений ρ , ρ_s , b , V_{kz} соответствующих снего-ветровому потоку, получим для насыщенных метелей: $Q_n = 0,34(V_{0,2} - 3)^3 \text{ г/м}^2\text{с}$, если $z = 0,2 \text{ м}$, или $Q_n = 0,077(V_\phi - 5)^3$, если $z = 10 \text{ м}$ (высота флюгера). Почти точно такими же оказались расчетные формулы для песчаных бурь.

Перенос снега очень чувствителен к изменениям скорости ветра. Например, при незначительном изменении V_ϕ (от 7 до 8 м/с). Он изменится от 0,6 до 2 г/мс, то есть более чем в три раза.

Формулы, приведенные выше, "работают" неплохо. Они применяются для расчетов, связанных с проектированием снего- и пескозащитных средств в сильнометелевых местностях и в районах подвижных песков СССР. По этим формулам составлен график зависимости общего твердого расхода низовых метелей от скорости ветра (рис. 12) и сопоставлен с полевыми Данными и лабораторными измерениями. В нижней части рисунка построена шкала для скоростей ветра $V_{0,2}$ (на высоте 0,2 м над снегом), в верхней части - шкала для скоростей ветра V_ϕ (на высоте флюгера). Кривая Q_n соответствует общему переносу снега насыщенных низовых метелей. Заштрихованная область ниже кривой - зона ненасыщенных метелей вплоть до отсутствия переноса снега, когда снежный покров сильно закреплен или вовсе отсутствует. Выше кривой Q_n простирается зона общих метелей, когда ветровой перенос снега складывается из поступательного движения атмосферных снежинок верховой метели и поверх постных частиц низовой ($Q_n + Q_a$). В обоих случаях берутся горизонтальные составляющие расходов.

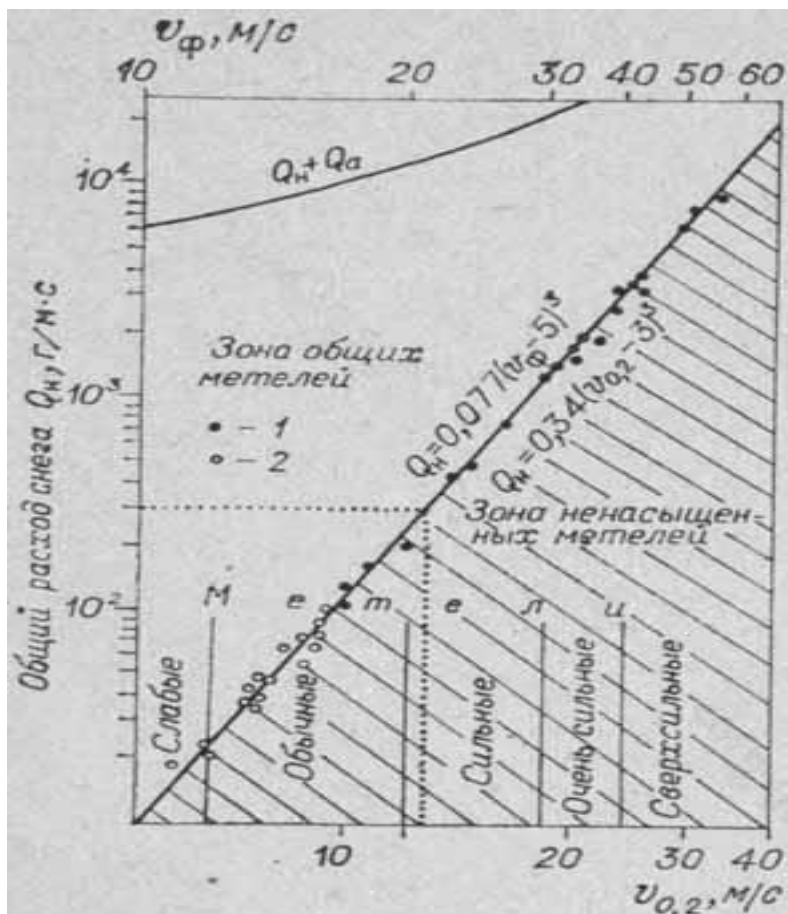


Рис. 12. Зависимость общего расхода снега от скорости ветра.
1 - измерения в большом аэродинамическом канале; 2 - полевые данные.

Удельный расход снега при верховой метели в горизонтальном направлении исчисляется простой формулой: $q_{za} = p_{ac} u_z$ г/м²с, где p_{ac} - массовая концентрация атмосферного снега в воздухе, выражаемая массой снега в граммах, приходящейся на 1м³ воздуха; u_z - горизонтальная составляющая скорости снежинок на высоте z от земли (м/с). Концентрацию p_{ac} можно найти, зная интенсивность снегопада q_a и среднюю скорость падения снежинок w . Интенсивность q_a есть, в сущности, удельный расход снега через горизонтальную поверхность. Следовательно, $q_a = p_{ac} w$ г/м²с. Отсюда $q_{za} = (u_z w) q_a$, а общий расход верховой метели в горизонтальном направлении в слое атмосферы высотой H_a равен:

$$Q_a = \int_0^{H_a} \frac{u_z}{w} q_a dz \text{ г/м} \cdot \text{с.}$$

Если p_{ac} , u_z и w существенно не изменяются вдоль земной поверхности, что характерно для обширных равнин, то прирост снежного покрова равен q_a и равномерен как при верховой метели, так и при снегопаде без ветра. Но все в корне меняется, если верховая метель бушует в горах; здесь она - главный, решающий фактор, который регулирует распределение снега и образует снежные заносы на горных предприятиях и дорогах. В верхнем углу рис. 12 построена кривая $Q_n + Q_a$ только для слоя верховой метели высотой $H_a = 100$ м при скорости падения атмосферных снежинок $w = 0,25$ м/с и интенсивности осадков $q_a = 5$ мм воды в час. Интенсивность снегопадов метеорологи измеряют в водном эквиваленте, т. е. выражают ее слоем воды, который получился бы при таянии снега, выпавшего за час. Из рис. 12 видно, какие громадные массы снега проносятся над земной поверхностью во время общих метелей по сравнению с низовыми метелями.

На этом же рисунке по скоростям ветра метели разделены в соответствии с их классификацией на слабые, обычные, сильные, очень сильные и сверхсильные. До недавнего времени в сфере внимания исследователей находились низовые метели с общим переносом снега не более 300 г/мс. На рис. 12 эта область выделена пунктиром. Все остальное получено только моделированием метелей в аэродинамических каналах. Не созданы метелемеры для сверхсильных метелей. Никто еще в поле не измерял их мощь. Существующие приборы для этого не пригодны.

Очень сильные и сверхсильные, катастрофические метели бывают довольно часто в полярных районах Земли. На берегах Антарктиды это обычное явление.

Л. М. Дановский в зиму 1948/49 г. был свидетелем сверхсильной метели при $V_{\phi} > 45$ м/с на Анарской дистанции пути бывшей Карагандинской железной дороги. Метель легко вырывала двухметровые снегозащитные щиты, отбрасывая их на сотни метров, опрокидывала высокие и прочные снегозащитные заборы. Одноэтажные жилые здания были занесены снегом до крыш, так что жильцы выходили из домов через чердак. Случалось, что и здания разрушались.

В феврале 1969 г. я наблюдал сверхсильную метель на Южном Сахалине при очень интенсивном снегопаде - от 5 до 11 мм воды в час. Два снежных тайфуна, мчавшиеся на север вдоль западного и восточного берегов Японии, объединились тогда над Сахалином. Заносы в Южно-Сахалинске достигали вторых этажей. Скорость ветра превосходила 50 м/с. Чтобы выйти из гостиницы, пришлось пробивать снежный тоннель.

Факт существования предельной транспортирующей способности низовых метелей, равно как и пылевых бурь и взвесенесущих речных потоков, доказан и общепризнан. Относительно количественного выражения этой способности нет единого мнения. Австралийские гляциологи считают, что доля витания при низовых метелях очень велика в сравнении с другими способами движения снежинок, и поэтому кривая Qn на рис. 12 должна быть значительно выше.

Глава школы австралийских снеговедов профессор Ф. Леве, создавая диффузионную теорию метелей, основывался на собственных наблюдениях за свирепыми пургами на Земле Адели в Антарктиде. Во время антарктической зимовки в 1951 г. он установил, что толщина метелевых наносов за береговым ледяным обрывом достигала 20-30 м. Циклопические сугробы простирались к северу более чем на 1 км. Лед берегового Припая прогибался под их непомерной тяжестью, и морская вода проникала в снег.

Среднемесячная скорость метелевого ветра равнялась там 29 м/с с порывами до 50 м/с и выше. Непрерывная сверхсильная метель выла неделями, видимость колебалась от нуля до нескольких метров. Основываясь на наблюдениях за грандиозными антарктическими буранами, Леве и пришел к убеждению о решающей роли витания (диффузии) снежинок при метелевом снегопереносе.

Метели "диффузионного типа" в принципе возможны в экстремальных условиях при полном отсутствии дефицита влажности воздуха или при его перенасыщении парами воды. Это, как отмечалось во второй главе, реально при очень низких температурах воздуха вследствие малости давления насыщающего пара. Тогда снежная пыль может диффундировать в высокие слои атмосферы, подобно почвенной пыли, не испаряясь.

Возможно и другое, объяснение: австралийские гляциологи могли наблюдать общие метели при совпадении низовых метелей со снегопадами. Вопрос этот пока не вполне ясен, но в обычных условиях роль витания снежинок в динамике низовых метелей пренебрежимо мала.

Эксперименты показали, что в пограничном слое метелей со скоростями $V_{0,2}$ более 20 м/с (очень сильные и сверхсильные метели) происходят глубокие качественные изменения.

Профили скоростей ветра на рис. 13 для чистого потока над гладким металлическим дном аэродинамического канала мало изменяются в интервале скоростей $V_{0,3}$ от 9,5 до 40 м/с. Профили скоростей метелей при $V_{0,3} = 9,5 - 13,5$ м/с более пологие за счет большей шероховатости поверхности

снега. При $V_{0,3}$ выше 24 м/с происходит скачок, как если бы бугорки шероховатости увеличились в несколько раз. Но метель продолжает быть "приземленной".

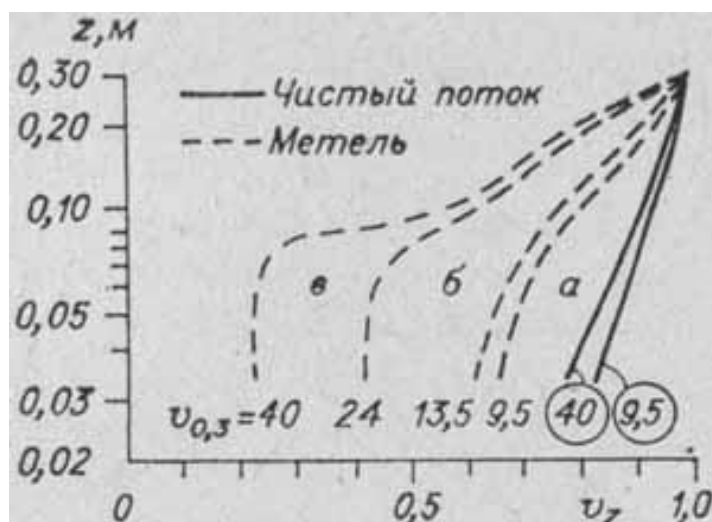


Рис. 13. Профиль скоростей ветра в пограничном слое чистого потока над гладкой металлической поверхностью (а) и в пограничном слое метели при $V_{0,3}=9,5-13,5$ м/с (б) и при $V_{0,3}=24-40$ м/с (в).

Представляют интерес такие вопросы: каковы основные причины захвата потоком твердых частиц и каковы факторы, ограничивающие транспортирующую способность потоков с твердыми примесями?

Г. И. Баренблатт, исследовав механизм взвешивания речных наносов, пришел к принципиальному выводу о том, что в этом механизме решающую роль играет пульсационная энергия потока, энергия быстрых изменений скоростей потока в любой его точке. Выводы Баренблатта оказались справедливыми и для метелей.

Работа метели по взвешиванию твердых частиц осуществляется за счет пульсационной энергии. Но если эта энергия тратится, значит, она уменьшается. Уменьшаются, гасятся пульсации потока, исчерпывается его транспортирующая способность. Так, основываясь на исследованиях Г. И. Баренблатта, можно объяснить наличие предельной транспортирующей способности взвесенесущего потока.

В настоящее время структура и динамика двухфазного пограничного слоя - предмет усиленных исследований, связанных, конечно, не только с интересами "метелеведения". Английские механики Дж. Оффин и С. Клайн считают, что, по-видимому, поверхностные струйки двухфазного потока тормозятся пульсациями давлений, вызванными пульсациями скоростей и объемных концентраций примесей. Заторможенные струйки выбрасываются вверх вместе с твердыми частицами, При этом образуются подковообразные вихри, схематично показанные на рис. 14. Раз возникнув, они служат инициаторами образования новых заторможенных струек, обеспечивая их регулярные взрывные выбросы вглубь потока и формирование все новых и новых себе подобных вихрей. Выбросы цикличны, и взвесь перемещается облачками или полосами параллельно фронту потока. Такие полосы хорошо заметны, когда метель проносится над незазанесенным полотном автомобильной дороги.

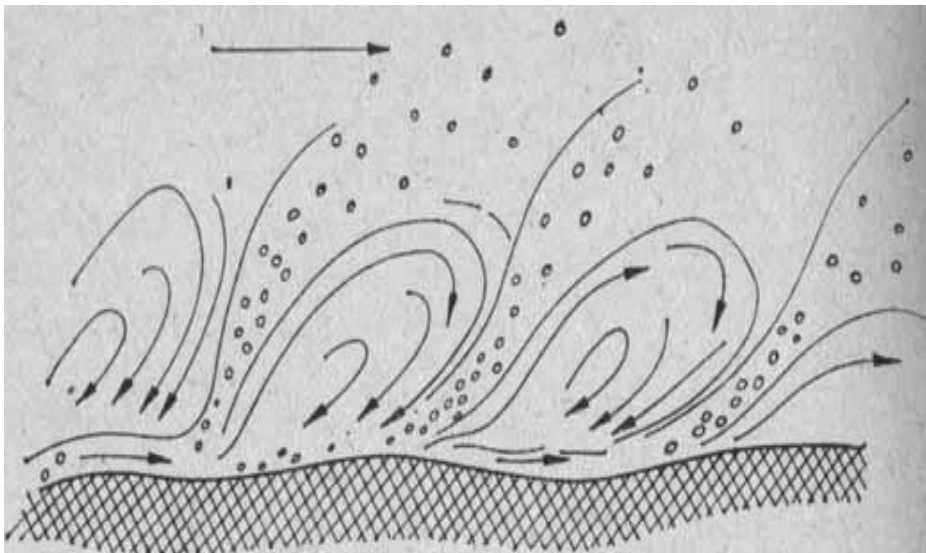


Рис. 14. Схема выбросов приземных струй и подковообразных вихрей в пограничном слое турбулентного потока.

Уменьшение пульсаций взвесенесущего потока имеет неожиданное следствие. Пульсации чистого турбулентного (При турбулентном движении жидкости или газа струи потока взаимно перемешиваются и параллельных струй, характерных для ламинарного режима, нет) потока значительно увеличивают касательные напряжения, появляющиеся между потоком и подстилающей поверхностью. Поэтому общее сопротивление, оказываемое движению, велико. Но в мутном потоке, насыщенном тяжелыми примесями, пульсации гасятся, и этот поток должен преодолевать меньшие сопротивления. Такое влияние примесей на турбулентность взвесенесущих потоков иногда называют демпинг-эффектом. Не этим ли объясняется ужасающий разгон жестоких буранов, срывающихся с прибрежных склонов ледяного купола Антарктиды?

Рамки и назначение книги не позволяют подробнее рассмотреть увлекательнейшие проблемы механики двухфазных потоков, подобных метелям. Современное состояние проблемы весьма обстоятельно освещено в обзорных работах О. Ф. Васильева, В. М. Лятхера, Р. И. Нигматулина, А. С. Гиневского, В. А. Иосилевича и др.

ПРЕДЕЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ПЕРЕНОСА СНЕГА

Еще сравнительно недавно думали, что снег, как и песок, способен перемещаться низовой метелью на огромные расстояния, на сотни километров. Но и тут низовым метелям положен предел по той же самой причине, по которой ограничивается высота (потолок) взвешивания мелких снежинок. Из-за ускоренного испарения снега метелевые частицы не могут переноситься на произвольно большие расстояния.

В предыдущей главе рассказывалось об испарении снега в спокойной среде. Знание основных свойств метелей позволяет рассмотреть сейчас очень сложное явление, сопутствующее метелям, - испарение снега, поднятого и перемещаемого ветром, или метелевое испарение снега. Практическая значимость этого явления в том, что именно оно определяет предельную дальность переноса снега, обозначаемую обычно буквой L_3 .

Ускоренное испарение метелевых снежинок происходит по двум причинам: во-первых, поверхность каждой частицы открыта со всех сторон, тогда как снежинка, лежащая на поверхности снежного покрова, способна испаряться лишь в одну сторону - вверх; во-вторых, летящие снежинки перемещаются относительно воздушной среды за счет пульсаций скоростей ветра и относительного движения частиц в воздушном потоке. Снежинки обдуваются ветром, что, естественно, ускоряет их испарение. Важность и необычность проблемы требует ее более детального рассмотрения.

Чтобы оценить величину L_3 , определим общий расход снега при низовой метели Q_n другим методом - методом баланса) снега в снегосборном бассейне (см. рис. 15).

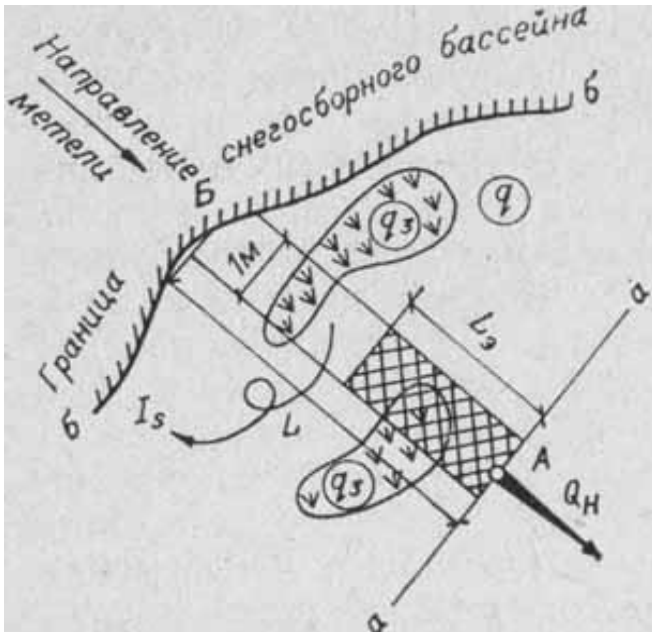


Рис. 15. К расчету переноса снега методом баланса.

Пусть от наветренной границы б - б снегосборного бассейна проведена по направлению метели полоса шириной 1 м. Найдем величину Q_H при пересечении метелью линии а - а, перпендикулярной направлению ветра, исходя из запасов и потерь снега в полосе АБ. Получаем баланс:

$$Q_H = T_c(q - q_3)L - I_s L \text{ (г/мс)},$$

где L - длина полосы АБ; T_c - коэффициент сдувания, имеющейся в бассейне массы снега q , отнесенной к единице площади поля, за вычетом удельной масс" снега q_3 , задерживаемой растительностью, оврагами, возвышенностями и понижениями; I_s - испарение снега, отнесенное к 1 м^2 снежного покрова. Имеем:

$$I_s = I + I_m,$$

где I - испарение с поверхности снежного покрова; I_m - испарение поднятых метелью и отделенных друг от друга метелевых частиц. Найдем метелевую часть I_s :

$$I_s = b_c I_0 N = (M_c / m) b I_0,$$

где I_0 - интенсивность испарения одной снежинки (г/с); b_c - коэффициент взаимного влияния снежинок в системе метелевого переноса; N - общее количество поднятых метелью снежинок, приходящееся па единицу площади полосы АБ; M_c - масса этих снежинок; m - масса одной снежинки. Упрощая выводы, считаем все снежинки одинаковыми.

Заметим, что $Q_H = u_{cp} M_c$, где u_{cp} - средневзвешенная скорость снежинок во всем метелевом слое. Следовательно,

$$I_m = b_c I_0 (Q_H / m u_{cp}) \text{ (г/м}^2 \text{с)}.$$

Введем обозначение $L_3 = m u_{cp} / b_c I_0$. Тогда $I_m = Q_H / L_3$, и из баланса снега сразу получим: $Q_H = (T_c(q - q_3) - I) / (1/L + 1/L_3)$.

При очень большом снегосборном бассейне, когда $L \gg L_3$, имеем:

$$Q_H \approx (T_c(q - q_3) - I) L_3,$$

то есть к линии а-а на рис. 15 как бы поступает только снег, сдуваемый с заштрихованной полосы длиной L_3 . Эта длина и названа предельной дальностью переноса снега.

Интересно, что инженер А. С. Чернявский еще в конце прошлого столетия дал эмпирическую связь между объемом снегоотложений за сутки и шириной равнины L :

$$Q_n = 0,0143 / (1/L + 1/1750).$$

Это одна из удачнейших догадок. Величина L_3 зависит от климата и не может быть постоянной. По А.С. Чернявскому, $L_3 = 1750$ м, что применимо для Западной территории СССР. В Западной Сибири $L_3 = 2-3$ км. В Арктике $L_3 = 5-10$ км. В Антарктиде, по данным В. М. Котлякова, $L_3 = 10 - 20$ км и более.

Расчеты и эксперименты показывают, что при метелях съем пара с поверхности снега с учетом летящих снежинок оказывается на 1-2 порядка больше, чем при безветрии. Очень велики потери снега ввиду его метелевого испарения. В Сибири снег часто выдувается метелями с открытых участков до самой поверхности земли при отсутствии таяния. Многочисленные наблюдения свидетельствуют о малости ветрового выноса снега в леса, овраги, балки и другие понижения по сравнению с его метелевым испарением.

Агроном М. Е. Черепанов исследовал, например потери снега на опытном поле Омского сельскохозяйственного института, защищенном от выноса снега и попадания его извне высокой насыпью и лесными полосами. За зиму 1963/64 г. выпало 120 мм твердых осадков (в водном эквиваленте). Из них к концу зимы осталось в полях, рощах, лесных полосах и понижениях 67 мм. Оттепелей не было. Все остальное исчезло путем возгонки.

Оголение полей от снега начинается в их наветренных зонах разгона и постепенно продвигается вглубь поля, так как туда смещается и начало зоны разгона, совпадающее с наветренным краем оставшегося снежного покрова.

В СССР исследования метелевого испарения снега ведутся с 1958 года. Проводятся аналогичные работы, причем весьма интенсивно, в США Р. Шмидтом, Р. Тэблером, М. Мартинелли. Можно считать доказанным и теоретически, и экспериментально, что метелевое испарение снега является существенной частью общего водного баланса в районах с развитым метелевым режимом. Это, по-видимому, открывает новую главу в современной гидрологии суши.

ЗАКОНЫ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ

Инженеру, проектирующему средства борьбы со снежными заносами, необходимо знать не только транспортирующую способность низовых и верховых метелей, но и при каких условиях снежные массы, несомые ветром, останавливаются, накапливаются и когда, где и при каких обстоятельствах они проносятся мимо, не угрожая заносами. Возникает понятие снегозаносимости инженерных объектов, т. е. степени их подверженности снежным заносам.

Если сооружение ослабляет ветер, а метель насыщена снегом, то отложения снега неизбежны. Снежные валы растут до тех пор, пока ветер на их вершинах не сравняется по скорости с полевым, набегающим ветром. При ненасыщенной метели отложения необязательны даже при заметном ослаблении ветра. В самом деле, пусть общий расход снега набегающей метели

$$Q_n = 0,077n(v_{\phi 1} - 5)^3,$$

где коэффициент насыщения $n = T_c/100 < 1$, $v_{\phi 1}$ - скорость ветра в поле перед сооружением. С другой стороны,

$$Q_n = 0,077n(v_{\phi 2} - 5)^3.$$

где $v_{\phi 2}$ - та скорость ветра, при которой метель была бы насыщенной ($v_{\phi 2} < v_{\phi 1}$). Тогда

$$v_{\phi 2} = (v_{\phi 1} - 5) \sqrt[3]{\eta} + 5.$$

Допустим, например, что $v_{\phi 1} = 25$ м/с, а $\eta = 0,3$ (в первых двух третях зоны разгона). В этом случае $v_{\phi 2} = 18,4$ м/с, когда набегающая метель становится насыщенной. Следовательно, скорость ветра в зоне сооружения может упасть до 18,4 м/с, то есть на 26%, без отложений снега.

Во многих случаях инженерным сооружениям можно придать такие формы, чтобы метели проносились через них, не образуя скоплений снега. Приведем пример автодорожных и железнодорожных насыпей. Пусть ширина насыпи поверху равна b , а ее высота - H . Если $b/H_n < 4$, то при поперечном обдувании насыпи за нею формируется обширная зона завихрений (см. рис. 16, а), где снег будет откладываться независимо от насыщенности метели, пробиваясь обратными течениями к подветренному откосу насыпи. При $b/H_n > 4$ происходит безвихревое обтекание насыпи (рис. 16, б). Такая насыпь, помещенная в зоне разгона метели, может стать незаносимой.

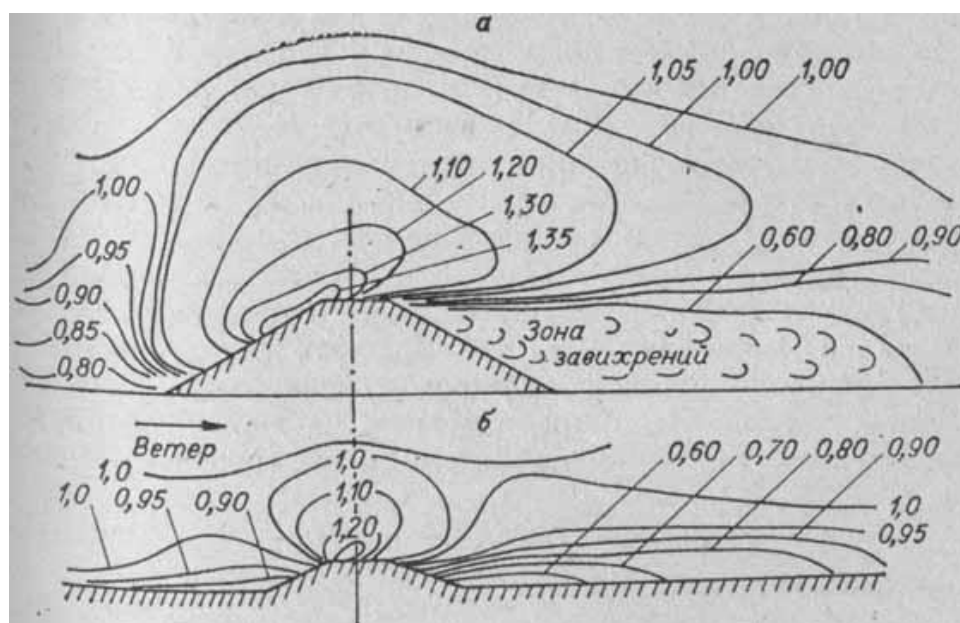


Рис. 16. Линии равных относительных скоростей (изотахи) при обдувании ветром моделей насыпей высотой 12 м (а) и 3 м (б). Масштаб моделей 1:100. Откосы 1:1,5.

Снег накапливается не только при уменьшении средней скорости полевого ветра. Волнообразные отложения, снежные барханы и сугробы возникают даже на гладком ледяном покрове озер и рек при сносе снега с берегов низовыми метелями, так как в насыщенном снеговетровом потоке величина Q_n претерпевает периодические колебания, пульсации разных частот, в том числе и низкочастотные. На рис. 17 представлено изменение Q_n вдоль аэродинамического капала. Отчетливо видны колебания Q_n после короткой зоны разгона, уменьшенной искусственным рыхлением снега. В точке А величина Q_n уменьшается с немедленным выпадением излишка снежного груза, а в точке В опять начинается прирост общего расхода снега, возмещаемого сдуванием рыхлого поверхностного слоя, и т. д.

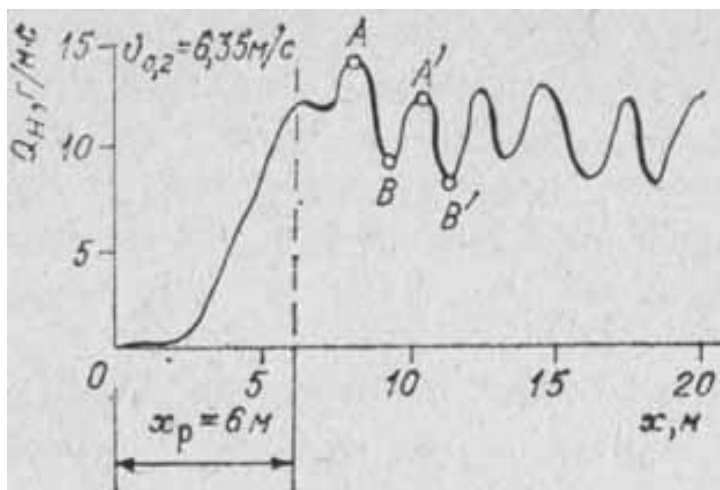


Рис. 17. Изменение общего расхода снега в аэродинамическом канале при $(Q_n)_{\max} = 14,35$ г/м·с.

МЕТЕЛЕВЫЙ РЕЛЬЕФ

Периодические колебания транспортирующей способности метели Q_n служат основной причиной того, что поверхность полевого снежного покрова становится неровной, похожей на некоторые формы рельефа песчаных пустынь и на донный рельеф рек с размываемым дном. Подобные формы не образуются при ненасыщенных метелях, так как в пределах зон разгона нет условий для аккумуляции взвесей и сальтирующих частиц.

В сильнометелевых районах чаще встречаются снежные волны длиной от 8 до 40 м и высотой от 0,05 до 0,3 м. Чем длиннее и выше волна, тем сильнее породивший ее ветер. Существуют и другие формы рельефа снежного покрова.

Периодическими перенасыщениями и недонасыщениями метелевого потока обусловлены крупномасштабные пульсации содержания твердых частиц. Неодинаковая крупность переносимых ветром снежинок вызывает микромасштабные пульсации с частотами 50 - 100 Гц и более. Они могут быть причиной тонкой снежной ряби, образующейся при не очень больших скоростях ветра. Пульсации концентрации твердых примесей в метелевых потоках исследовались с помощью фотоэлементов.

В. С. Матвиенко разработал шкалу соответствия форм рельефа снежного покрова скоростям ветра. По этой шкале в условиях Хибин он определял направление и силу штормовых ветров на больших площадях горных плато. Исследуемая площадь разбивалась на квадраты со стороной 100 м. В углах полученной сетки по формам снежного рельефа определялось направление ветра. Рельеф фотографировался камерой, ориентированной по компасу. Так удалось, например, выявить поле штормовых ветров на плато Ловчорр Хибинского нагорья и сравнить его с результатами продувания модели плато в аэродинамической трубе. Других средств получения такой же детальной картины пока нет.

Методы определения зимнего метеорологического режима по структуре и рельефу снежного покрова имеют большую перспективу и важное практическое значение для любых инженерных изысканий в слабо изученных районах.

Крупные формы рельефа хорошо различимы с космических орбитальных станций. На гребнях горных хребтов ветры навешивают громадные снежные карнизы, нависающие над пропастями своеобразными консолями шириной до 10 м. По ориентации и размерам карнизов можно судить о направлении и силе преобладающих горных ветров. Это важно для определения запасов снега в ущельях и оценки снегового стока горных рек.

Сейчас успешно развивается космическая гляциология, решающая земные снеговедческие проблемы путем наблюдений из Космоса. Советские экипажи космических кораблей в последние годы получают гляциологические задания. В 1979 году летчик-космонавт А. С. Иванченков впервые доложил на

Всесоюзном гляциологическом совещании результаты наблюдений экипажей орбитальной станции "Салют-6" во время 96-дневного полета зимой и 140-дневного полета летом 1978 года.

Преимущества космических съемок снежной и ледовой обстановки очевидны. Через каждые два дня космическая станция возвращается к месту предыдущей съемки, так что можно получить серию снимков одного и того же региона и судить о динамике гляциологических процессов в самых труднодоступных районах Земли. Помимо визуальных наблюдений экипажем станции "Салют-6" выполнялась периодическая съемка ледников и снежного покрова при помощи фотоустройств.

Любая дистанционная съемка земной поверхности, производимая с больших высот, должна обязательно сверяться с наземными геодезическими съемками. Такая сверка называется привязкой дистанционной съемки. Наземная привязка гляциологической космической съемки осуществляется в горах Памира, где полевыми исследовательскими партиями под общим руководством члена-корреспондента АН СССР Владимира Михайловича Котлякова создан постоянно действующий полигон дистанционного изучения горного снежного покрова и ледников.

При анализе материалов дистанционных съемок знание особенностей и закономерностей образований метелевого рельефа снежного покрова органически необходимо.

ГОРНЫЕ МЕТЕЛИ

Дистанционные съемки рельефа снежного покрова особенно важны в горах, где практически невозможно создать сеть метеорологических постов, достаточно густую для того, чтобы получить исчерпывающие данные о ветровом режиме. Начали также применяться автоматические микростанции, фиксирующие и передающие по радио основные метеорологические данные, включая скорость и направление ветра.

В горных районах крайне сложна ветровая обстановка, резко изменяющаяся не только на коротких горизонтальных расстояниях, но и по вертикали, что, естественно, сказывается на метелевом переносе снега. Кроме того, на метелевый перенос оказывает влияние рельеф местности. Положение осложняется крутыми горными склонами, недостаточными, как правило, размерами ровных площадок и плато для насыщения метелей снежным грузом. Эти размеры меньше длины зоны разгона метелей x_p . Как сказано ранее, в распределении снега в горах верховые метели играют значительно большую роль, чем на равнинах.

На рис. 18 приведена схема движения общей метели при пересечении ею возвышенности в горном районе. Скорость ветра v_x направлена слева направо. В наветренной зоне осадения А на части склона а-б вертикальная составляющая v_y скорости отклоняемого склоном ветрового потока меньше скорости падения снежинок w . В зоне сноса б - в шириной В ветер препятствует падению снежных частиц, и все они перебрасываются через вершину. В точке вгребня ветровой поток срывается, образуя большую вихревую зону в-г-д (3).

$$\frac{dh_z}{dt} = - \frac{1}{\rho_c} \frac{\partial Q_H}{\partial x} + \frac{q_v}{\rho_c} \left(1 + \frac{B}{b} - \frac{1}{w} \frac{\partial \chi H v_{cp}}{\partial x} \right).$$

В. С. Матвиенко впервые удачно применил это простое выражение для расчета накопления метелевого снега в огромных лавинных воронках Хибинского нагорья.

Выше сообщалось, что общие расходы снега при верховых метелях во много раз больше, чем при сильнейших низовых метелях. Заносы, вызываемые верховыми и общими метелями в горах, весьма велики, и борьба с ними представляет немалые трудности. Расчеты объемов снегопереноса, применяемые для равнин, в горах непригодны. Так, в степи, на слабопересеченной местности, при расчетах вполне обоснованно учитывают только низовую метель, поскольку здесь $(dQ_a/dx) \sim 0$. В горах вид метелей другой, и снегоотложение там подчиняется иным законам.

Схема, представленная на рис. 18, условна, ибо формы горного рельефа много сложнее, и задача их обтекания двухфазным потоком должна ставиться и решаться как пространственная. Фактически мы предполагали, что облачный слой расположен выше гор. Облака, разумеется, могут находиться и ниже вершин, в таком случае распределение осадков примет более сложный характер, и это должно быть предметом специальных исследований.

Перед учеными ставится комплексная теоретическая и экспериментальная задача - определить влияние турбулентных пульсаций ветра и концентрации примесей на отложения снега, что особенно важно в горах, где пульсационный режим ветра ярко выражен.

Изучение горных метелей лишь начинается. И надо сказать, это необычайно трудная и практически важная задача, без решения которой нельзя, в сущности, надежно прогнозировать возможные снежные заносы в горах и падение снежных лавин. Последние очень часто имеют метелевое происхождение.

"МЕТЕЛЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО"

Один из самых удивительных сюрпризов, преподносимых метелями и пылевыми бурями, - электризация пыли и снежинок, резкое увеличение градиента потенциала атмосферного электрического поля, или напряженности электрического поля, которая при сильных метелях может достигать 6000 В/м и более. Этого вполне достаточно для свечения остроконечных наземных предметов. В облаках снежной пыли иногда бывают синие и фиолетовые вспышки и сияния, появляются досадные радиопомехи.

На Крайнем Севере, в Сибири и даже иногда в Крыму во время сильных метелей и снегопадов случаются зимние грозы и шаровые молнии. Особо высокие градиенты электрического потенциала наблюдаются преимущественно при сильных общих метелях, низких температурах и сухом снеге. Многие исследователи считают основной причиной этого явления трение снежинок о воздух, друг о друга, о поверхность земли.

Очень сильные метели иногда заряжают телеграфные провода настолько, что подключенные к ним электрические лампочки светятся полным накалом. Ухудшаются электроизоляционные свойства воздуха, повышается опасность пробоя изоляции в высоковольтных электрических установках и линиях электропередач. Особую опасность представляет "метелевое электричество" для современных линий электропередач сверх высокого напряжения - до 1000-1200 кВ и более.

При взаимодействии заряженных метелевых частиц с электрическим полем приземного слоя атмосферы возникают силы электрического происхождения (пандеромоторные силы). В зависимости от знака электрических зарядов поверхности земли и самих свежиной последние или отталкиваются от земли, или притягиваются к ней. Установлено, что ускорение, вызванное этим фактором, невелико по сравнению с ускорением силы тяжести, так как максимум электрического заряда, удерживаемого мелкой частицей, и возможный максимум градиента электрического поля в приземном слое атмосферы ограничены.

Сравнительно недавно многие инженеры возлагали надежды на то, что "метелевое электричество" сможет обеспечить массовое взвешивание снежинок с перебросом их на больших высотах через дороги и поселки без образования заносов. Увы, этим чаяниям не суждено было сбыться.

По закону Кулона, ускорение e силы, действующей на частицу с зарядом T в кулонах (Кл), находящуюся в электростатическом поле с напряженностью E (Н/Кл), равно: $e = -TE(1/m)$ (m/c^2), где t - масса частицы (кг). По опытным данным, $(T/m)_{\max} \sim 0,2$ нКл/мг.

Заряды не могут быть больше этого максимума вследствие потерь в окружающую среду, то есть так называемых коронных разрядов. По измерениям градиента напряжения электрического поля во время очень сильных снежных и песчаных бурь найдено, что $E_{\max} = 10\,000$ В/м. Отсюда $E_{\max} = -0,2 \times 10^4 \times 10^{-9} \times 10^6 = 2$ м/с².

Следовательно, даже в экстремальных условиях ускорения сил электрического происхождения не превышают 20% от ускорения сил тяжести (9,8 м/с²).

Если заряд T и напряженность E одного и того же знака, то ускорение e отрицательно, и силы электрического происхождения направлены не вверх, а вниз. Это означает усиление притягивания к земной поверхности, а не действие против сил тяжести. Все исследователи электрических зарядов метелевых частиц нашли, что они, как правило, положительны. Отрицательно заряжаются обычно крупные, тяжелые частицы. Напряженность электрического поля в приземном слое воздуха всегда положительна, за исключением метелей на ледниках. Поэтому на большинство метелевых частиц действуют пондеромоторные силы, "прижимающие" их к земле.

Но возможные максимумы заряда T и напряженности E достаточно велики, чтобы объяснить вышеуказанные эффекты.

ЕСТЬ ЛИ МЕТЕЛИ НА МАРСЕ!

У земных метелей есть "космические родственники". Планеты-гиганты Юпитер, Сатурн, Уран состоят преимущественно из снега и льда. Полярные шапки на Марсе снежно-ледяные. Знаменитые марсианские бури могут быть как пылевыми, так и снежными метелями.

Универсальную формулу транспортирующей способности метелей (см. с. 51) вполне можно применить для Марса. Плотность атмосферы Марса в 100 раз меньше земной, а ускорение силы тяжести на этой планете меньше в 2,65 раза. Расчет показывает, что, несмотря на сильно разреженную атмосферу, общий твердый расход марсианских бурь может быть таким же, как и на Земле, если скорость ветра на Марсе всего лишь в три раза больше соответствующей на Земле. И совсем необязательно, чтобы пылевые частицы были много меньше земных.

Скорость ветра на периферии марсианского циклона, по измерениям "Викинга-2", около 20 м/с. В средних областях циклопа ветер может быть в несколько раз сильнее. Марсианские снежно-пылевые бури жестоки. Космонавтам полезно знать законы метелей и носить плотные противопылевые комбинезоны.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ "БЕЛАЯ СМЕРТЬ"

Казалось бы колов, присущий снегу, должен был сообщить ему оцепенелость зимы, а белизна - неподвижность савана. Однако это опровергается стремительным движением лавины. Лавина - это снег, ставший огненной печью. Она ледяная, но все пожирает.

Виктор Гюго. Человек, который смеется

В горах человека подстерегает немало опасностей. Бывают и землетрясения, и наводнения, и обвалы, и оползни. Один из самых коварных горных джиннов - селя, грязекаменный поток. Всем известны разрушительные сели, неоднократно угрожавшие столице Казахской ССР Алма-Ате.

Сели, землетрясения, наводнения отличаются скрытностью, отдаленностью своих основных очагов. Очаг селя, например, может отстоять от причиненных им разрушений на десятки километров.

Очаг снежной лавины весь на виду. Это - горный склон, нависший над долиной. От него, покрытого белоснежным одеянием, веет миром, спокойствием. И вдруг белизна рассекается трещиной. Снежная масса устремляется вниз со скоростью экспресса, с грозным оглушающим гулом. У подножия склона - внезапная остановка, удар, вздымающий вверх снежное облако. Лавина уничтожает все на своем пути (рис. 19). Нередко она порождает не менее опасную воздушную волну, мчащуюся дальше вглубь долины, хотя лавинный снег уже замер, уплотненный ударом.



Рис. 19. Здание, разрушенное лавиной.

Лавины - наиболее типичное и массовое явление в тех горных районах, где в достаточном количестве выпадает снег, явление коварное, внезапное и крайне опасное. В горах СССР ежегодно сходят десятки тысяч лавин. Об этом мало говорили и писали только потому, что основная часть наших горных территорий находилась лишь в начальной стадии освоения. Большой Кавказ и Хибинны давно ведут борьбу с этим врагом. С данной проблемой столкнулись в осваиваемых зонах Алтая, Сахалина, Кузнецкого Алатау, на горных участках западного крыла Байкало-Амурской магистрали, в горах Киргизской, Таджикской и Узбекской ССР.

В Швейцарских Альпах лавины называют Белой Смертью. Альпы осваивались и заселялись в течение тысячелетий. Поэтому именно альпийские горные системы явились "лавинной" школой для человечества. Альпийские стандарты защиты от лавин долго служили образцом при освоении других горных стран.

ГЕОГРАФИЯ ЛАВИН

О внушительных масштабах распространений лавинной опасности в СССР можно судить по карте (см. рис. 20). Она составлена под руководством профессора Георгия Казимировича Тушинского. Сходу лавин подвержено около 4,5 млн. км² горной территории нашей страны, что равно по площади ста восьмью Швейцариям. Давно известные лавинные очаги на Кавказе и в заполярных Хибинах выглядят на карте мелкими пятнышками по сравнению с обширными лавиноопасными участками в горах Средней Азии, Южной Сибири, Забайкалья, Дальнего Востока и почти всего Северо-Востока. Это районы разной степени

освоенности: горы Тянь-Шаня, Памиро-Алая, Саяны, Забайкальская горная страна, которая сейчас пересекается БАМом, Северо-Восток и Камчатка. Они находятся лишь на пороге транспортного и народнохозяйственного освоения, по мере которого интерес к проблемам лавин будет нарастать. Изучение лавинной обстановки должно, конечно, сильно опережать освоение этих Районов, так как речь идет о сохранности государственного имущества и человеческих жизней.

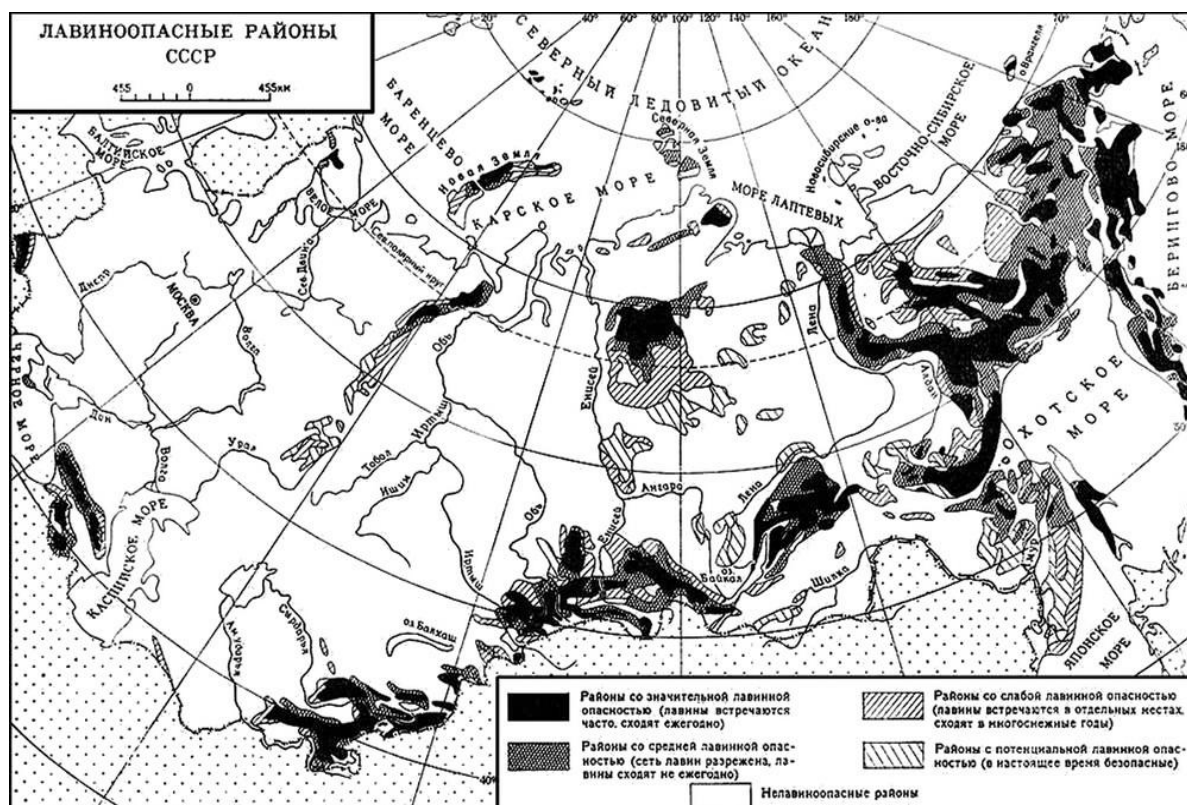


Рис. 20. Карта лавинной опасности СССР. Составлена под руководством проф. Г. К. Тушинского.

1 - опасность значительная. Лавины сходят ежегодно; 2 - степень опасности средняя. Бывают годы без схода лавин; 3 - слабая опасность. Сход лавин только в многоснежные зимы; 4 - потенциальная опасность.

Приводимая карта дает лишь общее представление о масштабах лавинной опасности. Обследование горных территорий, где могут сходить лавины, должно быть детализированным. Первые шаги в этом направлении делаются. Доктор географических наук Виктор Семенович Ревякин выполнил первое детальное инженерно-гляциологическое районирование Алтайской горной страны, едва не поплатившись жизнью при встрече с сокрушительной лавиной.

Но и такой детальной карты недостаточно для того, чтобы уверенно выбрать средства защиты от Белой Смерти. Каждый лавинный очаг индивидуален, огульный подход ко всем очагам недопустим для инженера. Нужна по-очаговая паспортизация лавин с подробными крупномасштабными планами каждого очага и прилегающей к нему местности, с детальной описанием его лавинной активности.

Эта чрезвычайно трудоемкая работа была выполнена для трассы Байкало-Амурской магистрали экспедициями МГУ под общим научным руководством профессора Г. К. Тушинского. Исследования длились с перерывами с 1946 по 1975 год.

Лавинная опасность на БАМе, снежные массы, собирающиеся на склонах Байкальского, Северо-Муйского, Удоканского, Кодарского хребтов, оказались неожиданностью для многих железнодорожников и геофизиков, привыкших к бесснежью давно действующей Забайкальской железной дороги. Но строители БАМа своевременно получили "лавинную информацию". Однако так бывает не всегда.

Поучительна история с сооружением санатория "Сахалин" у подножия горы Джамбул на Южном Сахалине. Здания здравницы решили построить на невысокой пологой возвышенности, сложенной из

прочного крупнообломочного материала. Склон горы Джамбул выделялся живописным ярко-зеленым разнотравьем на фоне более темных водоразделов, покрытых хвойной растительностью. Природа радовала глаз, и все согласилось, что это наиболее подходящее место для отдыха. Никто не предполагал, что выбранный участок оказался на конусе выноса мощного лавинного лога, что яркая зелень означает лишь "опоздание весны" после длительного таяния снега в логу, где могут существовать только угнетенная береза, трава и мелкий кустарник, тогда как более крупные представители растительного мира давно сброшены лавинами вниз.

В январе 1965 года (через несколько дней после открытия санатория) лавина объемом 8500 кубических метров произвела такие разрушения и повреждения корпусов, что восстановление и ремонт зданий, а также создание противолавинных защитных устройств обошлись едва ли дешевле строительства самого санатория.

ФИЗИКА ЛАВИН

До середины XX столетия подлинной науки о лавинах не было. Все публикации, посвященные этому стихийному бедствию, имели описательный или сугубо эмпирический характер. Методы защиты от лавин создавались на трудных и извилистых путях проб и ошибок, опытных поисков, редких удач, частых разочарований. И почти одновременно в нескольких странах появились энтузиасты, взвалившие на себя тяжкий груз создания научной упорядоченности в этой сложнейшей проблеме. В нашей стране таким первопроходцем стал профессор Георгий Казимирович Тушинский (1909-1979).

Он по праву считается основателем инженерной гляциологии вообще, но именно снежные лавины - главное поприще Тушинского. Его классическая монография "Лавины", изданная в 1949 году, стала настольной книгой гляциологов.

Что же такое снежная лавина?

Лавиной называется быстрый сход с горного склона снежного покрова под действием силы тяжести. Низвергающиеся снежные массы увлекают с собой талую воду, грунт, растительность, но в лавине всегда преобладает снег.

Еще не так давно никто толком не знал, как выглядят эти снежные массы. Они низвергались молниеносно, и спасающимся свидетелям было не до того, чтобы устанавливать их форму и свойства. Напрашивался тривиальный образ снежного кома, катящегося по склону горы и увеличивающегося в размерах за счет налипания снега. В отличие от обычного снежного кома лавина казалась гигантским шаром, катящимся по очень длинным, протяженностью в сотни метров склонам. Так на одном старинном рисунке изображена лавина, обрушившаяся в 1517 году на императора Священной Римской империи Максимилиана Первого и его свиту. До XIX столетия лавину так и представляли шаром или совокупностью снежных шаров или комьев.

В действительности все оказалось намного сложнее. Вначале снег, отложившийся на горном склоне, начинает постепенно и медленно сползать. Верхние слои снега опережают при сползании нижние. Самый нижний слой, примыкающий к грунту, часто остается на месте. Такое же распределение скоростей наблюдается в слоях текущей жидкости. Снег как бы "течет" по склону.

Когда скорости и напряжения в этом потоке достигают каких-то критических пределов, медленное течение скачкообразно переходит в бурный лавинный поток. Как показано на рис. 21, на некотором расстоянии от гребня склона в снежном покрове образуется линия отрыва. За нею начинается беспорядочный сход нижележащего снега, увлекающего за собой все новые и новые снежные массы по пути следования, называемому зоной транзита. Масса низвергающихся комьев снега с воздушными промежутками между ними называется лавинным телом.

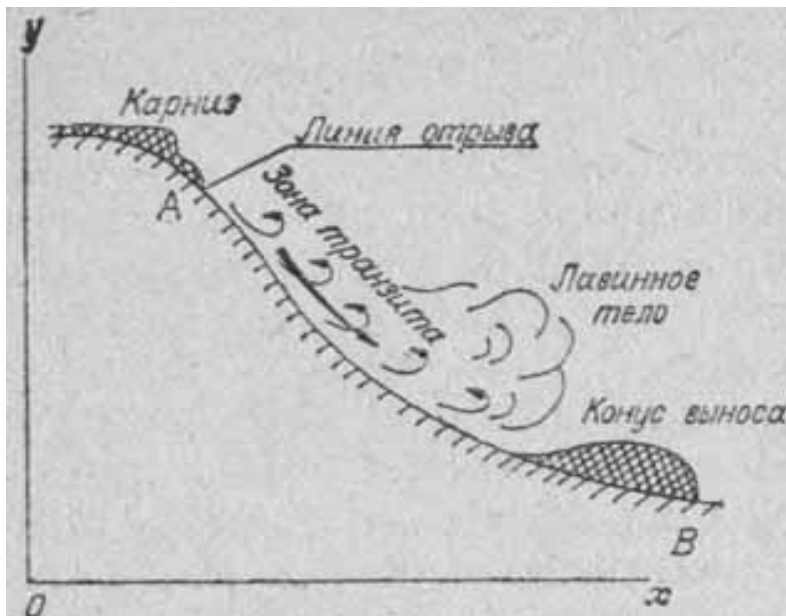


Рис. 21. Схема движения лавины.

У выхода в долину склон становится положе, и скорость лавины уменьшается вплоть до полной остановки. Горы снега нагромождаются в виде лавинного конуса выноса. Начало и конец движения типичны почти для всех лавин, но сами лавинные потоки существенно отличаются друг от друга.

Различно ведут себя лавины из сухого, морозного и влажного снега. Они так и называются сухими и мокрыми лавинами.

Движение лавин зависит от формы и размеров склонов. На плоских склонах лавина движется в виде сплошных осовов. Вдоль логообразных понижений образуется сосредоточенный лавинный поток. Крутые обрывы лавина преодолевает прыжками. В Хибинах известны случаи, когда мощная лавина прыжком переносилась через дамбу тридцатиметровой высоты и обрушивалась на защищаемые ею сооружения,

Скорость лавин достигает 30-100 м/с, объемы вовлекаемого при этом снега - от сотен до миллионов кубических метров. Высота снежных конусов в зоне остановки лавины от 5 до 20 м, их плотность $0,6 \text{ т/м}^3$ и более. Падение снежных масс, как выше сказано, может сопровождаться воздушной волной, способной разрушить сооружения. Знаменитая катастрофа 29 февраля 1908 года в швейцарском городке Гоппенштайне была вызвана именно воздушной волной, так как сама лавина среднего объема остановилась в нескольких метрах перед отелем. Тем не менее отель был полностью разрушен, его крыша унесена воздушной волной на противоположный склон долины. Постояльцы перед этим устроили веселую пирушку. Двенадцать человек, сидевших лицом к горе, были задушены перепадом давлений.

Защита от лавин, борьба с ними немыслима без знания закономерностей, управляющих лавинами.

Что же такое лавина как физический феномен? Она, как и метель, должна быть предметом изучения механики многокомпонентных сплошных сред. Но если в снежной буране роль активного компонента принадлежит воздуху, а снег увлекается воздушным потоком, то в снежной лавине компоненты меняются ролями. Снег, низвергающийся по склону, увлекает за собой примыкающий к нему воздушный слой и становится активным компонентом.

Концентрация энергии в теле лавины неизмеримо больше, чем в самых сильных метелях. Зато район ее действия ограничен, локален. Площади лавинных очагов редко превышают 1 км^2 . Максимальные площади зон действия снежных буранов оцениваются миллионами квадратных километров. В целом обе эти снежные фурии по наносимому ущербу не уступают друг другу.

Главной задачей теории борьбы с лавинами теперь, как и прежде, является исследование динамики образования снежных нагрузок на склоне, динамики течения снежного пласта по наклонной

подстилающей поверхности и динамики самой лавины. Надо признать, что по всем этим направлениям теория борьбы с лавинами продолжает находиться в начальной стадии схематизации и упрощений.

Накопление снега на склонах еще слабо изучено. Плохо исследована роль метелевого снега. Механически перенести результаты теории метелей в равнинах на горные условия нельзя, так как горные метели, как отмечалось в предыдущей главе, существенно отличаются от равнинных.

Геофизики А. Г. Гофф и Г. Ф. Оттен в качестве первого приближения принимали движение лавины как материальной точки по второму закону Ньютона:

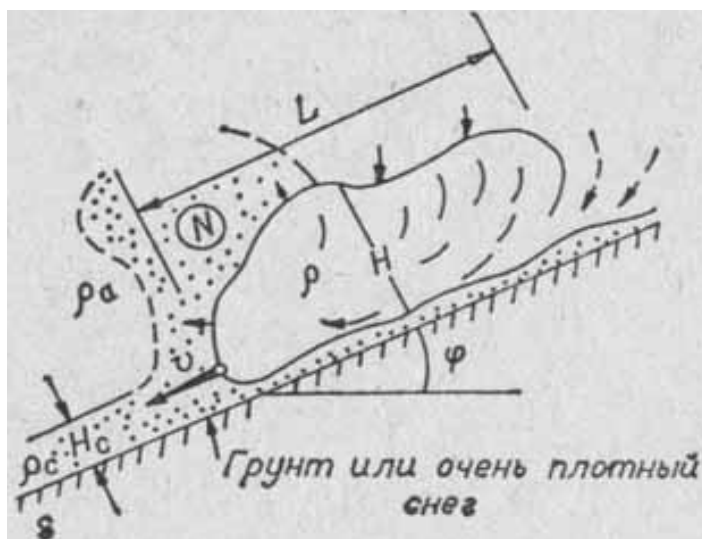
$$m_{\text{л}} \frac{\partial v}{\partial t} = -mg \sin \varphi - K,$$

где v - скорость лавины по направлению склона (м/с), $m_{\text{л}}$ - масса лавины (кг); g - ускорение силы тяжести (м/с²); φ - угол наклона по отношению к горизонту; K - главный вектор сил сопротивления движению лавины (м/с²).

Простейшая модель движения лавины, предложенная А. Г. Гоффом и Г. Ф. Оттенем, применяется в снеголавинных расчетах до настоящего времени, хотя она далеко не всегда соответствует движению реальных лавин. Она, например, вовсе не подходит для особого случая сухих лавин - пылевидных с очень малой массовой концентрацией снега.

Пылевидные лавины - поразительное явление. Мне привелось побывать в Хибинах на берегу озера Малый Вудъярви недалеко от остатков коттеджа, построенного в двадцатых годах для академика Александра Евгеньевича Ферсмана. Коттедж располагался в живописном месте, под горой. Вся нижняя часть склона горы заросла густым лесом. Но вскоре после постройки коттедж был уничтожен пылевидной лавиной, свободно просочившейся с горы через лес, оставшийся невредимым до настоящего времени. Пылевидные лавины здесь могут, не задев ни одного деревца, перелететь через береговой обрыв озера и жестоким ударом пробить двухметровый озерный лед, превратив его в крошево.

Рис. 22. Схема пылевидной лавины H_0 , L - высота и длина лавинного облака; φ - угол склона; v - скорость фронта лавины; ρ , ρ_a , ρ_c - массовые плотности лавины, атмосферы, снежного покрова соответственно; H_c - высота снежного покрова.



На рис. 22 приведена схема движения пылевидной лавины по Е. Гопфингеру и Дж. Тохон-Дэнгаю². Все обозначения на ней объясняются в подрисуночной надписи.

Лавина "врезается" в достаточно рыхлую часть снежного покрова глубиной H_c , взметая его полностью или частично. Перед фронтом лавины образуется стоячее облако N снежной пыли, подхватываемое затем

лавиной. Плотность лавинного тела ρ_l незначительна и подчинена лишь условию $\rho_l > \rho_a$, где ρ_a - плотность атмосферы.

Если считать, что для пылевидной лавины ее ускорением dv/dt в зоне устойчивого движения можно пренебречь, а кулоново трение практически отсутствует из-за малой плотности, то $mg \sin \varphi = f$, где f - сопротивление внешней среды, пропорциональное квадрату скорости v . С учетом архимедова взвешивания уравнение баланса сил запишется в виде

$$Q(\rho_l - \rho_a)g \sin \varphi = sc_1(\rho_a v^2/2),$$

где c_1 - безразмерный коэффициент сопротивления; Q - объем лавины; s - площадь контакта с внешней средой, воспринимающая сопротивление последней.

Имеем $Q/s = V_l H_0$, где V_l - коэффициент формы лавинного облака. Следовательно,

$$v = \sqrt{\frac{2\beta_l H_0}{c_1} \left(\frac{\rho_l}{\rho_a} - 1 \right) g \sin \varphi}. *$$

*Вывод подсказан чл.-кор. АН СССР О. Ф. Васильевым

Скорость пылевидной лавины возрастает с увеличением ее размера H_0 и плотности ρ_l . Этот вывод соответствует опытным данным Гопфингера и Тохон-Дэнга. При встрече с препятствием плотность ρ_l резко возрастает в лобовой части лавины, обуславливая рост ударной силы.

В настоящее время предпринято немало попыток создания гидравлической модели лавин как потока однородной сплошной среды. В 1965 году в Институте механики МГУ сформирована группа исследователей во главе с профессором Самвелом Самвеловичем Григоряном для решения проблемы механики лавин.

Можно сказать, что гидравлические модели снежной лавины в первом приближении созданы. Вот одна из них: в начальный момент склон считается покрытым однородным слоем снега, затем начинается смещение лавины сверху в виде большой капли однородной вязкой жидкости, конец которой закреплен на гребне склона. Голова капли растет за счет попутного присоединения порций снега и собственного движения, что очень похоже на реальные условия. Но многое еще предстоит сделать, чтобы эти модели довести до стадии инженерных расчетов.

Никакими чисто теоретическими выкладками нельзя заменить отсутствие опыта при изучении такой сложного природного явления, как лавина. Тут теория должна идти бок-о-бок с опытными наблюдениями,

Важность защиты от лавин сейчас настолько возросла, что Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды организовал почти во всех осваиваемых лавиноопасных районах специальные снеголавинные станции (СЛС) для изучения лавин на местах и предупреждения катастроф. Организуют подобные стационарные пункты и другие-учреждения.

Снеголавинные стационары созданы на Кавказе, БАМе, Сахалине, в Средней Азии. Сеть их расширяется. В перспективе можно надеяться, что будет организована единая государственная снеголавинная служба СССР для защиты людей и имущества от лавин с правом наложения санкций и запретов.

Но какова бы ни была сеть полевых снеголавинных стационаров, она не может охватить огромные горные территории с сильными метелями и лавинной активностью. Да и не всегда достаточно полевых наблюдений. Например, прежде чем строить опытные защитные сооружения, их надо рассчитать. Расчет же, как уже сообщалось, не всегда бывает возможен. Во многих случаях без физического эксперимента не обойтись. Заманчиво изучить работу защитных сооружений на их малых моделях в аэродинамических трубах. Но при этом надо строго соблюдать физические условия подобия натуры и модели.

Следует оговориться, что маломасштабное моделирование таких многокомпонентных потоков, как метель и лавина, принципиально невозможно. Физика этих потоков очень сложна, и комплекс условий подобия при их маломасштабном моделировании взаимно противоречив. Поэтому моделирование метели и лавины³ возможно только в натуральном масштабе 1:1.

Теория, полевые наблюдения, эксперимент - таковы главные направления изучения и укрощения Белой Смерти, Цель этих исследований не просто познавательная. Гляциологи должны дать инженерам четкие ответы на вопросы: где можно и где нельзя разворачивать строительство дорог, жилья и предприятий в горных лавиноопасных районах? Как рассчитать прочность инженерных сооружений на прямой удар лавины? Как предвидеть сход лавины?

ДАЛЬНОСТЬ ВЫБРОСА ЛАВИН

Для строителей важно знать так называемую дальность выброса лавин, обозначаемую буквой $l_{\max}$. Если она надежно определена, то нетрудно наметить зону безопасного отдаления от лавинного очага, где можно строить, работать, жить, не боясь ударов грозного соседа.

На рис. 23 показан план типичного лавинного лога с контурами зон действия трех лавин (I-III). Контур лавины заштрихован. Лавина II сошла выше, но остановилась раньше лавины I. Самой крупной была лавина III. Дальность ее выброса оказалась максимальной.

Дальностью выброса лавины называется расстояние, измеренное по горизонтали от линии ее отрыва до границы распространения конуса выноса. Снег начинает соскальзывать не на самой вершине склона, а на 30-50 м ниже ее, где образуется отчетливо выраженная линия отрыва сошедшей лавины от вышележащего снежного покрова, остающегося на месте (см. рис. 21). Если превышение точки отрыва лавины А над точкой ее остановки Б (рис. 21) равно h , то $l_{\max} = h / (\operatorname{tg} \alpha)_{\min}$, где α - угол между линией АБ и горизонтом. Остановка лавины приурочена, как правило, к пологому выходу лога в долину или ущелье, поэтому превышение h почти не зависит от дальности выброса $l_{\max}$, для определения которой, таким образом, достаточно знать только $(\operatorname{tg} \alpha)_{\min}$.

В. П. Благовещенский изучил 700 лавинных очагов Хибин и Западного Кавказа, определив $(\operatorname{tg} \alpha)_{\min}$ по надежно видимым на местности границам максимального выброса лавин. Важнейшими параметрами оказались площадь $F_{\text{сб}}$ и средний угол $\phi_{\text{ср}}$ склона. На рис. 24 показана графическая зависимость $(\operatorname{tg} \alpha)_{\min} = f(F_{\text{сб}}, \phi_{\text{ср}})$. Эти связи весьма тесны для таких резко отличающихся горных зон, как Хибин и Кавказ.

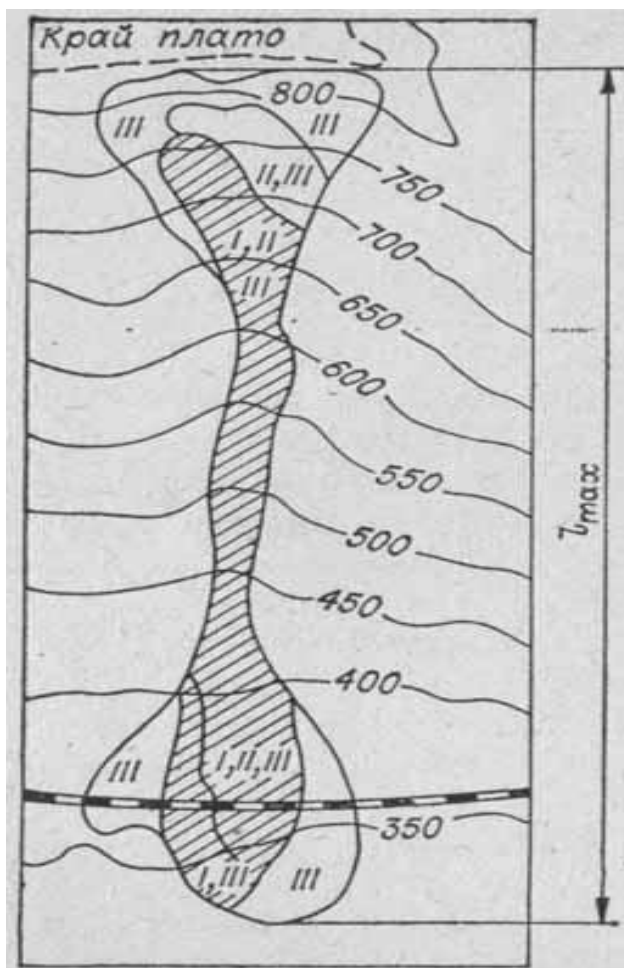


Рис. 23. Дальность выброса $l_{\max}$ типичной лавины.

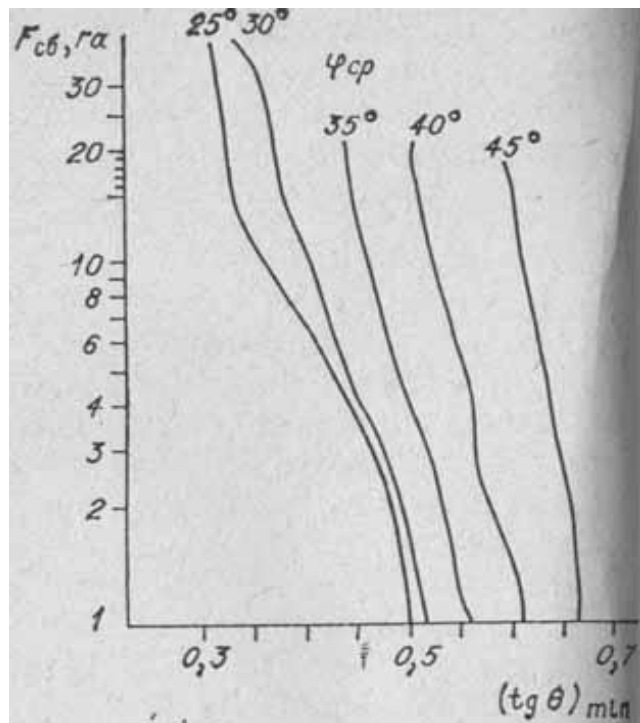


Рис. 24. Зависимость между площадью лавиносбора F_{cb} , средним углом склона φ_{cp} и минимальным параметром трения $(tg\theta)_{\min}$ по В. П. Благовещенскому.

По крайней мере в случае схода сухих лавин $(tg\theta)_{\min}$ даже для громадных лавиносборов площадью до 40 га не меньше 0,3 (см. рис. 24). В. Н. Аккуратов установил, что для большинства лавинных очагов на

Шпицбергене $(\text{tg}\alpha)_{\min} = 0,4$. График, построенный по данным В. П. Благовещенского, можно, вероятно в первом приближении принять для примерной оценки максимального дальнего действия лавин и в других горных районах.

УДАР ЛАВИНЫ

Отдалиться на безопасное расстояние от лавинного очага чаще всего не удастся. Но строительство в зоне активной лавинной деятельности немыслимо без применения защитных мер. Инженерные объекты, как будет отмечено в следующей главе, необходимо здесь ограждать защитными сооружениями, способными устоять под сокрушающими ударами. Надо уметь определять их силу.

Удар лавины о преграду рассчитывали до настоящего времени по формуле инженера Г. Г. Саатчяна, предложенной в 1936 году:

$$F_{\text{л}} = T_{\text{л}} \rho_{\text{л}} v^2 \sin \alpha, \text{ н/м}^2,$$

где α - угол встречи лавины и преграды; $\rho_{\text{л}}$ - массовая концентрация снега в лавинном теле; $T_{\text{л}}$ - коэффициент пропорциональности, равный 1,2-2,0.

До последнего времени очень мало занимались непосредственными измерениями удара лавин. Лишь теперь накоплен необходимый опытный материал, достаточный для обобщений. Опытные данные получены тремя способами:

- 1) измерением ударных воздействий снежных комьев размером 0,4-0,6 м, сбрасываемых с высоты 4-12 м на жесткие плиты, снабженные механическими и пьезоэлектрическими датчиками давлений;
- 2) измерением ударов естественных лавин по вертикальным плитам специальных установок, построенных в Швейцарии, Австрии, на Кавказе, Южном Сахалине, в Хибинах, Кузнецком Алатау и Горном Алтае;
- 3) измерением ударов о препятствия больших снежных блоков в специальных лотках, моделирующих движение лавин. Такие лотки созданы в Швейцарии (гора Вайсфлуйох), Японии (Хоккайдо), на Кавказе (гора Чегет), Южном Сахалине (25-й километр линии Южно-Сахалинск - Холмск).

Представляют интерес лавиноударные установки и лавинные лотки. Самое крупное лавиноударное устройство построено на одном из опаснейших логов Хибинского нагорья в 1967 году по проекту сотрудника Проблемной лаборатории селей и лавин МГУ А. Ф. Липатова. Устройство имело ширину 2,1 м, выступая над поверхностью склона на 9 м. Ударные датчики состояли каждый из двух стальных дисков диаметром 30 см. Наружный диск имел три конуса из закаленной стали. По диаметру отпечатков после вдавливания конусов в дюралюминиевую пластину, скрепленную с внутренним диском, определялось максимальное давление с некоторой неопределенностью, так как вдавливание конусов зависит не только от ударного давления налетающих на установку блоков, но и от количества и частоты ударов.

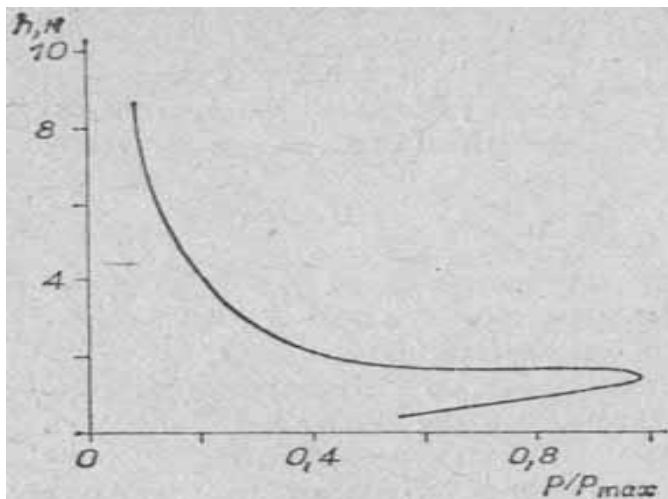


Рис. 25. Распределение ударного давления лавины по высоте, отнесенного в $p_{\max}$ на высоте около 1,3 м.

За 12 истекших лет на установку налетали десятки мощных лавин с максимальными ударными давлениями до 1070 кПа, что равноценно 110 т/м^2 . В результате уникальной серии измерений впервые получено распределение ударных давлений по высоте, изображенное на рис. 25. Оказалось, что главное ударное действие сухих лавин сосредоточено в нижнем двухметровом слое. Максимальный удар приходится на высоту 1,3 м, ниже и выше которой давления резко уменьшаются. Открывается, таким образом, возможность пропуска лавин под мостами, переброшенными через транзитный лог. Такое еще не встречалось в лавинозащитной практике.

Швейцарский лавинный лоток построен в 1961 году по проекту профессора Бруно Зальма рядом с Институтом снега и лавин на вершине склона горы Вайсфлюйох, у подножия которой расположен город Давос. Лоток длиной 20 м и шириной 2,5 м установлен на металлической ферме, которая может опускаться и подниматься на домкратах с изменением угла наклона лотка от 35° до 50° . Скорости снежных блоков перед ударом доводились до 10-13 м/с.

Самый близкий к натурным условиям лавинный лоток сооружен на Южном Сахалине в 1968 году под руководством доктора технических наук Эдуарда Петровича Исаенко. Протяженность зоны скольжения около 100 м. Сечение $2 \times 2 \text{ м}^2$. Днище и стенки лотка покрыты полиэтиленовой пленкой, резко снижающей сопротивление движению снежных блоков, мчащихся со скоростью до 35 м/с.

Лоток моделирует лавину в масштабе 1:1. Высота лотка для этого достаточна, так как мощность наиболее плотного слоя в настоящих лавинах не превышает 2-4 м. В лотке можно измерить не только силу удара снежных масс о препятствия, но и их скорость, силы трения, возникающие при их скольжении, фиксировать процесс расчленения и разрушения блоков.

В. И. Ядрошников попытался обобщить все известные и опубликованные данные опытных определений ударов снежных агрегатов по стенкам, расположенным перпендикулярно к направлению их движения. Были использованы решительно все эксперименты, начиная от падения мелких снежков размером 0,14 м до ударов искусственных и природных лавин с размерами ударяющих масс до 15 м и более. Ядрошников применил аппарат теории подобия и размерностей и нашел, что все опытные данные подчинены единым связям между известными в гидродинамике критериями Эйлера (Eu) и Фруда (Fr).

По Ядрошникову

$$Fr = u^2 / g \sqrt{S}, \quad Eu = p / \rho u^2,$$

где u - скорость лавины (м/с); g - ускорение силы тяжести (м/с^2); S - площадь продольного сечения ударяющей снежной массы (м^2); p - нормальное ударное давление (Па); ρ - массовая плотность

лавинного снега (кг/м^3). На рис. 26 изображена опытная зависимость критерия Eu от Fr . По абсциссе отложены значения $\sqrt{Fr}$, а по ординате - значения Eu . Прослеживается явная гиперболическая связь между Eu и Fr : $Eu = f\sqrt{Fr}$, поэтому $p = f\rho g^{1/2}S^{1/4}$ и, где f - безразмерный коэффициент.

Найденная закономерность свидетельствует о том, что ударное давление лавины пропорционально первой степени ее скорости, а не ее квадрату, как это следует из формулы Г. Г. Саатчяна. Впервые линейная связь между ударом снежных масс и их предупредительной скоростью установлена в 1964-1967 годы А. Ф. Липатовым и В. И. Салицкой при сбрасывании снежных образцов с высоты 7-24 м на горизонтальные плиты с тензометрическими датчиками давлений.

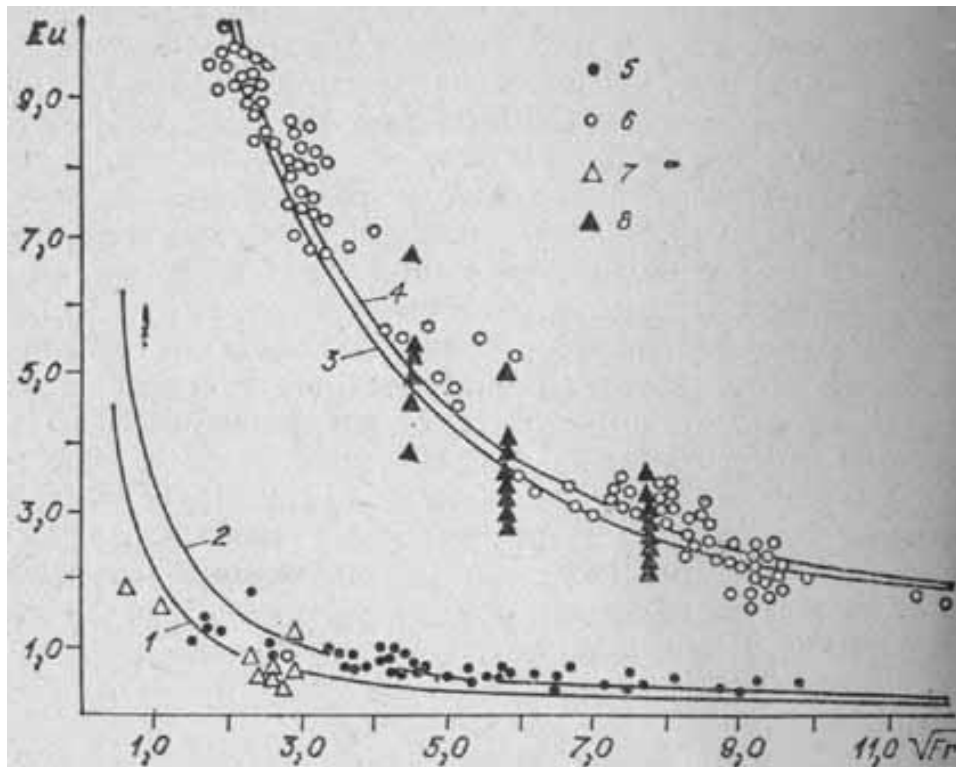


Рис. 26. Зависимость критерия Eu от критерия Fr при ударах снежных масс о преграды.

1 - размер ударяющей снежной массы 6-15 м; 2 - то же, 1-1,5 м; 3 - то же, 0,6 м; 4 - то же, 0,14-0,34 м.

Опытные данные: 5 - НИИЖТа; 6 - А. Ф. Липатова и В. И. Салицкой; 7 - Ю. Л. Якимова и Л. Е. Шуровой; 8 - В. Н. Ржевского.

Тогда их сообщения не принимались всерьез и не учитывались при составлении в 1975 году "Указаний по расчету снеголавинных нагрузок", действовавших до 1980 года. В "Указаниях" по-прежнему рекомендовались формулы, в которых давление лавин зависело от квадрата их скорости. Нетрудно видеть, насколько завышены были эти расчетные давления. При изменении расчетной скорости лавин от 20 до 40 м/с реальные ударные нагрузки увеличивались вдвое, а по "Указаниям" в 4 раза. Поэтому и защитные сооружения, воспринимающие удар лавины и запроектированные по "Указаниям", оказывались чрезвычайно громоздкими и дорогими.

Линейная связь между ударом лавины и ее скоростью объясняется, по-видимому, тем, что удар наносит не жесткая глыба, а легкодеформируемая снежная масса. При ударе значительная часть кинетической энергии лавины, равной $\rho v^{2/2}$, тратится на деформацию лавинного тела.

Конечно, закономерность, показанная на рис. 26, справедлива лишь для опытного диапазона скоростей снежных масс, не превышающих 45 м/с.

ПРОГНОЗ ЛАВИН

Пожалуй, самая первоочередная задача при освоении лавиноопасных районов - предвидение схода лавин, оказавшаяся и самой трудной задачей. Инженер Г. Г. Саатчян впервые исследовал условия возникновения лавин.

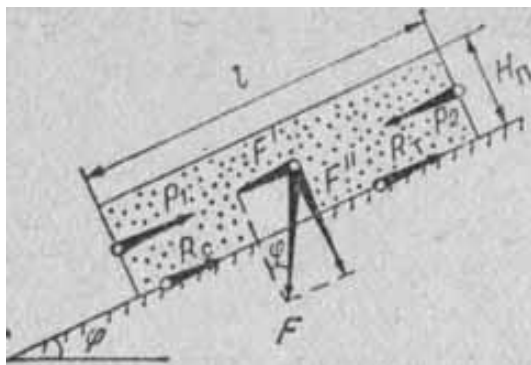


Рис. 27. К расчету устойчивости снега на склоне.

Устойчивость снега на склоне под углом к горизонту ϕ определялась им как для абсолютно жесткого пласта, находящегося под действием сил тяжести F , трения R_r и сцепления R_c (рис. 27). Пласт испытывает давления p_1 , p_2 от нижележащего и вышележащего снежного покрова. Пусть высота пласта H_n , его длина l . Разложив F на составляющие F' , параллельную склону, и F'' , ему перпендикулярную, найдем;

$$F' = F \sin \phi; F'' = F \cos \phi;$$

$$F' = D\rho H_n + R_c + R_r; F = H_n l \rho_c g,$$

где ρ_c - массовая плотность снежного пласта; $D\rho = \rho_1 - \rho_2$.

Но сила трения на наклонной поверхности равна нормальному давлению на поверхность, умноженному на коэффициент кулонова трения $\tan O$, где O - угол внутреннего трения снега, т. е. $R_r = F'' \tan O$. Отсюда

$$H_n l \rho_c g \sin \phi = cl + H_n l \rho_c = g \cos \phi \tan O + D\rho H_n l,$$

где c - напряжение сцепления, $H/\text{м}^2$. Окончательно имеем:

$$H_n = (c \cos O) / (\rho_c g \sin (\phi - O) + D\rho).$$

Это и есть критическая, опасная высота снежного покрова.

Конечно, факторы лавинной опасности многочисленны, и величина H - лишь один из них. Прежде всего, условия возникновения лавин определяются типом последних.

М. Отуотер различает два типа лавин: кратковременного и замедленного действия. Первые находятся в тесной причинной связи с внешними, а также погодными факторами. Главная причина лавин замедленного действия - длительные внутренние изменения в самом снежном покрове. Надежно установить опасность подобных изменений можно с помощью рытья шурфов.

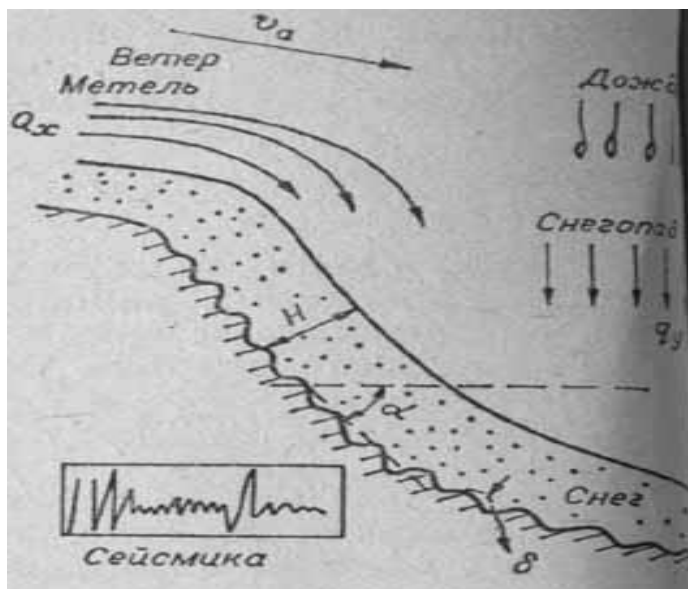


Рис. 28. Факторы прямой лавинной опасности. v_a - скорость ветра; q_y - интенсивность снегопада; Q_x - общий расход снега; H - глубина снега; ϕ - угол склона; b - высота выступов шероховатости склона.

Основные факторы, способствующие возникновению лавин кратковременного действия; угол склона с горизонтом, высота снежного покрова на склоне, характер поверхности склона и снега, интенсивность и общая продолжительность снегопадов, направление и сила ветров, метелевый нанос снега на склон, дожди при оттепелях (см. рис. 28).

Лавиноопасными считаются склоны, наклоненные к горизонту под углом 25-55°. Снег на них удерживается силами сцепления, величина которых зависит от гладкости подстилающих поверхностей. Неровная поверхность, курумник, густой лес на склонах предохраняют снег от падения. Но не всякая растительность способствует удержанию снега. Например, стебли густой высокой травы и ветви гибких кустарников под действием снежной нагрузки расстилаются вниз по склону, образуя опасную поверхность скольжения.

Свежий снег, выпавший на гладкую, затвердевшую поверхность снежного покрова, может легко соскользнуть вдоль этой поверхности. Чем больше высота снежного покрова на склоне, тем вероятнее лавина. При превышении критической высоты H_n надо ожидать лавину. Как правило, минимальные значения этой критической высоты - 25-30 см, хотя случаются сходы и более тонких пластов.

Очень быстрый прирост снежного покрова не оставляет времени для его упрочения и развития связей с подстилающей поверхностью. Интенсивность снегопада измеряется в сантиметрах снега, выпавшего за час. Практикой установлено, что при интенсивности снегопада более 2 см/ч и длительности его до 10 ч и более лавинная опасность весьма велика.

При холодных ветрах со скоростью свыше 10-15 м/с (измеренной на высоте флюгера метеорологической станции, т. е. около 10 м) ускоряются процессы метаморфизма в снежном покрове. Нижние слои снега разрыхляются, а верхние, наоборот, уплотняются за счет кристаллизации охлажденных паров. Рыхлые слои в конце концов не выдерживают тяжести вышележащих плотных снежных досок. Возникает лавина, так и называемая лавиной из снежных досок.

Если ветры сопровождаются метелью, склон отягощается дополнительным грузом метелевого снега. За гребнями растут карнизы. Их обрушение немедленно вызывает лавину.

Метель - один из наиболее серьезных признаков лавинной опасности. Лавины почти неизбежно начинаются или через несколько часов после сильной метели, или одновременно с ней.

При длительных оттепелях и весной снежный покров на склонах становится в верхних слоях или по всей глубине рыхлым, крупнозернистым, легко проницаемым для влаги. Характерная особенность такого

снега - однородная температура, близкая к нулю. Если подстилающий грунт водонепроницаем, то даже незначительные жидкие осадки, быстро просочившись вниз, обратит поверх него пленки с очень малым сцеплением, так что лавина может случиться и во время дождя.

Лавины замедленного действия кажутся ничем не связанными с внешней погодной обстановкой, происходят внезапно. Их прогноз особенно сложен и требует знания особенностей физических процессов в толще снежного покрова, о которых говорилось во второй главе. Испарение снежных зерен, миграция паров и их кристаллизация в холодных и более плотных слоях происходят особенно быстро. Образуются слои глубинного инея, или глубинной изморози, что легко обнаруживается на стенке шурфа по характерной гроздьевидной форме слоев кристаллов. В таких слоях под нагрузкой полностью разрушаются связи между кристаллами, и они превращаются в своеобразные подшпипники для лавины. Шурфы можно копать только на водораздельных участках склона или под защитой лавиноустойчивых преград.

Удивительно свойство водораздельных, бортовых участков лавинных логов. Снежный покров тот же, что и в углублениях склона. Наклон в сторону долины тот же. А снег не сходит, не обрушивается. Объясняется это тем, что на выпуклостях склонов он находится под действием боковых растягивающих усилий, направленных в сторону углублений. Поэтому смещение снега вниз по склону уменьшается. На водоразделах лучше сохраняется древесная растительность, удерживающая снег,

Мокрые лавины тоже, как правило, замедленного действия. Начало таяния снега само по себе не вызывает сразу мокрую лавину. При небольшой влажности снега жидкие водяные пленки в его порах даже способствуют укреплению связей между кристаллами. Влажный снег сходит обычно весной при достижении снежным покровом определенной критической влажности, когда отношение веса талой воды к общему весу снега превышает 0,10-0,15.

Влажность снега проще всего определяется методом центрифугирования: при быстром вращении снежного образца, погруженного в нейтральную жидкость, кристаллы льда отделяются от более тяжелой воды. Широко применяется также калориметрический метод, дающий ту же точность, но более трудоемкий. В нем используется небольшое различие между теплоемкостями льда и воды.

"ДАКТИЛОСКОПИЯ" ЛАВИН

Изыскатели, имеющие опыт работы в горах, хорошо знают основные признаки лавинной опасности: в лавинных логах нет дерна и древесной растительности. В логообразных понижениях и горных кресловинах не растет хвойный лес, хотя рядом на водоразделах благополучно живут хвойные породы. Лавины иногда щадят угнетенные березы, бук, рябину, кустарники, траву. Только эти представители растительного царства могут быть встречены в очагах лавинной опасности.

Характернейший признак лавинной опасности - конусы выноса лавин, состоящие из снега, грунта, остатков растительности, камней. Высота лавинного конуса достигает 10-15 м. Если обычный снег весной исчезает за полмесяца, то лавинный не стаивает за 2-3 месяца и может "дождаться" зимы. Летние снежники у подножия гор - первый, надежный признак лавинной опасности.

Если снег в конусе выноса лавины успел стоять, остаются обломочный материал, грязь, грунт. Обломки деревьев, камни укладываются непрочно, с большими пустотами. На верхней поверхности глыб - мелкие камешки, грязь, грунтовые частицы, осевшие вместе со снегом. Такие конусы резко отличаются от селевых конусов выноса, в которых обломочный материал как будто спрессован.

Лавинная опасность связана прежде всего со снежностью склонов, с наличием и обилием снега. Хороший показатель снежности - криволесье, изогнутые стволы угнетенных снегом березок, отличающихся выносливостью к большим снежным нагрузкам и даже к ударам лавин.

Последствия схода лавин отражаются на характере растительности в долинах. Существуют подробные Руководства, разработанные экспедициями Московского университета под руководством Г. К. Тушинского, которые позволяют по геоботаническим признакам оценивать степень лавинной опасности.

ГЛАВА ПЯТАЯ

БОРЬБА СО СНЕЖНЫМИ ФУРИЯМИ

Если мы точно установили основные законы процесса складывания наносов, то действие защит будет простым следствием этих законов.

В. Д. Злотницкий

Неистовые снежные фурии - метели и лавины - свирепствовали на Земле издавна, с тех пор, когда на остывшей ее коре стали откладываться нарастающие снежинки. Но борьба с ними в сравнительно широких масштабах началась лишь недавно, в эпоху промышленных революций.

С 1860 года, когда сеть русских железных дорог стала распространяться на юг и восток России, участились перебои в движении поездов. Случалось, что пассажиры и бригады покидали занесенные снегом поезда, спасаясь от голода и холода.

Для русских путейцев проблема снегозащиты железных дорог стала проблемой номер один. Перед гужевым же транспортом она не возникала: ямщики вполне справлялись со своим делом, мчась на санях с колокольчиками по занесенным снегом трактам. Их больше беспокоили осенняя и весенняя распутицы, нежели зимние метели. Иная обстановка складывалась в горах. На Крестовском перевале Военно-Грузинской дороги Владикавказ - Тифлис, построенной в 1799 году, ежегодно прекращалось гужевое движение из-за лавин. При прокладке Военно-Осетинской дороги в 1874 году решили обойти особо лавиноопасный Рокский перевал.

Постепенно накапливался опыт борьбы с метелями и лавинами и в России, и за рубежом, особенно в Швейцарии. Первые защитные устройства создавались без каких-либо теоретических обоснований и расчетов, так как ни того, ни другого не было. Лавинозащитные галереи на Кавказе, как выяснилось лишь в настоящее время, строились по меньшей мере с десятикратным запасом прочности.

Лишь в последние десятилетия удалось преодолеть многие трудности на пути к совершенствованию защиты дорог и предприятий от снежных заносов и лавин. Самым крепким "орешком" оказались лавины, а также горные метели.

ПРОБЛЕМА УБОРКИ СНЕГА

Метель занесла железнодорожную выемку многометровым валом - снегозащитные устройства не сработали. Надо расчищать путь, иначе не смогут ходить поезда.

Лавина обрушилась на дорогу, предприятие, воздвигла 15-метровый завал с плотностью, близкой к плотности льда. Надо убирать завал. Нельзя ждать, пока он растает.

В наше время расчистку снежных завалов и заносов, требующую много труда и средств, выполняют специальные снегоуборочные машины: плужные, роторные, щеточные снегоочистители, бульдозеры, автогрейдеры и т. д. Рабочая скорость современной снегоуборочной машины на железнодорожном транспорте равна 60-80 км/ч.

Роторные снегоочистители способны отбрасывать снег на расстояние 30-40 м. Производительность самоходных автодорожных машин достигает 1000-2000 м³/ч и более, а снегоуборочных поездов, выполняющих трудоемкую очистку железнодорожных станций и отвозящих собранный снег в отвал, около 1200 м³/ч.

Снегоочистители механического действия становятся все более и более эффективными. Возникает вопрос: нужны ли снегозащитные средства, если можно этой техникой убирать снег по мере его попадания на объект? Почему бы, например, не придумать даже механическую очистку горных склонов?

Но снегоочистительная техника не сможет полностью подменить снегозащитные средства.

Во-первых, предупреждение снежных заносов имеет решающее значение для бесперебойной работы предприятий и средств транспорта. Снежные заносы, пока их убирают, могут надолго остановить работу предприятий, движение транспорта.

Во-вторых, снегозащита намного экономичнее снегоуборки. По подсчетам доктора технических наук Даниила Михайловича Мельника, задержание одного кубического метра снега самым дорогим средством защиты - переносными щитами обходится дешевле уборки такого же количества снега плужным снегоочистителем в 5 раз, а роторным - в 10 раз и более.

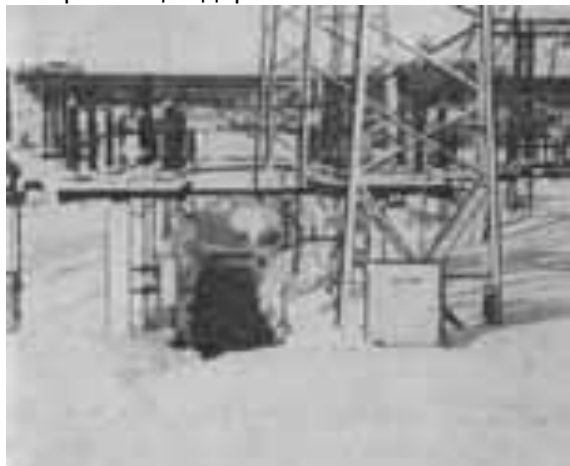
Проектирование снегоуборочных машин невозможно без знания физико-механических свойств снега, его сопротивления резанию, разрушению и т. д. Плужные снегоочистители внедряют в снег режущие устройства, подобные большим сельскохозяйственным лемехам. Роторные врезают в снежный завал вращающуюся фрезу, передающую затем разрыхленный снег на быстро вращающийся выбросной ротор. Во всех случаях происходит механическое воздействие на снег, зависящее от свойств последнего.

Нельзя сказать, что задача расчета рабочих органов снегоочистителей решена удовлетворительно. Необычайная изменчивость физико-механических свойств снега еще слабо учитывается при совершенствовании снегоуборочной техники. В проблеме уборки снега много и других неясных и спорных моментов. Один из них: как убрать снег, отложившийся на таких сложных и тонких компонентах железнодорожных путей на станциях, как стрелки, стрелочные переводы?

Для этой цели применяют электро- и газовый обогрев стрелок, который особенно эффективен в сложных метеорологических условиях: при мокром снеге, гололеде, изморози, при особо низких температурах. В США, Канаде, Англии, ФРГ обогревательные системы с автоматическим включением снабжены терморегулирующими устройствами.

Начиная с пятидесятых годов на наших железных дорогах широко внедряются автоматизированные пневматические устройства для очистки от снега стрелочных переводов. На ряде дорог начали применять электрические и газовые обогреватели.

Рис. 29. Снежные заносы на высоковольтной подстанции г. Петропавловска-на-Камчатке. На опытной обогревающей дорожке снега нет. Фото З. Е. Альшулера.



Очень перспективно удаление снега на стрелочных переводах и перронах железнодорожных станций с помощью электрообогрева с дистанционным управлением. Обогревающие элементы можно располагать внутри Железобетонных брусьев и плит.

3. Е. Альтшулер весьма успешно применил автоматический электроподогрев бетонных дорожек на открытых площадках электрических подстанций, где снежные заносы затрудняют и даже делают опасным доступ персонала к агрегатам подстанций. "Обогревающие дорожки" безотказно работают на нескольких подстанциях "Камчатскэнерго" вблизи Петропавловска-на-Камчатке (рис. 29).

Снегозащита открытых площадок подстанций энергосистем и тяговых подстанций электрифицированных железных дорог осуществляется, конечно, в комплексе. Кроме "обогревающих дорожек" полезно поднимать агрегаты над землей, чтобы обеспечить доступ ветру снизу. Нужна и внешняя снегозащита.

Некоторые читатели могут задать вопрос: снеготаяние на стрелке? Таяние? Значит, появляется вода, нужны специальные водоотводные системы, которые обойдутся безумно дорого? Однако мы уже знаем, что при отрицательных температурах снег, минуя жидкую фазу, переходит в пар с интенсивностью, пропорциональной градиенту температур. Не следует при слове "пар" представлять себе кипящий чайник. При таянии снега на стрелочном переводе обогрев локализован, сосредоточен в малом пространстве, но с резким перепадом температур, так как вся окружающая среда морозная. Появившаяся на металлических поверхностях влага очень быстро испаряется; условий для длительного сохранения жидкой воды нет. Это подтвердили и опыты. При электрообогреве стрелок никаких заметных остатков жидкости не образовывалось.

ЗАЩИТА ОТ БУРАНОВ

Во время метелей, особенно сильных, бесперебойная эксплуатация дорог и предприятий обеспечивается главным образом снегозащитными средствами, не допускающими больших (вредных) отложений снега. К их числу относятся устройства, задерживающие снег перед защищаемыми объектами (например, щиты и заборы), устройства, сдувающие снег с объектов, и снегозащитные лесонасаждения.

Огромный опыт применения и совершенствования средств снегозащиты накоплен нашими железными и автомобильными дорогами. В послевоенное время наиболее существенный вклад в решение этой большой проблемы внесен инженерами Д. М. Мельником, Г. В. Бялобжеским и лесоведами Н. Т. Макарычевым, Г. И. Матякиным.

Это не означает, что проблема решена, что в ней не осталось ни одного вопроса. Вся история дорожной снегоборьбы изобилует примерами как изумительно удачных решений, так и блужданий в потемках по ложным путям.

Причудлива судьба заурядного переносного щита для защиты железных дорог от снежных заносов. Он блестяще выдержал почти 120-летнее производственное испытание. Теория же работы этого предельно простого устройства оставалась неясной. Можно было выдвинуть любую гипотезу, "объясняющую" действие щита, не опасаясь опровержений.

Сравнительно недавно имела хождение ошибочная "теория" отталкивания щитами наэлектризованного метелевого снега вверх за счет увеличения ими напряженности электрического поля в приземном слое воздуха.

В тридцатые годы путейцы думали, что относительное распределение по высоте удельного расхода метелевого снега за равномерно проницаемыми по высоте щитами такое же, как и на подходах к щитам. Но ведь максимальное количество снега переносится вблизи от земной поверхности. Для увеличения снегосборной способности щитов инженер В. Ф. Толстов поэтому предложил нижнюю их часть делать с более узкими просветами. А верхняя, с более широкими просветами часть щитов должна была, по мысли изобретателя, способствовать "ускорению" движения верхних слоев метели, перебрасывая снег через железнодорожные пути.

Надежды не оправдались. Полевыми испытаниями щиты Толстова были забракованы. Но кому-то из исследователей вдруг пришла мысль перевернуть щиты Толстова "вверх ногами" и посмотреть, что

получится. К общему удивлению, щиты в таком положении стали задерживать больше снега и требовали меньше ухода, чем стандартные!

В этом случае получилось что-то похожее на известный изобретателям "принцип наоборот".

Основоположник ТРИЗ (Теория Решения Изобретельных Задач) писатель-фантаст и инженер Генрих Саулович Альтшуллер рекомендует изобретателям в числе 40 приемов устранения творческих затруднений применять "принцип наоборот": вместо действия, продиктованного условиями задачи, осуществить обратное действие, перевернуть объект "вверх ногами", вывернуть его наизнанку.

Профессор Алексей Александрович Комаров и автор этой книги предложили в 1952 году для снегозащиты переносный щит с сильно разреженной нижней половиной. По сути дела, это щит Толстова "вверх ногами". Наши щиты применяются на железных и автомобильных дорогах Сибири. Женщины-монтеры пути называли их "модными щитами". "Модные щиты" задерживают столько же снега, сколько и стандартные, но сами медленнее заносятся снегом. В результате переставляют их в 2-3 раза реже, чем стандартные.

Весьма поучительна новейшая история снегозащитных лесонасаждений. Они заслуженно считаются лучшим средством снегозащиты и одновременно благотворно воздействуют на микроклимат: оздоравливают его, защищают от сильных ветров, поглощают вредные шумы. Наконец, они просто красивы и радуют глаз.

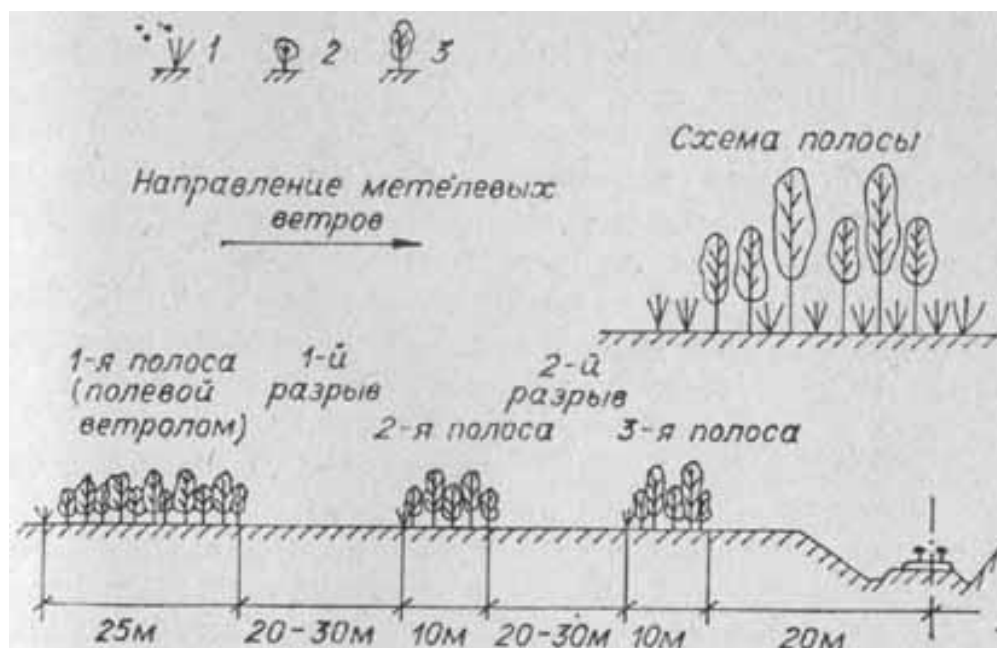


Рис. 30. Схема размещения трехполосных защитных лесонасаждений, применявшаяся в пятидесятые годы при заносах свыше $200 \text{ м}^3/\text{м}$.

1 - кустарники; 2 - подгоночные породы; 3 - главные породы.

Система снегозащитных лесонасаждений на железных дорогах состоит из ряда полос, число которых определяется в зависимости от количества снега, сдуваемого метелью с окружающих полей. Пример размещения снегозащитных лесонасаждений, применявшегося в пятидесятые годы, приведен на рис. 30. При создании этих схем лесонасаждений руководствовались следующими идеями:

- 1) назначение их - задерживать снег, поэтому любая из полос не должна продуваться ветром;
- 2) полосы должны быть по той же причине густыми и непроницаемыми для снеговетрового потока по всей их высоте, поэтому лесопосадки делали трехъярусными: главные (самые высокие) лесные породы, вспомогательные (подгон) и кустарники;

3) поскольку первая со стороны поля полоса, "полевой ветролом", испытывает на себе всю силу ударов полевой метели, она должна быть наиболее широкой и мощной.

Казалось бы, все верно. На деле же, пока посадки росли, а росли они медленно, проблем не возникало. Но когда растения достигали полной высоты, начинались чудеса. В первых рядах могучих "полевых ветроломов" собирались не менее могучие снежные валы до самых крон главных пород. При оседании снега деревья сильно повреждались задолго до весеннего снеготаяния и отмирали. Полосы переживались. И вдруг, на определенном этапе, полоса снова начинала работать отлично.

Поврежденные ряды насаждений возобновлялись строго по той же схеме - и все начиналось сначала.

Инженеры-сибиряки И. И. Солопов и И. З. Фрадкин в 1950 году предложили все делать наоборот: первые со стороны поля полосы устраивать наиболее узкими и продуваемыми, оставлять непродуваемой и более широкой только последнюю, перед путями, полосу, резко увеличить межполосные разрывы, используя их зимой для аккумуляции снега, а летом для выращивания влаголюбивых сельскохозяйственных культур.

Правота Солопова и Фрадкина полностью подтверждалась нашими исследованиями. Мы поддержали их предложение и начали создавать с помощью линейных путейцев опытные участки новых лесных полос путем рубок на небольших участках существующих полос.

Через некоторое время легкие полевые "ветроломы" были узаконены стараниями подлинного энтузиаста снегозащитного лесоразведения на железных дорогах Николая Тимофеевича Макарычева. Принцип "наоборот" пробил себе дорогу! Великолепный специалист-лесовод, отважный и глубокий исследователь, отличающийся обостренным чувством нового, Николай Тимофеевич пошел еще дальше: он дерзко нарушил закон трехъярусной непроницаемости лесных полос, сделав нижний ярус особо хорошо продуваемым, убрав все кустарниковые ряды, кроме подветренной опушки. Полосы перестали повреждаться из-за снеголома, их аэродинамические свойства, как подсказала теория, приблизились к оптимальным. Грубо говоря, здесь было что-то похожее на эффект перевернутых щитов Толстова.

Самыми трудными для снегозащиты участками железных дорог были и остаются железнодорожные станции. До пятидесятых годов их и не пытались, как правило, ограждать от образования снежных заносов ограничиваясь только снегоуборкой.

Нельзя ли уменьшить трудности снегозащиты уже на стадии проектирования станций в сильно заносимых районах? Как должны пересекать станцию сильнейшие зимние бураны - вдоль или поперек путей?

Казалось бы, в сильнозаносимых районах проектировать железнодорожные станции необходимо так, что бы направление путей, по возможности, совпадало с направлением сильнейших метелей, чтобы они сами выметали весь снег за пределы станций.

Именно это требование было закреплено во всех технических условиях и нормах проектирования железных дорог. Но в нормативном документе, введенном в действие с 1977 года, наоборот, предлагается располагать станционные пути поперек метелевых ветров. Аргументы для введения этого норматива были неотразимы.

Железнодорожные станции - открытые длинные площадки протяженностью в несколько километров, но значительно меньшие по ширине. Метель, проносящаяся вдоль такой площадки, насыщается снегом, как и ранее говорилось, через 300-500 м, то есть в самой начале площадки, а далее начинаются обычные для чистого поля волнообразные чередования перенасыщений и недонасыщений с образованием нормального снежного покрова. Особенно опасны резкие сужения и расширения площадок в местах расположения стрелочных улиц и горловин. Там между зонами застроек почти всегда образуются узкие "коридоры", где метель сначала ускоряется за счет сжатия, а потом замедляется при расширении приземного слоя ветрового потока (см. рис. 31). В местах замедления снег выпадает, образуя "снежные отмели", физически подобные речным отмелям при переходе от перекатов к плесам. Объем снега,

остающегося на станции при продольных ветрах, по крайней мере таков же, как и при поперечных ветрах, но особо резко увеличивается заносимость стрелочных переводов в горловинах.

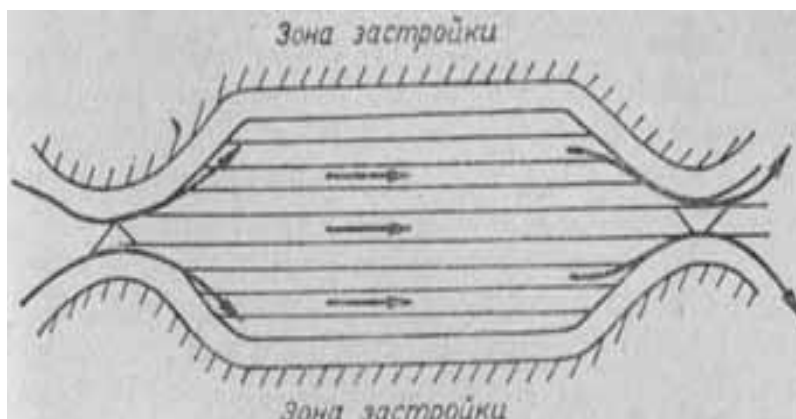


Рис. 31. Схема движения метелевого потока вдоль железнодорожной станции.

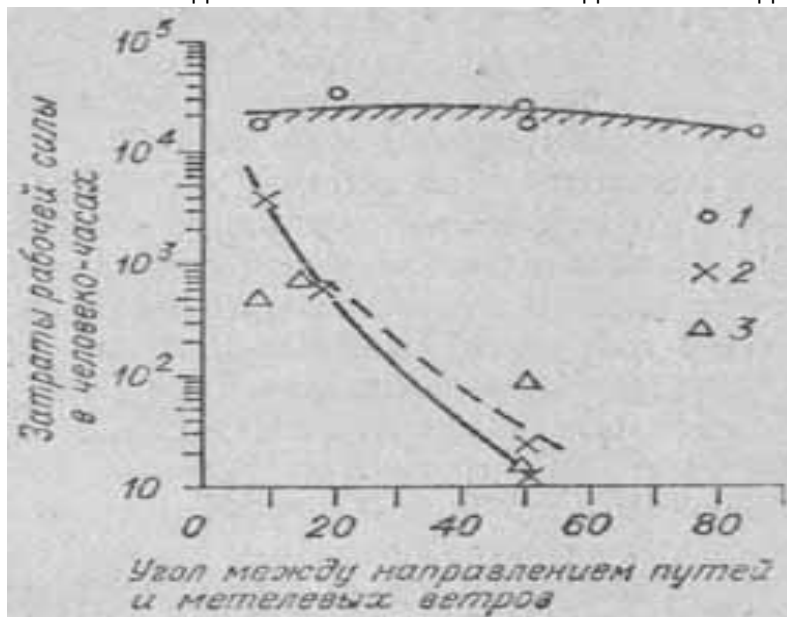


Рис. 32. Зависимость затрат труда на снегоборьбу от угла между направлением путей железнодорожной станции и направлением метелевых ветров в Кулунде (1959-1960 гг.).

1 - затраты труда на очистку станционных путей; 2 - то же, на очистку стрелочных переводов; 3 - то же, на ограждение станции переносными снеговыми щитами.

Анализ затрат рабочей силы на борьбу со снегом на железнодорожных станциях в Кулундинской степи полностью подтверждает сказанное (рис. 32). Объем затрат труда на очистку путей имеет даже тенденцию к уменьшению при увеличении угла между осью станции и направлением сильнейших метелей, т. е. при приближении к поперечному продуванию. При продольном продувании станций во много раз возрастают затраты труда на очистку стрелочных переводов и на попытки оградить горловины станций переносными щитами.

Поезда, остановившиеся на станции во время "продольных метелей", заносятся снегом очень интенсивно. Больше всего скапливается снега в местах расширения ветрового потока между поездами за тележками, в межвагонных промежутках и в конце составов. Ничего подобного не происходит при поперечном продувании станций.

Подъездные пути Экибастузского угольного бассейна и Ждановского рудника на побережье Баренцева моря расположены по ветру в строгом соответствии с прежними нормативами. Ежегодные заносы стали бичом этих станций, причем надежно защититься от них нельзя. Выручают лишь дорогостоящие снегоуборочные работы.

В прежних нормативных документах предлагалось и железнодорожные выемки строить "по ветру". Я наблюдал снежные заносы в таких выемках. В подветренных их концах, где ветровой поток расширяется, образовывались плотные снежные заносы. В выемках, расположенных в кривых участках пути, мощные сугробы откладывались на выпуклых откосах. По такому же закону мелеют выпуклые берега извилистых рек, что каждому хорошо известно. Защита выемок от "продольных заносов" немыслимо затруднена: нельзя же перегородить заборами железную дорогу или шоссе! Новые нормативы рекомендуют избегать расположения осей выемок "по ветру".

При разработке генеральных планов застройки городов в сильно метелевых районах до настоящего времени иногда придерживаются принципа сплошной многоэтажной периферийной застройки со стороны господствующих метелей. Сплошная цепь высоких зданий, должна, мол, полностью преградить путь метелевому снегу. В действительности же с подветренной стороны на фасады зданий наваливаются огромнейшие сугробы, достигающие 3-4-го этажа. Жители прорывают длинные тоннели, чтобы проникнуть к входным дверям. Высокие здания, встречая верховую метель, резко изменяют распределение скоростей в ветровом потоке. В итоге получается такое же неравномерное распределение отложений снега, вызванных верховой метелью, как и на подветренных склонах гор.

Некоторые северные поселки проектируются так, чтобы их улицы, наоборот, "продувались" метелями. Это не избавляет от заносов по тем же причинам, что и в случае "продуваемых" железнодорожных станций. Кроме того, увеличенные скорости ветров при сильных морозах ухудшают микроклимат поселка.

Как следует из сказанного, это трудная и интересная проблема. Нужны иные, строго обоснованные градостроительные и архитектурные решения, которые ждут своих исследователей-энтузиастов. Думается, что города, запроектированные с учетом реальных законов метелей, станут не только комфортабельнее, но и красивее!

ПЕРВЫЕ ШАГИ В БОРЬБЕ С ЛАВИНАМИ

Борьба с лавинами и метелями в горах намного сложнее борьбы со снежными заносами на широких равнинах. На Крайнем Севере СССР форпостом борьбы с лавинами и горными метелями стал комбинат "Апатит", созданный на Кольском полуострове по инициативе Сергея Мироновича Кирова. Цех противолавинной защиты комбината, много лет возглавлявшийся Василием Никаноровичем Аккуратовым, мужественным и беззаветно преданным делу исследователем, стал подлинным университетом для снеговедов страны. Что бы сейчас ни делалось в СССР и за рубежом в сфере борьбы с сильными метелями и лавинами, при этом всегда используется опыт этого комбината, приобретенный в неимоверно трудных условиях.

В. Н. Аккуратова называли "снежным человеком Хибин". Его многочисленные публикации использовались снеговедомы всего мира, обращавшимися к нему с титулами "профессор", "доктор", хотя Аккуратов не имел высшего образования. Ученый совет Московского государственного университета, в порядке исключения, присудил ему ученую степень кандидата географических наук.

Одновременно с Хибинами снеголавинная служба создавалась на Востоке нашей страны.

Сибирская зима 1933/34 года была необычайно многоснежной, и в марте - апреле наблюдался массовый сход снежных лавин со многих горных склонов в долине реки Ангара и на юго-западном побережье озера Байкал. В ноябре 1934 года была организована первая дорожная "снежнообвальная станция" под руководством молодого геолога Федора Андреевича Никитенко, ныне профессора Новосибирского института инженеров железнодорожного транспорта. Станция просуществовала недолго, началась Великая Отечественная война. И хотя работа первой снеголавинной ячейки на Востоке прервалась в самом начале, ее опыт не прошел бесследно.

Во время Великой Отечественной войны начались изыскания горного железнодорожного участка Новокузнецк - Абакан в долине реки Томи, где много лавиноопасных склонов отрогов хребта Кузнецкий

Алатау. В изысканиях участвовали Ф. А. Никитенко и главный геолог экспедиции Сибгипротранса В. И. Сербенко. Используя опыт иркутской "снежнообвальной станции", экспедиция провела обстоятельные исследования лавинной обстановки в течение 1942-1947 гг.

Изыскатели приняли смелое решение: отказаться в верховьях Томи от проектирования дорогостоящих лавинозащитных галерей и построить на опасных склонах железобетонные заборы, удерживающие снег на месте. Но строители совершили роковую ошибку, начав застройку склонов не сверху, а снизу, оставив незастроенными верхние участки большинства опаснейших склонов. Слабо были укреплены стойки заборов в скале. В результате лавины в течение нескольких лет сбросили все заборы. Они сохранились только на выпуклых участках склонов, где лавины сходить не могли и заборы были не нужны. Понадобилось организовать бригаду верхолазов, чтобы взрывать снег, "созревший" для лавины. Была создана снеголавинная станция в Лужбе. В 1968 году началось строительство лавинозащитных галерей.

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ОТ СНЕЖНЫХ ЛАВИН

Практикой строительства городов, предприятий, дорог и развития сельского хозяйства в горных районах выработано множество средств борьбы с лавинной опасностью. Прежде всего проводятся профилактические мероприятия, организуемые строителями, предприятиями; транспортными организациями или специальными снеголавинными службами, станциями, пунктами. Такие службы следят за состоянием снежного покрова на опасных горных склонах, определяют периоды опасности и намечают меры предосторожности при выполнении неотложных работ в лавиноопасный период. Они отвечают и за проведение всей профилактики, а также на планирование и постройку инженерных противоударных сооружений. Расходы на организацию и содержание этих служб оправдываются многократно, ярким примером чему служит комбинат "Апатит".

К профилактическим мероприятиям относится, например, противолавинная сигнализация на железных дорогах. Простейший ее вид - проволока, протянутая поперек лавинного лога. При разрыве проволоки лавиной включается аварийное реле, и на светофорах, ограничивающих опасный участок, загорается красный свет.

В целях профилактики часто прибегают к искусственному обрушению снега со склона с помощью взрывчатых веществ и артиллерийского обстрела. Наилучший эффект дают 160-миллиметровые минометы со взрывателями осколочного действия. Обстрел склонов поручается только высококвалифицированным специалистам, ответственным за безопасность и высокую точность стрельбы. Обстреливаются верхние участки склона, мины укладываются сверху вниз в шахматном порядке. Как установлено В. Н. Аккуратовым, обстрел полезен и в том случае, если снег не обрушился, поскольку нарушение однородности снежного покрова минами устраняет лавинную опасность на несколько дней и даже недель.

Но далеко не все относятся одобрительно к регулярным и частым бомбардировкам горных склонов. Сотрудник комбината "Апатит" Б. Н. Ржевский, изучивший историю борьбы с лавинами на предприятии, считает, что регулярные и множественные минометные обстрелы склонов гор усиливают лавинную опасность на соседних склонах, увеличивают частоту схода лавин.

Если за первые 40 лет работы комбината в зоне его промышленной площадки сошло 55 крупных (объемом более 10 тыс. м³) самопроизвольных лавин, а 18 крупных лавин было сброшено искусственно, то за последние 20 лет соотношение изменилось: 14 крупных самопроизвольных лавин и 50 искусственных. При обстреле соскальзывают лавины более опасные, чем при естественном сбросе снега со склона. Сказываются, видимо, сотрясения при взрывах.

Классический пример тяжелых последствий таких сотрясений - катастрофа в Валь-де-Баркли в Швейцарии. Сильно-метелевая и обильная снегом зима 1950/51 года была названа швейцарцами Зимой Ужаса. Утром 20 января 1951 года дорожный обходчик Гросс решил в сильнейшую метель проверить проходимость шоссе и был погребен сошедшей лавиной. Спасательная команда с собаками тоже погибла от второй лавины. Вторая и третья спасательные команды также были засыпаны снегом. В близлежащем

старинном городке Цуоце мне привелось побывать в 1967 году. Городок расположен у подножия склона горы Альбанас, противоположные склоны - Д-Урецца и Буэра. Цуоц основан в 1598 году, и за все время его существования со склона Альбанас не сошла ни одна лавина. Склон пологий - от 20° внизу до 28° в верхней части. Сотрудники Института снега и лавин в Швейцарии считали такие склоны полностью безопасными. К исходу того рокового дня артиллеристы учебного полигона в долине Валь-де-Баркли начали обстрел опаснейших склонов Д-Урецца и Буэра, чтобы избежать новых жертв. Везде сошли колоссальные лавины. И тогда впервые за 350 лет "выстрелил лавиной" Альбанас, потрясенный взрывами снарядов на противоположной стороне горы. 32 здания Цуоца были сметены или повреждены лавиной. После этого в Валь-де-Баркли запретили обстреливать склоны.

Никто еще не знает, как часто можно проводить обстрел горных склонов. Неясно, каковы размеры зоны лавинной опасности, возникающей при обстреле. Ясно лишь то, что площадь такой зоны намного больше площади обстрелянного склона.

На некоторых горных предприятиях практикуют в качестве профилактической противолавинной меры "отаптывание" опасных склонов. Такое отаптывание следует категорически запрещать, так как оно связано со смертельной опасностью. То же самое надо сказать о подпиливании и обрушении вручную нависших над склоном снежных карнизов.

Наиболее надежное средство защиты от лавин - противолавинные инженерные сооружения. Они делятся на три основные категории: предупреждающие, защитные и комплексные. Назначение предупреждающих сооружений - не допускать схода снежной лавины с горного склона, прилегающего к защищаемому объекту. Лавинопредупреждающие сооружения различаются по оказываемому ими действию на снежный покров, образующийся на опасном склоне.

Если в формировании снежного покрова велика роль метелей, то на водоразделах лавиноопасных склонов, на прилегающих к их вершинам плато и противоположных наветренных склонах устраиваются преграды (как правило, многорядные) типа высоких снегозащитных заборов. Они преграждают доступ метелевому снегу на опасный склон и, во всяком случае, уменьшают его принос. С той же целью могут создаваться террасы, земляные дамбы, искусственное лесонасаждение.

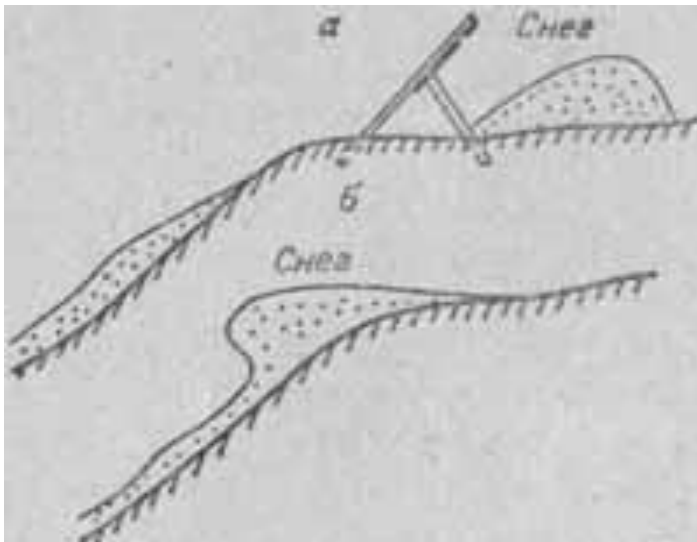
Иногда один лишь снегоудерживающий забор перед гребнем склона намного снижает и даже устраняет лавинную опасность.

По другой причине прекратился сход лавин с одного из опаснейших склонов Хибинских гор - с печально знаменитой "воронки № 10" горы Юкспор. На плато перед обрывом склона подземные выработки образовали провал глубиной 60-70 м, и снег, ранее перебрасываемый метелями на склон, стал задерживаться в провале.

Эффективны снеговыводящие панели ("дюзы"), устраиваемые в самой верхней части лавиноопасного склона и предотвращающие образование снежных карнизов, нависающих над склоном. До последнего времени употреблялись дюзы с сильно наклоненными к горизонту панелями. Сейчас доказана эффективность более экономичных дюз с почти вертикальными панелями. Панели применяют сплошные и проницаемые. Общая высота дюз не может быть менее 5-6 м, высота нижнего просвета соответственно 2-2,5 м. Проницаемые панели легче и дешевле, а работоспособность их такая же, как и сплошных.

Рис. 33. Действие снеговыводящих заборов на гребне горного склона.

а - отложения снега в зоне установки забора; б - карниз на незащищенной части гребня.



На рис. 33 изображены дюзы с крутыми панелями, установленные на гребне лавиноопасного лога на Южном Сахалине. Гребень был полностью очищен от снега, а рядом, на незащищенной части гребня образовались внушительные карнизы. На части склона, защищенной дюзами, полностью прекратился сход лавин.

В сильнометелевых районах на лавиноопасных склонах применяются одиночные деревянные плиты, металлические щиты, приподнятые на стойке над поверхностью снежного покрова. Около них в радиусе 7-10 высот (Нщ) этих щитов под действием ветра образуются чаши выдувания и валы. Поэтому щиты расставляют на расстоянии 14-20 Нщ друг от друга в шахматном порядке. Снежный покров становится крайне неровным, и формирование гладкой поверхности скольжения затрудняется. Эффект аналогичен "пригвождению" снега взрывами мин и снарядов. Впервые такие щиты - кольктафели успешно начали применяться в Австрийских Альпах. На рис. 34 изображена конструкция "объемного" австрийского кольктафеля, образующего около себя воронки выдувания при любом направлении ветра.

Если зимние метелевые метры имеют одно господствующее направление, устраиваются плоские кольктафели. Впервые в СССР они использованы на Южном Сахалине, где лавинная опасность связана прежде всего с сильными метелями. В безветренных районах применение кольктафелей, безусловно, бессмысленно.

Для предотвращения подвижек снежного пласта вниз по склону служат глубокие террасы, земляные дамбы, заборы с жестким или гибким заполнением. Наиболее универсальны заборы, так как на склонах свыше 30° террасы и дамбы малоэффективны и неэкономичны.



Рис. 34. Австрийский кольктафель. Размеры указаны в метрах.



Рис. 35. Противолавинная сетка, Размеры указаны в метрах.

Как отмечалось выше, склон застраивают только сверху вниз, иначе незавершенная по тем или иным причинам противолавинная застройка может быть полностью разрушена лапинами в ближайшую же зиму. Наибольшее внимание уделяется прочности и надежному укреплению в грунте опорной части заборов. Если грунт склона ненадежен (осыпи, оползни), заборы могут подвешиваться на тросах, закрепленных на вершине склона. Так пришлось поступить, например, при защите от лавин упоминавшегося нами санатория "Сахалин", поскольку склон горы Джамбул оказался оползневым.

Любая противолавинная застройка склонов и их подножий не должна препятствовать надежному и рассредоточенному стоку воды при таянии снега и отводу талых вод от защищаемых объектов. Совершенно недопустимо на горных склонах образование бессточных водоемов за преградами.

Для заполнения заборов употребляются деревянные и железобетонные доски, куски рельс, гибкие ленты и сетки из антикоррозийного материала.

Успешно применяются противолавинные металлические сетки, в том числе крупноячеистые (ячейки до $10 \times 10 \text{ см}^2$). Гибкие сетки выдерживают большие динамические давления сползающего снежного пласта. Их легко доставлять в виде рулонов на самые крутые опасные склоны и монтировать на месте с минимальными затратами труда. Впервые в СССР они начали использоваться В. К. Лохиным в Кузнецком Алатау. Конструкция легких сетчатых заборов показана на рис. 35.

На первый взгляд может показаться, что мощные снежные пласты неизбежно сомнут и порвут подобные хрупкие сооружения. Но эта хрупкость, податливость - надежная гарантия их устойчивости. Напоминается сравнение с опрокинутым ветром дубом рядом с невредимой гибкой лозой. Снег, наползающий на сетку, медленно ее прогибает и даже частью продавливается через ячейки, но отстает от нижележащего пласта. Образуется траншея с глубокими кавернами. Холодный воздух промораживает траншею до основания, и снег, остановленный сеткой, превращается в барьер, препятствующий сползанию лежащих выше слоев.

Под защитой заборов возможно искусственное лесоразведение на опасных склонах как наиболее перспективное и совершенное противолавинное средство. Оно с большим успехом и давно внедряется в Швейцарских Альпах. Тем не менее даже в Швейцарии еще не приобретены навыки вполне надежного лесоразведения в труднейших условиях крутых горных склонов. В высокогорных районах положение осложняется высотной зональностью: условия произрастания растений в верхней и нижней частях длинных склонов неодинаковы. На больших высотах холоднее, ветренее, и посадки приживаются с трудом, а именно верх склона требует самого надежного укрепления снежного покрова.

Невысокие земляные валы и дамбы, сооружаемые вместо заборов, - плохая защита посадок. Снежные пласты легко переползают через дамбы и губят посадки. В Бернских Альпах в долине Урзерен в верхней части склона горы Оксенальп, примыкающего с запада и юго-запада к железнодорожной станции и поселку Реальп еще в 1899 году были сооружены земляные дамбы высотой до 3 м, защищающие посадки леса. Высота склона 600 м, длина 1200 м, средний угол склона 31° с максимумом в верхней части до 40°. На склоне вырос настоящий густой лес, за исключением верхней холодной трети склона, где растения приживались плохо. Зимой 1961 года лавина свободно прошла через дамбы и ринулась на посадки нижней части склона. Она сделала широкие прочесы в лесу и отбросила вырванные с корнем деревья почти до поселка Реальп. Вырастить лес снова удалось лишь после установки металлических заборов.

Одна из главных задач лесоводов - создание основ горного лавинозащитного лесоразведения. Фактически это тоже новая наука, развитие которой сильно отстало от требований практики.

В сентябре 1978 года в Давосе (Швейцария) состоялся первый Международный семинар на тему "Лавины и горный лес", где всесторонне обсуждались задачи охраны лесов и лесоразведения на горных склонах - этой, пожалуй, главной для лавиноведения проблемы. Опыты в Швейцарии, Австрии и Японии показали, что если в течение 10 лет за саженцами не ухаживать, оставить их без внимания, они могут погибнуть в результате изреживания и повреждения снежной массой. Нужны разработки и испытания структуры граничных рядов лесопосадок, устойчивых против снеголома.

При устройстве лавинозащитных сооружений в отличие от лавинопредупреждающих сход лавин допускается, но объект должен быть надежно защищен от них. К основным защитным средствам относятся лавинорезы, тормозящие стенки и клинья, задерживающие и направляющие стенки и дамбы, эстакады, навесы, лавиноспуски, галереи. В случаях особо сильной опасности нередко оказывается выгодным вывести застройки и транспортные коммуникации за пределы зоны действия лавины.

Лавинорезы защищают от прямого удара наиболее ответственные участки промышленных площадок, служебные и жилые здания и т. д. Лавинорез представляет собой большой клин, который сооружается непосредственно перед защищаемым объектом. Клин рассекает лавину на две части и отбрасывает их в обе стороны от объекта. Направляющие устройства располагаются дальше от объекта и соответственно отбрасывают лавинный снег на большее от него расстояние.

Недостаток сооружений такого типа - локальность их действия. Далеко не всегда возможно точно определить путь схода лавины и, следовательно, место установки лавинореза.

Первый в мире лавинорез сооружен в Швейцарии монахами для защиты старинной церкви в поселке Обервальде, расположенном в узкой долине Верхней Роны неподалеку от Ронского ледника. К задней стене церкви, обращенной к длинному и опасному Зидельхорнскому склону, примыкает огромный клин, равный по высоте церкви и выложенный из отесанных камней. Клин рассекал сходящие лавины без вреда для церкви и прихожан, что, разумеется, считалось божественным чудом.

Часто применяются задерживающие стенки и дамбы, устраиваемые в промежуточной части и в конце транзитной зоны опасного склона. Эти преграды рассчитываются на прямой удар лавин и их полную остановку. Они располагаются в тех частях подножия склона, где кинетическая энергия лавины угасает настолько, что ее недостаточно для прыжка через преграду. Слой лавины имеет мощность не менее 3-5 м, так что дамбы такой же высоты, как правило, не препятствуют ее движению. При склонах длиной свыше 300-600 м высота задерживающих стенок и дамб принимается не менее 8-12 м. За такими преградами собирается огромное количество снега. Отвод талых вод должен быть обеспечен.

Надежность защитных земляных дамб, воспринимающих удары лавин, подвергается сомнению. Примеров роковых "отказов" дамб накопилось немало. Вот один из них. Лавинная опасность нависала над упомянутым выше швейцарским поселком Реальп не только со стороны залесенного Оксенальпа, но и еще более опасного склона Обергадмена. В 1933 году у подножия этого склона насыпали защитную дамбу высотой 3,5 м. Во время Зимы Ужаса 1951 года сотни тысяч кубических метров снега легко

перемахнули через дамбу и разрушили несколько зданий Реальпа, после чего в 1952 году дамбу нарастили до высоты 6,5 м. Пока новых катастроф там как будто не было.

До последнего времени считалось, что плохо работают лишь дамбы высотой меньше 5 м. Опыт комбината "Апатит" доказывает, что увеличение высоты дамб сверх 5 м не всегда себя оправдывает. Так, у подножия склона горы Апатитовая, названного "Апатитовой воронкой", где построена девятиметровая установка для измерения удара лавин, в 1971 году была насыпана внушительная лавинозащитная дамба высотой 25 м! За первые 4 года дамба благополучно задержала 14 лавин. Но 15 апреля 1975 года после минометного обстрела лавина объемом до 40 000 м³ перемахнула через дамбу, создав, кроме того, разрушительную воздушную волну. Перебросу способствовали отложения предыдущих лавин перед дамбой, фактически уменьшившие ее высоту вдвое.

Б. Н. Ржевский считает насыпные дамбы малоперспективным типом защитных сооружений, которые не обеспечивают надежную остановку лавины и возбуждают воздушные волны. Иногда рекомендуются еще тормозящие стенки и клинья, якобы умеряющие кинетическую энергию лавины. На комбинате "Апатит" их называли "птичками". "Птички" полностью не оправдала себя. В Швейцарии давно уже отказались от каменных клиньев, так как они не сдерживали проносящиеся мимо лавины. С той же целью на линии Междуреченск - Абакан склоны покрывали тычковыми железобетонными "надолбами". Лавины сходили сквозь надолбы беспрепятственно.

Самые надежные (и самые дорогие) лавинозащитные сооружения - эстакады, лавинопуски и галереи, строящиеся по индивидуальным проектам со строгим учетом местных особенностей. Основное назначение этих капитальных сооружений - безвредный пропуск лавины под объектом или над ним. Они рассчитываются на динамическое воздействие транзитного лавинного потока. На рис. 36 показан поперечный разрез одной из противолавинных галерей, защищающих железные дороги.

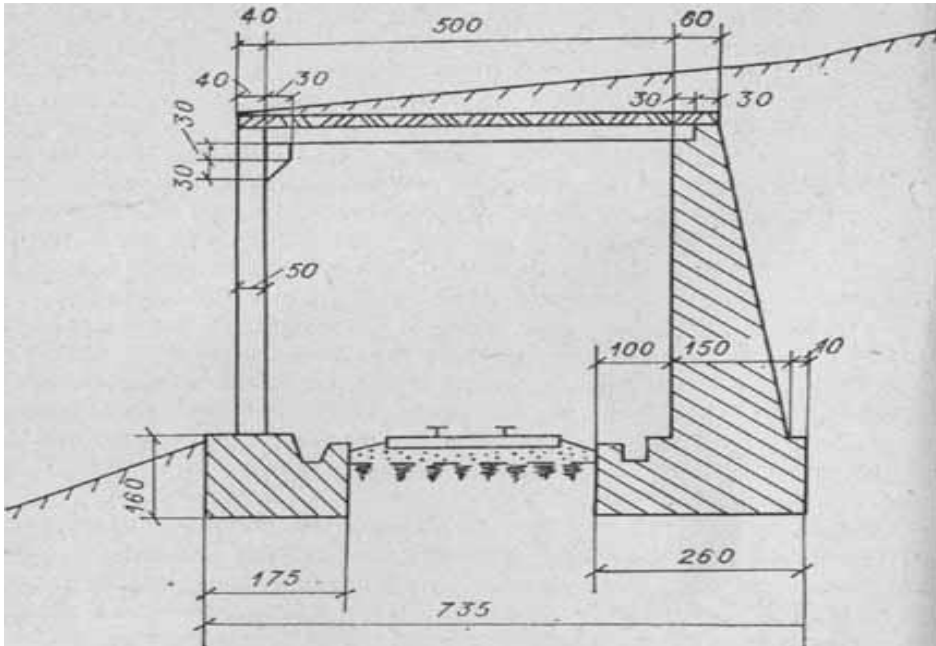


Рис. 36. Поперечный разрез типичной противолавинной галереи. Размеры указаны в сантиметрах.

Опоры линий электропередач защищают клиньями высотой 3-5 м. Этот установленный практикой размер хорошо согласуется с результатами измерений лавинного ударного давления по высоте. Плотность верха лавинного потока мала, и он свободно проходит через тонкие элементы опор.

Комплексные противоловинные сооружения представляют собою комбинации предупреждающих и защитных устройств.

Иногда на больших склонах в их верхней части устанавливаются лавинопредупреждающие сооружения, а у подножия - задерживающие стенки. В этом случае возможна экономия на высоте стенок, так как зона

отрыва лавины будет ниже и ее ударная сила меньше, Нередко лавино-защитные сооружения создаются как дополнительные гаранты даже при сплошной и вполне надежной застройке склонов. Если противолавинная защита состоит из частичной застройки склона (начиная сверху!) и галереи, это удешевляет и ускоряет строительство галереи. Но при этом застройка должна продолжаться из года в год с параллельным облесением склона.

При выборе комплекса противолавинных сооружений огромное значение имеет морфология склона. Если, например, в промежуточных частях склона имеются пологие пороогообразные участки, доступные машинам, то на таких порогах вполне целесообразно сооружать земляные дамбы, дополняющие застройку склона.

Выбор противолавинных средств существенно зависит от местных условий и должен в каждом отдельном случае обосновываться технико-экономическими расчетами. Например, чем больше снегосборная площадь склона, тем, как правило, дороже обходится его сплошная застройка сооружениями, предупреждающими сход лавины, и, следовательно, тем выгоднее защитные меры.

ГЛАВА ШЕСТАЯ СНЕГ СЛУЖИТ ЧЕЛОВЕКУ

Снег толстым слоем лежит на еловых лапах, но между ними и землей - свободное пространство: в солнечный день здесь светло, и случайно оказавшаяся там ягодка костяники на высоком стебельке вдруг рдяно вспыхнет, заиграет летним цветом... Надежно такое убежище от любой непогоды и врагов, забьется в него заяц-русак, или тетерев, или сама хитрая лисица, или иная какая живность - и замрет, затаится, затем задремлет под вой и грохот лесной метели.

Петр Проскурин. Имя твое

Много нами сказано о защите от негативных воздействий снега. Но вот что примечательно: снег сам по себе вовсе не враждебен человеку. Он грозен лишь тогда, когда... беззащитен! Защищенный от ветра, от соскальзывания по горным склонам, он превращается в Добрую Фею могучей природы.

Некоторые добрые дела снега знакомы человечеству с незапамятных времен, иные стали известны лишь в последнее время. А чтобы извлечь из снега наибольшую пользу, надо прежде всего владеть средствами регулирования снежного покрова, то есть средствами снегорегулирования.

СНЕГОМЕЛИОРАЦИЯ

Снег нужен для сельского хозяйства. Среди хлеборобов популярна старинная пословица: "Снег на полях - хлеб в закромах". Он нужен не только как источник и хранитель влаги, но и как шуба, защищающая от порозов живые сообщества в почвенно-растительном слое, посевы озимых культур, корневые системы многолетних кормовых трав и т. д.

Особенно нужен снег на посевных площадях степных и лесостепных районов Сибири, которые по сравнению с западной частью СССР находятся в невыгодном положении в смысле годового распределения осадков. Например, в Кулунде снега выпадает гораздо меньше, чем в Московской области. Весна и первая половина лета в Сибири часто бывают засушливыми, а именно тогда влага поистине драгоценна для растений. В Кулунде в этот период водный паек скуден, дождевые осадки в основном приходятся на июль, август, а часто и на сентябрь, когда для урожая они не нужны и лишь затрудняют его уборку.

Несмотря на обилие снега к западу от Урала, снежные заносы там намного меньше, чем в Сибири, где снега выпадает меньше. Объясняется это отсутствием оттепелей в Сибири и сильными зимними ветрами. Полезащитные лесные полосы, задерживающие снег на сельскохозяйственных полях, в Сибири менее эффективны, чем в западной части СССР.

На рис. 37 показано распределение снега за широкой непродуваемой и узкой продуваемой полосами лесонасаждений высотой 5-6 м по снегомерным наблюдениям М.Е. Черепанова, сделанным в январе и в марте 1964 года в Омской области. Полосы собрали много снега, но их влияние на снегоотложения в подветренную и наветренную стороны не распространяется далее 60 м. В наветренной стороне снега оказалось больше, так как здесь к полосе подходит насыщенный метелевый поток (см. третью главу). В подветренной же стороне после вала неизбежно образуется обширная зона разгона, где снег выдувается ветром до почвы, а иногда и вместе с ней.

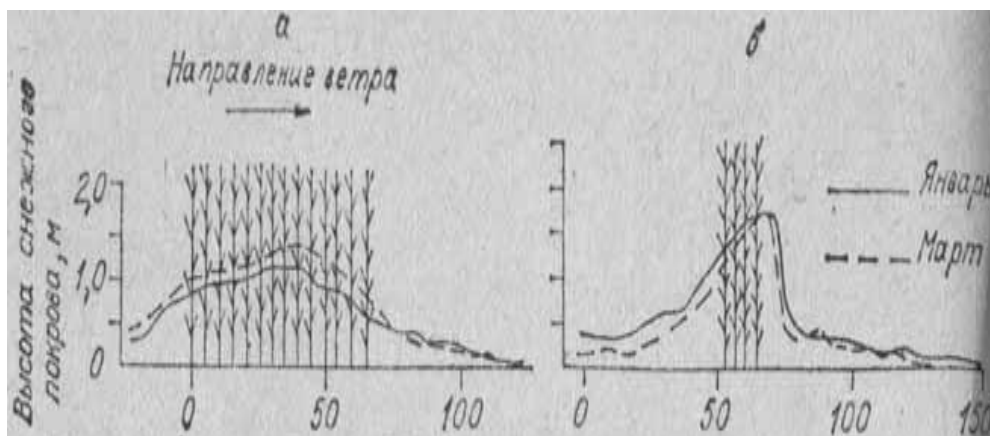


Рис. 37. Распределение снега за широкой (а) и узкой (б) лесными полосами по М. Е. Черепанову (Омская область).

С января по март полосами собрано мало снега, так как немного было осадков. Перед широкой полосой снег еще продолжал задерживаться. Наветренный же вал продуваемой полосы "б" начал выдуваться. Сдувало снег и в подветренной зоне за счет, по-видимому, ветров противоположных направлений. Вал в этой полосе стал более узким. Если бы зима продолжилась, то подступы к узкой полосе оголились бы от снега и справа, и слева, обрушив на оставшийся вал ненасыщенную метель. В полосе не осталось бы снега совсем. Такие курьезы встречаются нередко.

В третьей главе сказано о метелевом испарении, как об одном из главных (если не главном) источнике потерь снега. При низких температурах, характерных для сибирских метелей, преобладает мелкий, с размерами частиц 0,1-0,25 мм, сухой снег. Мелкие фракции, легко вздымаясь вверх, испаряются особенно интенсивно. Нам теперь известно, что срок "жизни" снежинок таких размеров не превышает десятков минут.

В степных районах испарившийся под действием сильных и продолжительных метелей снег безвозвратно теряется. Снесенный в понижения рельефа, он тоже "не помогает" сельскому хозяйству. В этом одна из главных причин сибирских засух, иссушения озер в зонах вырубки леса. Как правило, засухам предшествуют суровые малоснежные и ветреные зимы, когда поля к весне начисто оголяются от снега.

Метелевое испарение снега - глобальный фактор, определяющий деградацию ландшафтов, иссушение ранее плодородных земель. Знаменитый русский агроном Александр Алексеевич Измаильский так писал в 1883 году об иссушении украинских степей:

"Прежняя степь с ее гигантской растительностью должна была совершенно иначе относиться к атмосферным осадкам, так что при том же самом годовом количестве этих последних прежняя степь несомненно была богаче влагой, чем теперешняя. Эта последняя, благодаря уплотненной поверхности, бедно покрытой растительностью, не в состоянии задерживать ни снега, который малейшим ветром сносится с ее поверхности, ни воды летних ливней, большая часть которых, не успевая всосаться в почву, стекает с нее, вызывая лишь летнее половодье. Такое отношение почвы к атмосферным осадкам, продолжаясь в течение долгого периода лет, должно было привести к понижению уровня грунтовых вод и вообще способствовать иссушению местности".

То же в еще большей степени относится к сибирской Кулундинской степи, площадь которой 90 тыс. км² - это пять степных областей Украины! Еще в начале нашего столетия Кулундинская степь была покрыта богатой ковыльно-типчаковой и ковыльно-разнотравной растительностью, предохранявшей снежный покров и почву от выдувания и испарения. В то же время уровень кулундинских озер был выше современного, реки были полноводными. Переселенцы селились на их берегах. Сейчас вся территория Кулундинской степи распахана, колковый лес сильно вырублен, уровень озер понизился на 2-3 м, вода в них засолена. Некоторые реки пересыхают. Река Багач превратилась в цепочку болот. Среднегодовое количество осадков, по данным Краснозерской метеорологической станции, составляет здесь 278 мм, что соответствует гидрологическому режиму полупустынь. 30% годовых осадков выпадает в виде снега и в значительной степени теряется в результате испарения и весеннего стока. Почва, как правило, к концу зимы освобождается от снежного покрова. Сухая весна способствует развитию пылевых бурь.

Для районов, подобных Кулунде, жизненно необходимо искусственное облесение территории и снегозадержание. Снегомелиорация, т. е. управление снеговой влагой, нужна, как воздух. Как же быть? Как быть, прежде всего, в суровых условиях Сибири с заманчивым полезащитным лесоразведением, хорошо отвечающим современным требованиям охраны и улучшения природной среды?

Более ста лет назад Александр Иванович Воейков в статье "О влиянии лесов на климат" отвечал скептикам так:

"Когда у нас заходит речь о разведении лесов, то нередко встречается такое выражение, что не засухи завясят от безлесья, а безлесья от засух. Я не могу согласиться с этим; что в южной России вообще преобладают степи, еще не доказывает, чтобы там не могли расти леса. Я уверен, что многое можно сделать там для лесоразведения и что климат не может препятствовать этому". Так говорил основоположник снеговедения, и его высказывание полностью приложимо к Сибири.

Полезащитные лесные полосы призваны защищать поля от потерь влаги и выдувания ветром плодородной почвы. Они - комплексное средство агролесомелиорации. Ими осуществляется глубокое преобразование и улучшение ландшафта. Они должны успешно работать и летом, и зимой на пользу земледелию.

Полезащитная лесная полоса, с одной стороны, биологический объект. Для ее выращивания нужны обширные знания и опыт лесомелиораторов, представителей благородной специальности, особо важной в условиях грозящего нашей планете экологического кризиса.

С другой стороны, полоса должна обладать заданными аэродинамическими свойствами, чтобы она улучшала микроклимат защищаемого ею поля и, в частности, способствовала накоплению и сохранению снега. Надо считаться с тем, что аэродинамические свойства живой полосы зависят от ее возраста и сезона. Здесь лесомелиораторам необходимо знание аэромеханики леса и лесных полос, аэромеханики живых объектов.

По поводу сути аэродинамической работы лесных полос выдвигалось немало неправильных гипотез.

Считалось, например, что полезность полос определяется их вихрепреобразующей эффективностью, т. е. разрушением, дроблением больших вихрей в полевого ветрового потока, уменьшением некоего "эффективного размера вихря" и приобретением "запаса завихренности", который должен быть максимальным для хорошо работающих полос. Никто не мог вразумительно разъяснить, что все это означает.

Часто завихренность путали с турбулентностью. Это разные вещи. Говорилось о переходе турбулентного ветра за полосой в ламинарное, т. е. параллельноструйное нетурбулентное течение. Но природные ветровые течения турбулентны даже при малых скоростях ветра, то есть в ветровом потоке нет отчетливо различных параллельных струй. Происходит интенсивное перемешивание струй с полной потерей их индивидуальности.

Живучей оказалась версия о сжатии воздушной среды перед полосой и разрежении за нею. Считалось, что для сжатия воздуха не надо больших усилий, что, ударяясь о лесную полосу, воздух должен сильно сжиматься. Сравнительно недавно (1971 г.) считалось даже, что при сжатии воздуха лесной полосой выделяется много тепла³. Эта версия ошибочна. Если воздушный поток, имеющий скорость, присущую наисильнейшим природным ветрам, встречается с препятствием, то существенного уплотнения воздуха быть не может, как давно установлено экспериментальной аэродинамикой. При скоростях ветра до 70 м/с сжимаемость воздуха не превышает 1%.

Много было споров и разногласий по поводу зон влияния лесных полос. Даже продуваемые линейные полезащитные лесные полосы далеко не идеальное средство снегозадержания и предотвращения выдувания почвы. Подветренная зона влияния такой полосы не простирается далее расстояния, равного 10-15 ее высотам (10-15 Нл). Теперь это признано и в нашей стране и за рубежом. На расстоянии от полосы, равном 20 Яд и более, восстанавливается режим открытого поля.

На рис. 37 видна сильная неравномерность снегоотложений на расстоянии 30 м от полос в обе стороны. Здесь таяние снега происходит в разное время в зависимости от высоты отложения, и сельскохозяйственные растения угнетаются. Эти свойства полезащитных лесных полос были известны еще в начале нашего столетия, но о них забыли в пятидесятых годах, когда стали в больших масштабах закладывать государственные и колхозно-совхозные лесные полосы с чрезмерно большими, шириной 500 м и более, межполосными разрывами, не считаясь с почвенно-климатическими условиями. К сожалению, находились тогда люди, которые считали правильными такие размеры межполосных разрывов только потому, что это было удобно для работы сельскохозяйственных машин, поскольку создавались открытые поля площадью 0,5-1,0 км².

Какими должны быть полезащитные лесонасаждения? Требования, предъявленные к ним, очень противоречивы. С одной стороны, им надлежит быть предельно узкими, чтобы не работать "на себя" и ровнее собирать снег на полях, а с другой - способными выжить в степи.

С аэродинамической точки зрения как будто бы самое лучшее решение - однорядная или двухрядная аллеяная полоса без кустарников. Нижняя часть аллеи полностью проницаема для ветра, поэтому в полосе снег не задерживается. Тормозят ветровой поток кроны. Если высота деревьев аллеи Нл, то тормозящее влияние крон распространяется на подветренном поле на расстояние 14-15 Нл. Скорость ветра снижается на 25-30%. Этого достаточно, чтобы уменьшить перенос снега в несколько раз.

В четвертой главе сообщалось, что общий расход твердых частиц во взвешивающей среде пропорционален $(v_z - v_{z0})^3$, где v_z, v_{z0} - соответственно скорость потока, измеренная на высоте z , и скорость начала переноса твердых частиц, измеренная на той же высоте. Снежный груз метели очень чувствителен к уменьшению скорости ветра. Опыты в аэродинамических каналах и полевые наблюдения показали, что выпадение снега из метелевого потока пропорционально отношению $((v'_z - v_{z0}) / (v''_z - v_{z0}))^3$, если скорость потока уменьшается от v'_z до v''_z . При $z = 0,2$ м $v_{z0} = 3$ м/с.

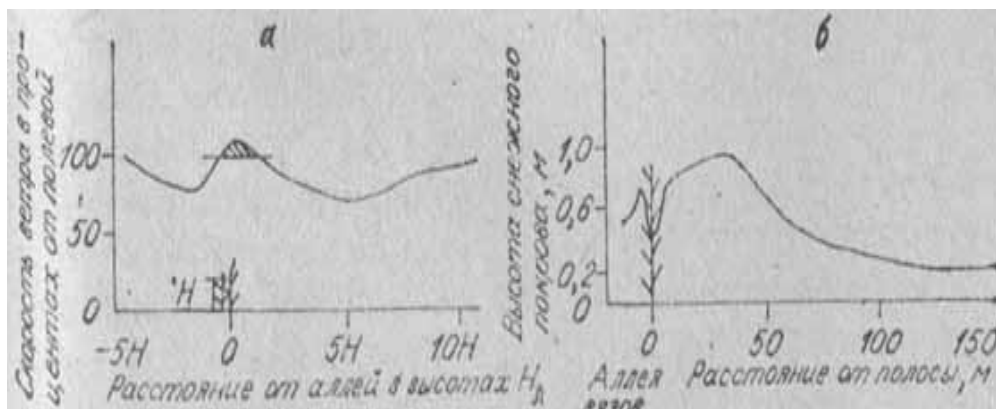


Рис. 38. Работа аллеяных лесных полос.

а - изменения скоростей ветра в процентах от полевой его скорости; б - снегоотложения.

Пусть полевая скорость ветра $v_{0,2}$ равна 8 м/с и снижена полосой до 6 м/с. Тогда перенос снега уменьшится в $[(8-3)/(6-3)]^3=4,5$ раза. На рис. 38, а показано влияние модели двухрядной аллеи на ветровой поток при ее продувании в аэродинамической трубе. В наветренной стороне на протяжении 5 Нл и в подветренной зоне шириной до 14 Нл скорость ветра меньше полевой с максимальным падением до 75%. Около полосы и в ней самой образуется зона (на рисунке заштрихована, выдувания шириной 1,5 Нл. Полевые анемометрические данные сходны с модельными. Фактические снегоотложения, вызванные аллейними полосами, примерно отвечают такому распределению скоростей ветра.

В селе Тимашево (Средняя Волга) агрономом Гродским в 1890 году посажена и выращена в результате многолетнего тщательного ухода однорядная вязовая аллея. Высота снегоотложений в этой полосе показана на рис. 38, б. В самой полосе снега мало. Он распределен здесь гораздо равномернее. И все-таки снегоотложения остаются неравномерными!

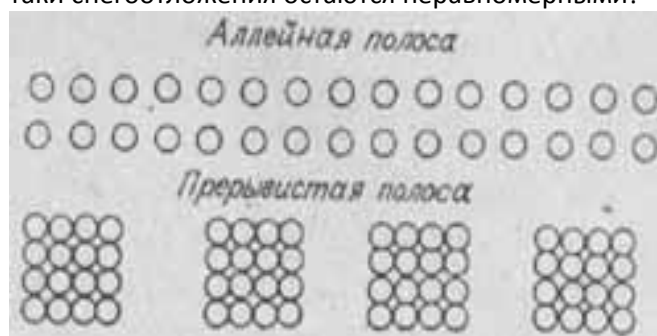


Рис. 39. Схемы аллеиной и прерывистой полос в плане.

Опираясь на свой опыт лесоразведения в степи Северного Казахстана, И. Т. Макарычев считает, что узкие полосы там выращиваются успешно и в отличие от широких не страдают от снеголома. Но достигнутые Макарычевым показатели несравнимы со средним уровнем. Фактически узкие и тем более аллеиные полосы в сибирских степях при холодном климате и недостаточном увлажнении намного труднее выращивать по сравнению с районами европейской части СССР. Лесные посадки должны занимать какую-то оптимальную площадь с запасами влаги, достаточными для роста деревьев.

Один из возможных выходов из противоречия между аэродинамическими и биологическими требованиями подсказывает схема, приведенная на рис. 39. Почему бы нам вместо изолированной проницаемой непрерывной аллеиной полосы не вырастить прерывистую цепь лесных куртин? Каждая из куртин будет небольшой рощицей, где можно создать приемлемые условия для произрастания деревьев и кустарников, а проницаемость всей цепи установить ту же, что и для аллеи.

Четверть века тому назад под руководством автора книги был организован опытный участок прерывистой лесной полосы в одной из восьмьюрядных полевых защитных полос шириной до 15 м на полях Огурцовского совхоза под Новосибирском. Ширина разрывов, прорубленных в полосе, равнялась 4,0-5,5 м. По-видимому, их следовало сделать шире. На рис. 40, а показан поперечный разрез снегоотложений, накопленных за зиму 1956/57 года. При средней высоте лесной полосы 6 м ее заметное влияние распространилось более чем на 20 Нл, что можно объяснить, должно быть, легким понижением местности в подветренную сторону от полосы со средним уклоном 4,5%.

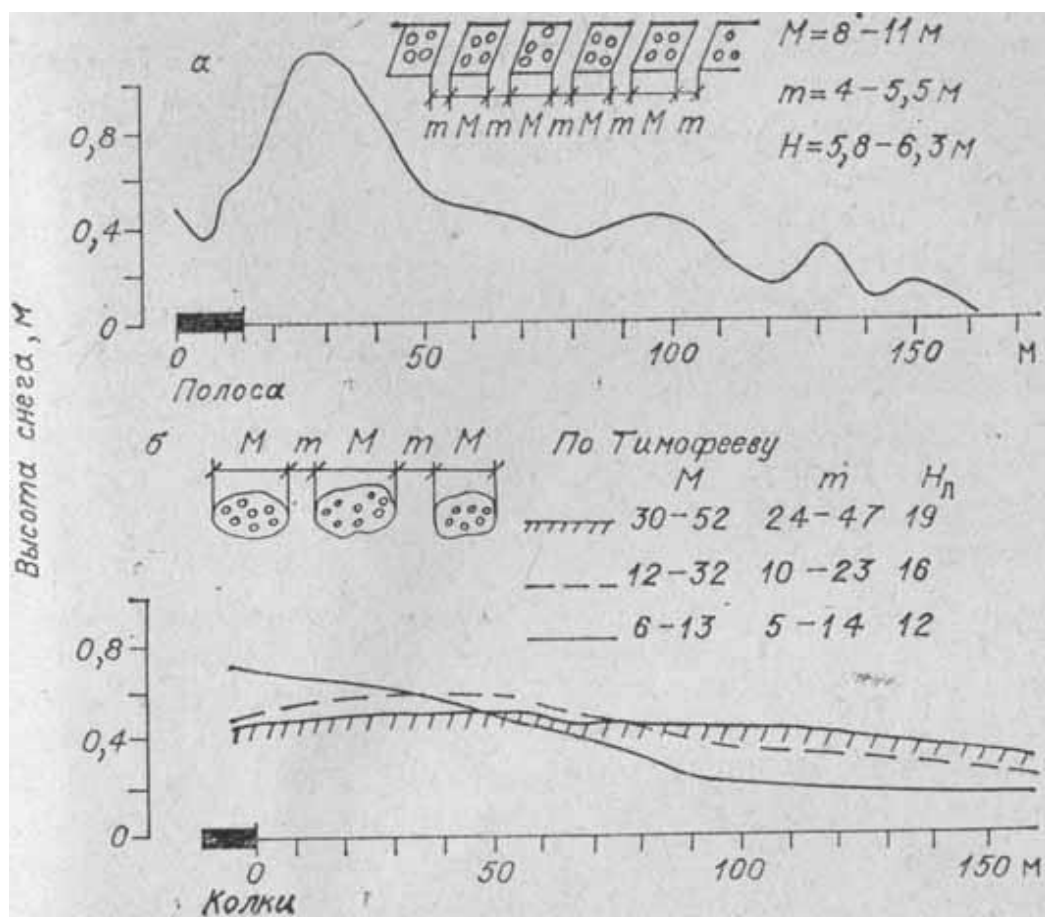


Рис. 40. Снегоотложения за прерывистыми лесными полосами (а) и колковыми рядами (б).

Возвратимся к рис. 38, б. Здесь видно некоторое сходство с работой аллеиной полосы. В аэродинамической трубе параметры моделей прерывистых лесных Полос варьировались так, чтобы добиться одинакового с аллеей эффекта. Цель была достигнута при $t/M = 0,5$. Разрывы t в Огурцовском совхозе делались в соответствии с этим соотношением. Опыты с моделями показали также, что более равномерное изменение под ветренными скоростями ветра получается при значениях $M/H_n > 2$, где H_n - высота деревьев в полосе, M - ширина куртины.

Агроному Г. Тимофееву удалось в 1962 году найти "природную модель" прерывистой цепи куртин при $M/H_n > 2$ и $t/M \sim 0,5-1$. В Саргатском районе Омской области он измерил снегоотложения за цепочкой небольших березовых рощиц (колков), расположенной перпендикулярно направлению преобладающих зимних ветров. Размеры рощиц, этих естественных куртин и снегоотложений за ними показаны на рис. 40, б. Это, пожалуй, то, что нужно - почти ровная снежная "скатерть".

Сама природа указывает способ выращивания лес в трудных условиях Сибири в виде множества мелки березовых "колков", покрывающих Западно-Сибирскую низменность. Здесь есть над чем подумать!

Для куртин вовсе не обязательна продуваемость они вряд ли потребуют рубок ухода. Узкие лесные полосы, будучи вначале продуваемыми, со временем густеют, становятся плотными. Приходится вырубать лишнюю поросль. Куртины же можно предоставить самим себе,

СНЕГОПАХАНИЕ

Знаменитый русский почвовед Павел Андреевич Костычев 90 лет тому назад писал: "С помощью одних живых изгородей нельзя избавиться от недостатка снега на полях зимой. Каждая изгородь задерживает снег только на известном расстоянии, дальше которого влияние изгороди прекращается".

Именно об этом мы говорили до сих пор будто бы внове, а оно уже было известно и сказано давным-давно... Воистину, новое есть хорошо позабытое старое!

Мы приближаемся к временам сплошного внедрения идеальных "живых изгородей". А сейчас, конечно, существующим лесным полосам надо помогать дополнительными средствами снегозадержания на межполосных полях. Если нет полезащитных полос, надо задерживать снег другими способами. Самый общепринятый у нас - снегопахание.

Снегопахание, как и снежная мелиорация вообще, не имеет широкого распространения за рубежом потому, что там посевные площади находятся в более благоприятных климатических условиях, и фермерские хозяйства предпочитают использовать для задержания снега инвентарные средства защиты (легкие щиты, сетчатые рулоны и т. д.).

На рис. 41 изображены принципиальные схемы (в плане) некоторых применяющихся снегопахов: клина-угольника, простого риджера, американского снегового плуга, отвального риджера, риджера с откидной ограничительной плитой, уплотнителя-валкователя. Самый простой снегопах - клин, или угольник. Впервые он применен на конной тяге в конце прошлого столетия А. А. Измаильским.

Клин в условиях Сибири не оправдал себя. Врезаясь в снег острым концом, он рыхлит и раздвигает снежные комья в стороны. Оголяется полностью или частично большая, по ширине угольника, полоса земли. Валики снега на краях получившейся траншеи невысоки и частично в нее осыпаются. Валики из сухого морозного снега быстро развеиваются ветром, и в итоге нередко труд затрачивается впустую. Снегопах-риджер работает лучше. Он представляет собой горловину, вбирающую снег широким концом и выпускающую через узкий конец готовый валик, спрессованный с двух сторон. Ясно, что сопротивление движению риджера больше, чем у клипа. При плотном снеге риджер иногда "всплывает" на поверхность снежного покрова.

В пятидесятых годах Д. А. Глейберзоном предложен отвальный риджер (рис. 41, г) СВ-2,6, снабженный лемехами, подрезающими снег. Нож американского снегопаха-бульдозера тоже имеет отвальный край, образующий после прохода снежный вал. Это как бы одно из крыльев угольника.

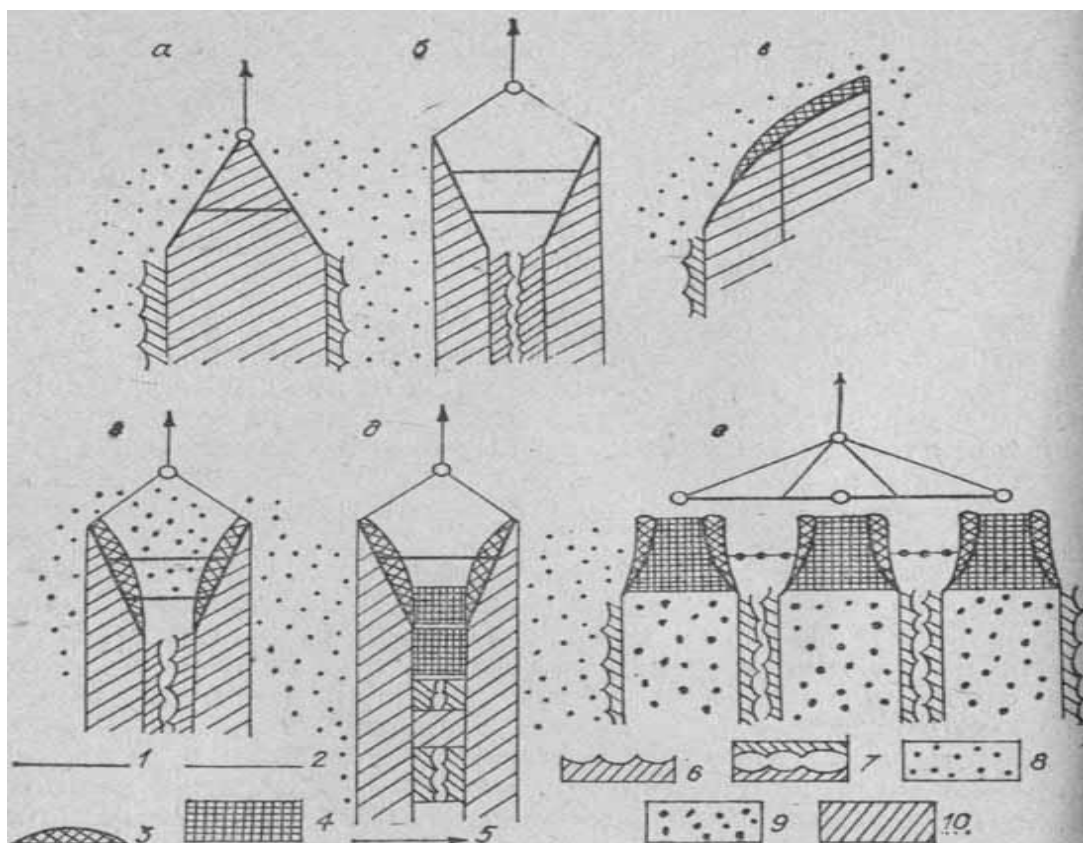


Рис. 41. Схемы работы снегопахов разных конструкций.

а - клин-угольник; б - простой риджер; в - американский снеговой плуг; г - отвальный риджер; д - риджер с откидной ограничительной плитой; е - уплотнитель-валкователь. 1, д - рама в жесткие связи; 3 -

отвальные поверхности; 4 - уплотняющие поверхности; 5 - направление движения; в - один отвал; 7 - две снежных отвала; 8 - нетронутый снежный покров; 9 - зона уплотнения снега; 10 - зона удаления снега.

На Западно-Казахстанской сельскохозяйственной опытной станции укрепили над выходом из горловины риджера тяжелую металлическую плиту на шарнирах, висящую отвесно, пока горловина заполняется снегом (см. рис. 41, д). Плита, не выпуская снег из горловины, уплотняет его и, наконец, под его напором поднимается в горизонтальное положение. В результате снежный валик выходит наружу. Он получается прерывистым, высоким и устойчивым. Прерывистость существенно не сказывается на задержании снега.

Отвальные риджеры хорошо работают при плотном насте, когда обычный риджер "всплывает". Отваливаемые плиты наста образуют зубчатую прочную преграду и надежно противостоят выветриванию.

Кроме ваякования, полезно полосное уплотнение снега катками с последующим прикатыванием снежной поверхности металлическими листами. Эффект сходен с полученным нами в аэродинамическом канале твердением снега после тщательного его приглаживания и выдержки (см. вторую главу). Метель тогда "не хотела" возникать ни при каких скоростях ветра.

Уплотненный и приглаженный снег не только лучше сопротивляется ветровому выносу, но и препятствует стоку талой воды в начале теплого периода, когда почва еще не протаяла и не впитывает влагу. Это самый опасный момент, ибо если не задержать сток талой воды, то хотя и снег на полях, хлеба в закромах не будет. В приземном слое естественного снежного покрова могут образовываться разрыхленные слои глубинного инея, легко пропускающего влагу. Много талой воды может стечь безвозвратно под снегом. Уплотненные полосы создают барьеры этому тайному стоку. Время протаивания снега прямо пропорционально его плотности (см. первую главу), поэтому плотный снег тает медленнее рыхлого. Наоборот, загрязненный грунтом при снегопахании, он тает значительно быстрее чистого снега.

Доцент Омского сельскохозяйственного института В. Е. Ковтунов предложил оригинальный снегопах - уплотнитель-валкователь УВС-9,0 (см. рис. 41, е). Три полые широкие лыжи с боковыми отвалами соединены между собой гибкой и жесткой связями и тянутся по снегу одним трактором ДТ-75. Металлические тяжелые лыжи пригружаются сверху дополнительной тяжестью - песком или намороженным льдом. Из-под лыж тянется слой уплотненного снега, а межлыжные промежутки работают, как два риджера. Новые снегопахи проектируются с тщательным учетом физико-механических свойств снега.

В механизированном снегозадержании много еще нерешенных проблем. Главная из них - уменьшение количества проходок снегопахов. Сэкономить на числе проходок - это значит уменьшить не только время работы машин, но и площадь, "проутюженную" тракторами, что особенно важно для посевов озимых культур. Количество проходок снегопахов зависит от расстоянии между соседними проходками, в свою очередь зависящих от размеров зон заметного влияния снежных валиков па ветер. Чем ниже и шире валик, тем лучше он обтекается ветром и тем меньше его зона влияния.

В. Е. Ковтунов установил следующие оптимальные расстояния между валиками при одной и той же их ширине 0,8-1,0 м:

Высота валика, м	0,3	0,4	0,5	
Средние расстояния между осями валиков, соответствующие максимуму снегозадержания, м	3,0	6,0	12,0	1,8
Расстояния, выраженные в высотах Нв	6 Нв	7,5 Н	12 Н	

Если бы удалось придать снежным валикам плохо обтекаемую форму в виде стенок небольшой в сравнении с их высотой ширины, можно было бы довести расстояние между ними, учитывая их взаимное влияние, до 20 Я, и более, то есть вдвое-вчетверо сэкономить на количестве проходок.

Линии из высокопроницаемых щитов высотой 1 м, удаленные одна от другой на расстояние 50 м (50 Нщ), задерживают на полях мощный слой снега со средней высотой 0,7-0,8 м. К сожалению, даже такие легкие щиты требуют расхода лесных материалов до 2-3 м³ на 1 га и больших затрат ручного труда для их расстановки и перемещений. Если удастся механизировать изготовление и расстановку столбиков или плит из прессованного снега высотой 0,7-1,0 м и шириной 0,2-0,3 м в поперечнике, задача будет решена почти оптимально.

Для сельскохозяйственного снегозадержания используются многие другие подсобные средства: навозно-перегнойные пакеты (совмещают снегозадержание с вывозом удобрений), хворостяные и снежные кучи и тому подобное. Часто такие "тычковые" преграды расставляют по полю в шахматном порядке. Но это наименее удачный вариант, так как одиночная преграда обтекается воздушным потоком значительно лучше, чем составленная из нескольких преград стенка. "Тычки" надо располагать или в линию, стенкой, перпендикулярной направлению господствующих зимних ветров, или крупными клетками, если направления метелей меняются.

В условиях сибирских открытых степей очень эффективно так называемое куlisное снегозадержание. Суть его заключается в том, что на парах и зяби выращивают кулисы из подсолнечника и других высокостебельных растений с межкулисными промежутками 4-10 м. На зиму оставляют их стебли, которые надежно задерживают снег.

По внедрению и совершенствованию куlisного снегозадержания в Сибири много сделано известным снеговедом и агрономом профессором Московского государственного университета Александром Михайловичем Шульгиным. Но кулисы слишком уж биологичны для инженера. Я позволил себе только упомянуть о них, не вдаваясь в суть, иначе краткий обзор безмерной проблемы снегомелиорации был бы явно неполным.

СИБИРСКИЕ ФРУКТЫ И СНЕГ

В Сибири, на Северо-Востоке, где проходит БАМ, на Крайнем Севере - повсюду величественна, прекрасна и богата природа. Но не растут там экзотические фрукты, бахчевые культуры, любящие тепло. А нельзя ли их научить перезимовывать и давать сибирякам такие же великолепные и вкусные плоды, как и на благодатном Юге? Оказывается, можно. И в решении этой проблемы снег играет главную, определяющую роль.

С первых шагов культурного освоения Сибири русские биологи, садоводы и селекционеры ведут кропотливую работу, пытаясь вывести морозостойкие сорта плодово-ягодных культур, которые могли бы расти и давать урожай на Севере. Значительных успехов добились ботанические сады Сибирского отделения и Кольского филиала Академии наук СССР, Томского государственного университета, садоводы-профессионалы и садоводы-любители.

Главные климатические препятствия - продолжительные и суровые зимы, поздние и ранние заморозки, резкие перепады температур. Но есть и плюсы: много солнечных дней, длинный световой день, жаркое лето. Негативные стороны климата смягчаются только "снежной шубой" и влагообеспеченностью при ее таянии. Интересно, что дикорастущие плодово-ягодные растения, широко распространенные на Востоке, неустойчивы к низким температурам, зимуют и выживают лишь благодаря снегу. В бесснежные зимы они угнетаются и гибнут.

Сибирское и северное садоводство неотделимо от умения использовать снежный покров, управлять им. Надо, конечно, знать свойства снега и динамику его взаимодействия с зимующими растениями. Мало снега - плохо, слишком много - тоже плохо, так как растения выпревают, чрезмерно долго находятся в состоянии "спячки", подвергаются механическим повреждениям, когда снежный покров оседает.

Такие культуры, как крупноплодные яблони, могут перезимовывать только в стелющемся состоянии. Садоводы специально формируют их кроны: пригибают ветви к земле, чтобы их можно было окучивать снегом при наступлении первых морозов. В этом деле много неизученных проблем, прежде всего в

области динамики внутренних и внешних связей системы живые организмы - снег. Это - основной раздел биогляциологии, новейшей науки, изучающей жизнь растений и животных в природных льдах. Данная наука делает первые шаги. В 1966 году в японском городе Саппоро проходила одна из первых в мире биогляциологических конференций.

Биогляциология в плодоводстве дает интересные результаты. Известный барнаульский садовод Григорий Владимирович Васильченко, хорошо изучивший свойства снега с помощью Гавриила Дмитриевича Рихтера, определил оптимальные размеры садов и порядок размещения в них культур по биологическим признакам. Так, в наветренной стороне сада, где метели наносят много плотного снега, надо размещать культуры, любящие тепло и устойчивые против снеголома. Подветренная сторона с рыхлым снежным покровом предназначается для растений, легко повреждаемых при осадке снега. Таким образом, в разработанной Г. В. Васильченко дифференциации культур гармонично сочетаются свойства "снежной шубы" и самих растений. Наилучшая ширина сада по направлению господствующих метелевых ветров, по Г. В. Васильченко, 500-700 м. При ширине садов меньше 500 м затрудняется дифференцированное размещение культур. По данным Г. В. Васильченко, высота снежного покрова оказывает решающее влияние на урожаи сибирских фруктов и особенно ягодных культур (рис. 42).

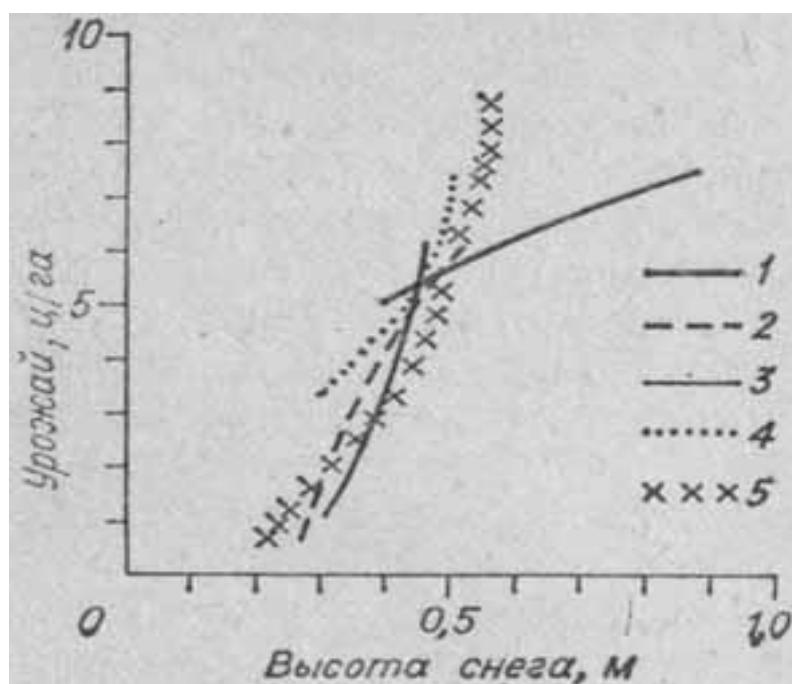


Рис. 42. Зависимость урожая плодово-ягодных культур от высоты снега (по Г. В. Васильченко).
1- яблоня стланцевая; 2 - вишня степная; 3 - малина; 4 - черноплодная рябина; 5 - земляника.

СНЕЖНЫЙ ТРАНСПОРТ

Снежный покров издавна использовался для движения транспортных средств. Зимой ездили на санях. Период установления снежного покрова называли первопутком. Нарты - привычный транспорт Севера.

В настоящее время создается много конструкций механических снегоходов-сноумобилей, успешно применяющихся в северных широтах. Снегоходы делятся на две крупные категории - лыжные и гусеничные. Лыжные опираются на снег одной или несколькими широкими и длинными скользящими поверхностями, которые перемещаются по снегу подобно лыжам. Тяга воздушная, осуществляемая винтомоторной установкой. Опора гусеничных снегоходов - широкие гусеницы, напоминающие тракторные. Если гусеница одна, то впереди устанавливаются направляющие лыжи, связанные с рулевым управлением.

В СССР стали широко применять гусеничные мотонарты "Буран", развивающие скорость до 50 км/ч. Они успешно испытаны на ледниках Памира, а в 1978 году на них сделаны пробные перевозки пассажиров и грузов по крутым склонам Эльбруса до высоты 4800 м.

Аэросанный транспорт в СССР имеет давнюю историю. В России впервые он был использован для военных целей в 1914-1915 годы. В 1919 году по предложению профессора Николая Егоровича Жуковского была создана Комиссия по постройке аэросаней (КОМПАС). Советские аэросани применялись во время Великой Отечественной войны. В шестидесятые годы конструкторы создали могучие аэросани КА-30 с мощностью двигателя 190 кВт, массой полезного груза 1000 кг и максимальной скоростью движения по ровному снегу до 100 км/ч.

Крупный недостаток аэросаней - ограниченная проходимость, невозможность движения на участках с оголенной почвой, нередко встречающихся в начале и в конце зимы, а также при сдувании снега сильными метелями. В конструкторском бюро А. Н. Туполева в 1965-1966гг. испытывалась новая машина - аэросани-амфибия, способная преодолевать водные пространства, полыньи и разводья. Ее характеристики: мощность двигателя 190 кВт, полезная нагрузка 500 кг.

В шестидесятых годах преподаватель Новосибирского электротехнического института В. В. Сбоев сконструировал легкие аэросани - "амфибию" индивидуального пользования. Изучалось несколько модификаций машин. Двигатель амфибии НЭТИ-5 имел мощность 30 кВт, полезную нагрузку 370 кг, среднюю скорость 40 км/ч. Расход горючего 0,25 кг на 1 км пути, в четыре раза меньше, чем у амфибии "ТУ".

Снегоходы-амфибии пригодны для эксплуатации круглый год. Опорная поверхность - кузов, представляющий собой как бы одну большую лыжу.

При разработке параметров "амфибии-НЭТИ" использовались все имеющиеся сведения о физико-механических свойствах снега, но было найдено и кое-что новое для снеговедения. Впервые комплексно исследованы режимы глиссирования амфибий на рыхлом снеге и "лыжного" их скольжения по плотному насту. Дело в том, что днище машины "плавает" в рыхлом снеге, как в очень вязкой жидкости, и ее движение в нем сходно с движением речного глиссера. Следовательно, форма "лыжи"-днища должна быть оптимальной как для режима скольжения, так и для режима глиссирования.

За рубежом выпускаются промышленностью в основном гусеничные снегоходы. Альпийский "Ратрак" имеет четыре гусеницы шириной каждая по 50 см и может, не проваливаясь, перемещаться даже по очень рыхлому снегу.

В Канаде и США с 1970 года выпускается в год до 600 тыс. сноумобилей на гусеничном ходу. Мощность двигателей 12-40 кВт. Сноумобиль имеет одну резиновую гусеницу шириной от 40 до 60 см с наклепанными на нее стальными пальцами внутри и шпорами снаружи.

7 апреля 1968 года с острова Элсмир Канадского Заполярья четыре малых сноумобиля стартовали к Северному полюсу. Маленькая "снегоходная" экспедиция под руководством служащего страховой компании Р. Плейстеда достигла полюса 20 апреля, почти повторив маршрут Роберта Пири в 1906 году. Северный Ледовитый океан не шоссе... Он покрыт разрозненными льдинами. Временами приходилось долго ждать, когда разводья между льдинами покроются тонким льдом, не выдерживающим веса пешехода, но достаточным для прохода машин. Пройдено расстояние 1526 км в ужасающе сложных условиях. Ходовое время составило 150ч 45 мин со средней скоростью передвижения около 10 км/ч.

Машинам, приспособленным только для движения по снежной целине, вряд ли принадлежит будущее. Предпочтительнее вездеходы универсального назначения. Такова, например, "амфибия".

На Аляске и в Канаде применяются тяжелые роллигоны американской фирмы "Бехтер". Роль колес выполняют резиновые цилиндры низкого давления, Роллигоны несут полезный груз 5 т, передвигаются со скоростью 50 км/ч по рыхлому снегу и заболоченной тундре. На песке не оставляют следов. Растительный покров тундры выдерживает без повреждений до 100 проходов роллигона на одном и том же месте, что очень важно для сохранения природной среды в суровых условиях Севера.

Снег используют и для сооружения дорог. Очень развито строительство снежных покрытий автомобильных дорог и аэродромов. В одной Швеции ежегодно сооружают 30-35 тыс. км дешевых снежно-ледяных дорог. Применяются виброуплотнители и цепные рыхлители в соединении с листовым уплотнителем, которые доводят массовую плотность снега до $0,5 \text{ г/см}^3$.

Однако и при такой плотности тяжелые автомашины повреждают покрытие. Необходима плотность не менее $0,55 \text{ г/см}^3$ и 2-3-дневная "выдержка", а также несколько проходов тяжелых гусеничных тракторов, чтобы полотно снежной дороги стало пригодным для бесперебойного движения автотранспорта.

При строительстве зимних дорог, зимников, на нашем Крайнем Севере уплотненный снег накапливают так, чтобы законченный зимник возвышался над прилегающим к нему естественным снежным покровом на 25-35см. Тогда зимник не заносится снежными метелями.

Во время Великой Отечественной войны снег применялся у нас для отсыпки оснований для железных дорог сезонного пользования.

Снежное покрытие взлетно-посадочных площадок аэродромов, естественно, должно быть значительно прочнее. Легкие самолеты типа АН-2 и МИ-8, у которых колеса шасси имеют широкую площадь опоры, способны приземляться на ровной поверхности естественного неглубокого снега. Но для этого лучше и надежнее расчищенные, ровные ледяные поверхности.

Поверхность ледников Гренландии покрыта толстым снежно-фирновым слоем. Толщина его достигает 100 м и более, так что добраться до льда практически невозможно. Для устройства взлетно-посадочных полос там употребляют машины, измельчающие фирн в порошок. Измельченный снег прогревается по всей площади полосы и затем уплотняется тяжелыми катками. Таким способом создается несколько слоев толщиной до 75 см. После промерзания полоса способна принимать тяжелые самолеты. Но это, в сущности, уже не снежная, а ледяная полоса. Так же строятся взлетно-посадочные полосы в районе советских антарктических станций.

В Арктике и Антарктиде применяются самолеты с лыжными шасси. Удельное давление на покрытие при их посадке меньше, чем у колесных, но прибавляются новые задачи. Лыжи после долгой стоянки примерзают к снегу. Чтобы освободить самолет из плена, его раскачивают вручную или механическими средствами. Под лыжи подкладывают мешковину, резиновые коврики, покрывают их слоем специального состава типа тефлона для предотвращения смерзания со снегом. Для лыжных шасси опасно приземление при боковом ветре, когда большая часть нагрузки приходится на края лыж.

СНЕГ - СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Снег нужен не только для железнодорожного, автомобильного, снегоходного и воздушного транспорта. Он широко применяется при создании всевозможных инженерных сооружений как самый настоящий строительный материал.

Из снега и на нем могут строиться как постоянные сооружения, так и сезонные (только на зимнее время). Снег в инженерном строительстве выступает в трех основных качествах:

- 1) как основание фундаментов;
- 2) как материал для изготовления строительных конструкций и их деталей;
- 3) как среда, в которой прорываются траншеи, шахты, тоннели, устраиваются "подснежные" жилые и служебные помещения.

На Крайнем Севере на полярных ледниках снег часто становится неизбежным основанием для любых сооружений. В фирновых зонах ледников в снег погружают сваи, на нем основываются ленточные и сплошные фундаменты.

Эскимосы Аляски передают из поколения в поколение простую "технология" изготовления хижин - иглу из снежных кирпичей. В современных северных "снежных поселениях" специальными машинами из снега вырезают блоки. Делают снежные брикеты: предварительно размельченный снег укладывают в формы на 2-3 часа, чтобы снег затвердел. Наибольшая плотность брикетов достигается после трехнедельной выдержки в формах. Из снежных блоков и брикетов сооружают дома, складские помещения, гаражи, даже ангары для вертолетов. Снежные склады-холодильники могут служить долго, если снежная кладка изолирована от притока тепла извне и изнутри.

Во всех случаях применения снега как строительного материала надо считаться с его физическими свойствами. Обычная методика инженерных расчетов надежности и устойчивости сооружений на грунтовых основаниях здесь совершенно непригодна. Снег очень пластичен. Его деформации и напряженное состояние зависят от времени. В классических методах теории сооружений за основу принимается обычно статический расчет, когда предполагается независимость усилий и деформаций от времени, а переменные нагрузки учитываются так называемыми динамическими коэффициентами. В снежной механике основные факторы - время и температура.

Ведущим советским специалистом по теории строительства сооружений из снега и льда является профессор Московского государственного университета Кирилл Фабианович Войтковский. Главную проблему устойчивости оснований и сооружений из снега он видит в том, что они чувствительны к изменениям теплового баланса и пластичны, деформируясь даже под влиянием собственного веса при отсутствии нагрузок.

Расчеты прочности, теплосбаланса и ползучести снежных оснований и сооружений должны основываться на положениях физики сплошных многокомпонентных сред. Методика этих расчетов еще ждет своих исследователей.

Пластические деформации в снеге не затухают со временем, как в грунте, а продолжают неопределенно долгое время. Ликвидация просадок глубоких снежных оснований под нагрузкой невозможна. Можно лишь добиться их равномерности. Просадки снега зависят от интенсивности нагрузок, их динамики, форм и размеров фундаментов, от плотности, структуры и температуры снега. Плотность снега должна быть как можно больше, температура как можно ниже и нагрузки как можно меньше.

Найдено, что скорость просадки плотного снега (dy/dt) находится в следующей эмпирической связи с давлением на снег P : $(dy/dt) = a P^n$, где a - размерный коэффициент; n - показатель степени. При $P < 100$ кПа связь линейная, то есть $n=1$, а при $P = 250 - 1200$ кПа $n > 2$. Следовательно, давления на снег не должны быть более 100 кПа, иначе просадки могут сделаться катастрофическими. На глубоко вбитые сваи можно допустить давление больше 100 кПа, так как они опираются на глубокий всесторонне сжатый снег и, кроме того, удерживаются сцеплением своих боковых поверхностей со снежной средой.

Снег сопротивляется сжатию значительно лучше, чем растяжению. Поэтому своды и купола - наилучшие конструкции для "снежной архитектуры", поскольку составляющие их блоки всегда сжаты.

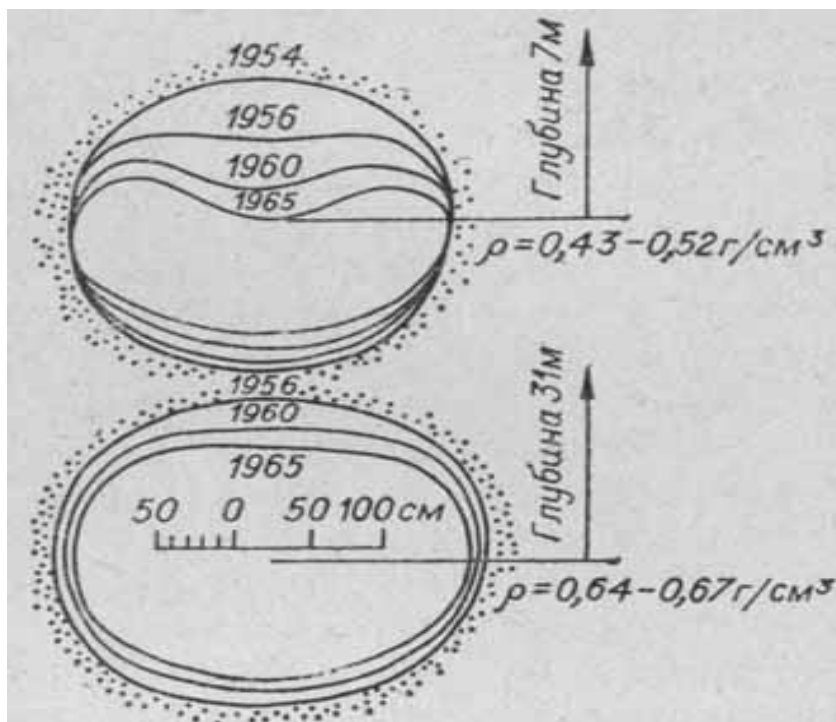


Рис. 43. Деформации снежных тоннелей в Гренландии.

На рис. 43 показаны деформации сечений двух снежных тоннелей, прорытых американцами в 1954-1956 гг. в снежнофирновой толще гренландского ледника в 360 км восточнее Туле на высоте 2000 м над уровнем моря. Тоннели диаметром 2,5 м были вырыты на глубинах 7 и 31 м от поверхности снега. За 11 лет сечение неглубокого тоннеля уменьшилось более чем вдвое. Прогиб потолка достиг 1,2 м, и он стал вместо вогнутого выпуклым, но не обрушился! Глубокий тоннель, вырытый в более плотном и холодном снеге, оказался стабильнее. Прогиб потолка не превысил 0,5 м. Заметнее выжимание боковых стенок за счет давления тридцатиметровой фирновой толщи. Тоннели требуют постоянного ухода: прогибающиеся стенки приходится срезать, чтобы восстановить прежний поперечник.

СНЕГ И СПОРТ

Лыжный и санный спорт, альпинизм невозможны без снега. Повышенное внимание к снегу в горах Западной Европы, Америки, у нас на Кавказе, в Хибинах, на Сахалине в значительной мере вызвано бурным развитием горнолыжного спорта. В зиму 1961-1962 гг. только в Скво-Вэлли (США) побывало 100 тыс. лыжников.

Американская снежно-лавинная служба, отвечающая за защиту людей от лавин и облеченная большими правами, зародилась через 7 лет после открытия первого американского горнолыжного центра в Алте, горнячком поселке, покинутом жителями с 1864 года, когда он был разрушен несколькими лавинами. Алта, расположенная в одном из ущелий хребта Уосатч Скалистых гор, стала испытывать удары мощных лавин после того, как старатели серебряного прииска вырубили весь лес на прилегающих склонах. Это был, говорят, единственный поселок, где женщин принудительно удаляли на зиму из-за лавинной опасности. В пятистах километрах к востоку от Алты создана новая горнолыжная база в г. Болдер у восточных склонов Перевального хребта. Там же Лесной службой США организован Центр исследований снежных проблем.

Главное для лыжника - хорошее скольжение по снегу. На эту злободневную тему выполнено множество исследований, и все же плохая скользкость антарктического снега вначале многих поразила. Скольжение по снегу редко рассматривалось с позиций динамики и особенностей теплопереноса в снежном покрове в целом.

Лыжи хорошо скользят после морозца, когда перенос пара идет снизу вверх, от слоев с высокой температурой к охлажденной твердеющей дневной поверхности. Если же воздух теплеет, перенос массы

и тепла меняет свое направление и поверхностные слои не твердеют, а разрыхляются; лыжи проваливаются, не скользят, на них налипают комья рыхлого снега.

Нередко, когда нет снега или он снесен ветрами, организаторы соревнований организуют дорогостоящее искусственное пополнение снежного "дефицита". Для накопления снега на слаломных трассах применяют снегозадерживающие и снеговыводящие заборы и щиты, транспортируют снег машинами.

СНЕГ-ЛЕТОПИСЕЦ

Одно из самых удивительных свойств снега было открыто при глубоком бурении льда на крупнейших ледниках мира. Ежегодно на поверхность ледников выпадает снег, несущий, как оказалось, ценнейшую информацию о годовых и вековых изменениях температуры воздуха над местом выпадения.

Атмосферные снежинки содержат в себе небольшие количества замерзшей тяжелой воды H_2O_{18} и D_2O_{16} тяжелым изотопом кислорода O_{18} и тяжелым водородом - дейтерием D . Количество тяжелых примесей определяется хорошо отработанными методами изотопного анализа. Оказалось, что содержание O_{18} и D чувствительно к температуре воздуха, возрастая с повышением температуры. Предполагается, что, попадая в изотермическую среду фирна и переходя далее в состояние льда, снежинки сохраняют первоначальное содержание O_{18} .

Отношение содержания O_{18} к общему количеству обычного кислорода O_{16} в образце, обозначаемое буквой δ , выражается в тысячных долях, в промилле (‰). Это отношение принято сравнивать с отношением количеств O_{18} и O_{16} в так называемом "стандарте". За международный стандарт δ_c принимается относительное содержание O_{18} в "средней океанической воде". Для анализа вычисляется величина δ по формуле

$$\delta = (\delta_o / \delta_c - 1) * 1000 \text{‰}.$$

Величина δ всегда отрицательна, так как пресная вода беднее изотопом O_{18} , чем морская.

Чем меньше δ (с учетом знака!), тем ниже температура воздуха T , при которой выпал снег. Для условий Антарктиды получена простая эмпирическая линейная связь между температурой T и величиной δ :

$$T = (\delta + 7,5) / 0,84.$$

Вероятно, соотношение справедливо и для центральных областей Гренландского ледника, сходного по толщине с антарктическим. Линейность формулы позволяет рассматривать кривую изменения δ с глубиной как кривую первоначальных температур выпадения снега в определенном масштабе.

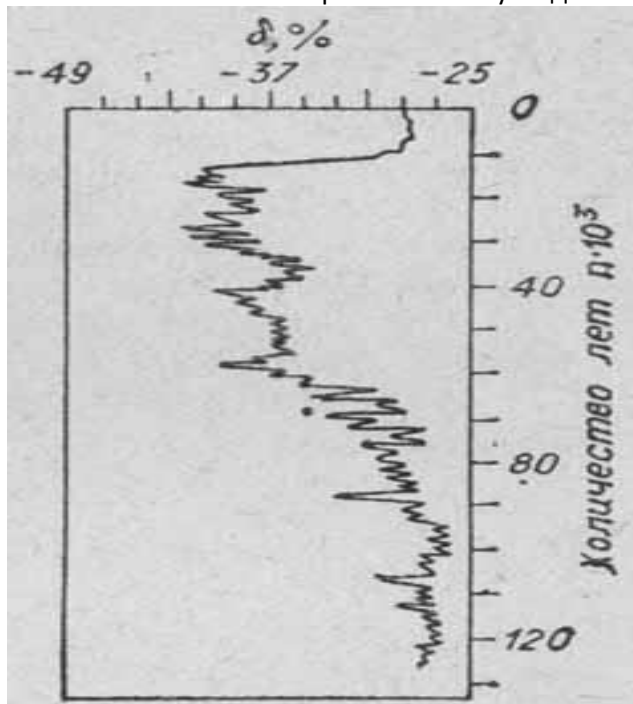
В центре Антарктиды и Гренландии среднегодовая! температура воздуха значительно ниже нуля и осадки выпадают только в виде снега. Пусть T_l - температура воздуха летом, T_a - то же, зимой. Ясно, что $T_l > T_a$. По тогда $\delta_l > \delta_a$, где δ_l , δ_a - летнее и зимнее значения δ .

В годовом слое снега, а в последующем фирна и льда эта особенность отразится, как в годовом кольце древесного ствола. Измеряя величину δ в ледяном керне, взятом из скважины, можно выделить годовые слои и определить тем самым возраст каждого кусочка керна. В верхних кернах годовые слои велики, 30-60 см. Толщина их уменьшается с глубиной сжатия и растекания льда. В среднем для глубинных скважин в Гренландии толщина годового слоя считается равной 1 см, а в Антарктиде - 2 см. На больших глубинах выделить годичный слой изотопным методом практически невозможно и возраст кернов определяется ориентировочно.

Рис. 44. Изменения содержания изотопа кислорода O_{18} на станции Кемп-Сенчури в Гренландии.

В центре огромных полярных ледников ледяные слои, растекаясь во все стороны, частично остаются на месте. Значит, можно проследить по этим слоям изменения климата Земли за сотни тысяч лет до нашей эры! Головокружительная перспектива!

На крупнейших ледниках мира с 1949 до 1979 года, т. е. за 30 лет, пробурено 125 глубоких скважин глубиной от 50 до 2164 м. Глубочайшие скважины пробурены в Гренландии на станции Кемп-Сепчури (1966 г., глубина 1387 м) и в Антарктиде на станции Доум-Си (1978 г., глубина 905 м), на станции Восток (1972 г., глубина 950 м) и на станции Бэрда (1968 г., глубина 2164 м). В настоящее время из этого большого опытного материала можно уже делать какие-то выводы.



На рис. 44 изображен график изменения величины δ за 125 000 прошедших лет, полученный по данным анализа ледяных кернов глубокой скважины на станции Кемп-Сенчури. Отчетливо виден последний интергляциал (см. первую главу), бурно начавшийся примерно 15 000 лет тому назад. Глобальное отступление ледников завершилось 7000 лет тому назад, когда сформировался климат с циклами небольших потеплений и похолоданий. Это и есть голоцен, в котором мы живем.

Последний, вюрмский, гляциал подкрадывался постепенно и начался в полную силу 60 тысяч лет тому назад. Это почти строго соответствует данным геологов. Но рисское оледенение, закончившееся 70-80 тысяч лет тому назад, "не получилось"... В чем дело? Неужели прежние геохронологические данные неправильны? Но тогда рисско-вюрмское межледниковье длилось более 40 тысяч лет.

Вряд ли это так. Чудес не бывает. Слишком сомнительны показания глубинных кернов. В приведенной нами таблице указаны изменения температуры льда на каждые 100 м глубины скважин на станциях Восток и Бэрда. До глубины 900 м температура меняется очень медленно - десятые доли градусов на 100 м. Начиная с глубины 900 м градиент скачкообразно увеличивается в несколько раз, т. е. изотермия резко нарушается.

Изменения температур ледяных кернов с глубиной бурения (плюс означает рост, минус - уменьшение)

Градиент температур ($^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$)

Глубина, м	Ст. Восток	Ст. Бэрда
0-100	+0,3	0
100-500	+0,32	-0,07
500-700		-0,16
700-900		+0,16
900-1500		+1,5
1500-2164		+2,7

Оказалось, что все глубокие скважины в изотермической зоне дают сходную и объективную информацию о том, что происходило 50-60 тысяч лет тому назад. Заглянуть глубже ледники не позволяют нам столь же уверенно, поскольку в результате пластических деформаций, огромных давлений и глубинного потепления годичные и более "солидного" возраста слои "размываются" настолько, что полностью теряют свою индивидуальность, а также индикационные признаки возраста и древних температур.

Но все-таки до нас доходят следы информации, переданные ледникам снежными кристалликами в те далекие времена, когда еще пылали костры неандертальцев...

СНЕГ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Рост народонаселения нашей планеты, промышленное и сельскохозяйственное освоение все новых и новых земель, усиливающееся загрязнение техногенными и антропогенными отходами воздуха, воды и почв обострило, поставило в разряд первоочередных задач человечества проблему охраны внешней и внутренней окружающей человека среды.

Техногенные загрязнения производятся промышленностью, средствами транспорта, бытовой техникой. Человек может быть и непосредственным источником антропогенных загрязнений. Внешняя среда - природа. Внутренняя среда создана самим человеком. Это - жилье, начиная от эскимосских иглу до современных коммунальных домов и коттеджей. Это - территории городов, поселков, сел, учреждений, промышленных предприятий, сами предприятия и учреждения, сады, парки и т. д.

Резко расширился предмет экологии, науки о взаимодействии сообществ организмов между собой и с окружающей их средой. Экологические и особенно инженерно-экологические проблемы остро ставятся с начала семидесятых годов.

Одна из важнейших глобальных и местных экологических проблем - проблема гляциологического кризиса. В современных масштабах это - нарушение устойчивости ледникового и снегового стока, чрезмерное уменьшение или увеличение снежных осадков, деградация северных природных и техногенных ландшафтов, гибель зимующей флоры, фауны и многие другие явления.

Снег не был бы таковым, если бы не вторгся и в эту обширную проблему. Скоро должна родиться и особая наука о природоохранной роли снега. Имени она еще не имеет. Но, по нашему мнению, ее можно назвать хионоэкологией.

Прежде всего, надо сказать о снеге как средстве контроля загрязнения атмосферы. Снег - чуткий показатель загрязненности, так как снежинки, зарождаясь в высоких атмосферных слоях, начинают рост от мельчайших пылинок наземного происхождения - ядер кристаллизации. Происходит удивительный массообмен: земная пыль, "помеченная" загрязнителями, - ядра кристаллизации - снежинки - снежный покров. Темпы прироста загрязненности снега часто опережают темпы прироста производства продукции, являющейся загрязнителем. Так, ежегодный рост производства ртути в мире равен 1,8% в год. Ртутные загрязнения антарктического и гренландского снега прирастают в год на 2,7%, а памирского - на 4%.

Проблема снегомелиорации, полезащитного и снегозащитного лесоразведения, рассмотренная нами ранее (см. пятую и шестую главы), - явно экологическая. При сравнении любых вариантов снегозащиты и снегозадержания следует рассматривать в первую очередь экологические факторы. Например, закрепление снега на опасных склонах растительностью с экологической стороны предпочтительнее тоннелей и галерей, пропускающих лавинные массы над собой.

Снег представляет собой народное достояние, потому что это влага, нужная сельскому хозяйству, это важный компонент микроклимата. И его нельзя отдавать на потеху ветрам, так как это ухудшит окружающую природную среду. С другой стороны, транспорт, жилые комплексы, предприятия страдают от метелей. Возникает остро актуальная проблема: как совместить эти противоречивые интересы?

Особенно интересна с природоохранных позиций так называемая комплексная снегозащита.

Средства сельскохозяйственного снегозадержания могут и должны комплексироваться со средствами дорожной защиты.

Метод комплексного использования снеговых защит для обеспечения бесперебойной работы транспортных средств и для задержания зимней влаги на полях очень перспективен. Этот метод коренным образом отличается от существующих способов дорожной снегозащиты, основанной на принципе задержания снега в пределах полосы отвода. Издавна для размещения средств снегозащиты железным дорогам отводятся с обеих сторон от пути полоса земли, достигающая сотен метров в ширину. Раньше она называлась полосой отчуждения, теперь ее зовут полосой отвода, но суть не меняется: от народного хозяйства бесполезно отнимаются внушительные площади ценных земель.

Огромные массы снега, собираемые около транспортных объектов, не только бесполезны, но и вредны, поскольку при таянии наносят ущерб инженерным сооружениям, служат причиной опасных размывов.

В 1895 году инженер П. Б. Яновский впервые поставил вопрос о комплексе железнодорожной снегозащиты и сельскохозяйственного снегозадержания. Но лишь в условиях социалистического общества, сделавшего своим знаменем гармонию природы и человечества, возможна реализация такого замечательного метода.

Профессор Гавриил Дмитриевич Рихтер в сороковых годах вновь поднял этот вопрос и всей силой своего таланта разрабатывал, оснащал новыми доводами и пропагандировал идею комплексной снегозащиты²¹ как наиболее рациональный и экологичный метод ограждения от снежных заносов железнодорожных станций, поселков, промышленных площадок. При комплексной снегозащите отпадает необходимость в широкой полосе отвода, значительно сократятся многомиллионные затраты средств на снегоборьбу.

В 1953-1955 гг. мы испытывали комплексный метод снегозащиты, используя в качестве задерживающего средства в поле упомянутые выше продуваемые низкие щиты. Перед сильно заносимым железнодорожным участком, огражденным постоянным забором, дополнительно устанавливали легкие щитовые линии на 600 м в глубину поля.

Опыты показали, что свыше 70% переносимого метелями снега задерживалось щитами и до заборов доходила лишь небольшая часть метелевого снега.

Комплексный метод снегозащиты достоин внимания. Но немало придется потрудиться, преодолевая существующие еще, к сожалению, "ведомственные барьеры". Вспоминается случай, когда редакция журнала "Железнодорожный транспорт" отказалась поместить статью по поводу наших опытов на том основании, что в статье говорилось о сельском хозяйстве, а журнал "Социалистическое земледелие" не поместил статью потому, что в ней много было сказано о транспорте.

Более широкая хиноэкологическая проблема - регулирование снегового и ледникового стока. Практически она решается в горах пока "зачерненном" фирновых ледниковых полей, ускорением их таяния. Но это палка о двух концах. При ослаблении фирнового питания ледники неизбежно деградируют. Прекратите питание снегом антарктического ледника, и это планетарное образование, существующее миллионы лет, исчезнет через 1500 столетий. Ледниковый сток прямо пропорционален массе ледника. Поэтому для усиления надежности и устойчивости ледникового стока надо, наоборот, наращивать ледники, но никто не знает, как это делать.

Ясно лишь одно, что изменить режим ледника может только снег. Поэтому надо подумать над тем, каким образом усилить снегопады над фирновыми полями, изменить режим метелей в горах.

Во всей Средней Азии могущественные ледники огромных горных стран соседствуют с сухими пустынями, районами с хроническим недостатком влаги. Климат Средней Азии изменился бы решительным,

коренным образом, если бы ледники Тянь-Шаня и Памира были крупнее. Судя по реликтовым признакам, среднеазиатские ледники были втрое мощнее во времена восточных походов Искандера - Александра Македонского.

Когда Чингисхан проходил через Хиву и Хорезм, нынешние пустыни Туркмении были цветущими равнинами. Иначе татаро-монгольские полчища погибли бы в песках. Еще на картах Штраленберга, изданных в 1721 году, на месте Каракумов была показана широко развитая сеть рек со многими, ныне исчезнувшими населенными пунктами. Но пока неясно, какой из двух факторов сыграл тут самую роковую роль: отступление ледников или наступление скотоводов и завоевателей.

Обесснеживание и обезвоживание территорий за счет уничтожения растительности, ветрового снегосноса, метелевого испарения снега, пылевых бурь и антропогенного фактора проходит несколько стадий и на конечном этапе завершается песчаной или каменистой пустыней. Пустыня - устойчивое формирование. Такие противоположные по своей сути и происхождению мертвые ландшафты, как гигантский покровный ледник и пустыня, отличаются необычайной устойчивостью. Все неблагоприятные для жизни климатические изменения оказываются намного устойчивее предыдущих, более благоприятных состояний.

Жизнь - антиэнтропийное явление, ее разрушение повышает энтропию (Энтропия - мера необратимого рассеяния энергии) среды. Самопроизвольный возврат от безжизненных состояний к жизненным, как правило, невозможен. Эта объективная закономерность распространяется на все биологически неблагоприятные изменения природной среды, если масштаб их таков, что биосфера теряет возможность самовосстановления. Возникает представление о критической площади нарушенного ландшафта F_k превышение которой означает необратимость и саморазвитие нарушений. Грубо приближенные расчеты дают порядковые значения F_k для пустынь и сухих степей 10 км^2 , а для устойчивого покровного ледника - 104 км^2 .

Сравнительно небольшие участки вновь образованных пустынь обретают способность саморазвития, агрессии против окрестных зеленых массивов. Подтверждением тому служат необратимая "микropустыня" Хакассии с хорошо выраженными песчаными формами рельефа. Это "антропогенная пустыня", "Спусковой крючок" ледниковой агрессии нажать намного труднее.

Снег, как уже говорилось, не только хранитель влаги, но и "шуба" Земли. Обесснеживание приводит к вымерзанию почвенной микрофлоры и микрофауны, гибели зимующих животных и растений. С одной стороны, снег, как теплоизолятор, уменьшает безвозвратные потери тепла Земли в Космос. С другой стороны, снег - фактор охлаждения, затрудняющий поступление к почве радиационного тепла, отражающий радиацию.

Снег-теплоизолятор полезен и для техногенных ландшафтов, для охраны внутренней среды. Почему бы, например, не задерживать снег на крышах зданий? Этим решаются сразу три задачи: 1) уменьшение снеготаносов на улицах, 2) утепление кровли, 3) полезное использование талой, мало загрязненной влаги для полива внутренних зимних садов и уличных парков, 4) орошение садов на крышах зданий и охрана их от морозов.

Для улучшения микроклимата северных поселков предлагают их закрывать огромными прозрачными пленочными куполами. По такие покрытия не способны противостоять штормам, метелям и снеговым пагрузкам. Если бы оказалось возможным навесить очень большой снежник мощностью в десятки метров, то в таком снежнике можно было бы создать крупные поселки с транспортными коммуникациями, оранжереями и садами.

Машинная разработка снега проста и гигиенична. Термоизолирующие стенки, защищающие подснежные сооружения, способны выдерживать незначительные и медленно меняющиеся нагрузки, вызванные пластическими деформациями снега. Растекание снега могут компенсировать естественные снегопады и искусственное задержание метелевого снега. Снегозадержание можно регулировать дистанционно путем изменения высоты и просветов механических защит.

Помещения, улицы, парки могут выполняться в виде траншей и котлованов с прочными прозрачными перекрытиями в виде возвышающихся над поверхностью снежника фонарей. Почему бы не запроектировать многоярусный "поселок-снежник" так, что на периферии каждого яруса будет установлена круговая вертикальная прозрачная стенка, ловящая лучи незаходящего Солнца во время - долгого полярного дня?

Напомним о проблеме "Снег и Климат" и о глобальном управлении снегом и льдом, о регулировании таяния снега на больших территориях. Уже сейчас можно вызвать искусственно снег и град на небольших площадях. Гляциологии и снеговедению суждено давать экспертизы по непрерывно возникающим глобальным проектам изменения климата.

В печати часто обсуждается проект переброски вод Оби и Енисея на юг ("антирека") в засушливые районы Средней Азии. При этом совершенно не учитывается уменьшение теплового стока (Тепловым стоком реки называется количество теплоты (в джоулях), переносимое ею в единицу времени) рек, зависящего, от температуры и расхода воды. Так, возникновение водохранилищ Братской и Енисейской ГЭС привело к уменьшению теплового стока Енисея в районе г. Игарки более чем вдвое. Главная причина - охлаждение воды в водохранилищах, так как весной они заполняются холодной водой, не успевающей прогреться за лето из-за больших глубин.

С экологической точки зрения это крайне нежелательно. Для орошения засушливых земель Средней Азии необходимо всемерно использовать местные ресурсы, например подземные воды. Очень важно предохранить от метелевого испарения, бесполезного стока и прочих потерь все выпадающие за зиму твердые осадки.

Экологически более приемлемы находящиеся в стадии обсуждения проекты систем плотин и горных каналов, поставляющих влагу в предгорья из глубин горных систем Памира и Тянь-Шаня. В окраинных горных цепях Средней Азии можно создать искусственные снежники для питания крупных водохранилищ со строгим регулированием стока. Именно так разрешена проблема водоснабжения столицы Народной Республики Болгарии Софии за счет поступающих в горное водохранилище талых вод от естественных и искусственных снежников под гребнями гор Рила-Планина.

Вся эта система орошения должна быть совмещена с каскадами горных электростанций, работающих на "голубом топливе".

Проблема охраны окружающей среды в недалеком будущем трансформируется в Проблему Ремонта Планеты, планомерного преобразования природы и климата Земли. Но без умения влиять на снежный покров нельзя научиться преобразовывать климат. Действенное освоение приполярных и высокогорных областей вообще немыслимо без умения управлять снежным покровом.

К. Э. Циолковский, размышляя в двадцатых годах о судьбах человечества, не видел тогда возможностей обеспечить оптимальные условия существования человека в высоких широтах. Он писал в 1929 году:

"Важнее всего переселение от полюса к экватору, от наибольшего холода к наибольшему жару, также переселение от наших широт с холодной зимой к местам без зимы, примерно, от 50° широты к 20° широты.

Климат этой широтной полосы Циолковский называл "райским". Если к северным "оптимальным широтам" добавить соответствующие широты Южного полушария, то в этой "райской" зоне проживает около 70% человечества и находятся почти полностью территории США, Китая, большей части Индии и Европы, вся Аргентина, Северная Африка и лишь 20% территории СССР.

Сейчас речь идет не о переселении на Юг, а о наилучшем приспособлении Севера для комфортабельных, оптимальных условий жизни человека. С этой целью надо преобразовывать климат территории севернее 50° северной широты, овладев процессами управления грандиозными снежными массами.

* * *

Мы познакомились далеко не со всеми проблемами снеговедения. Книга не отражает и не могла отразить все богатство предмета. Мы хотели сказать в ней о том, что мудрая снежная наука становится одной из "горячих точек" бурно развивающихся наук о Земле, которые определяют лицо грядущих столетий.

ПРИМЕЧАНИЯ