

Определение и классификация ослабленных слоёв в снежном покрове

© 2013 г. Е.С. Клименко

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

eklmnk@gmail.com

Статья принята к печати 8 мая 2013 г.

Генетические типы снежных лавин, ослабленные слои и контакты, снежный покров, структура снега, устойчивость снежного покрова.

Genetic types of snow avalanches, snow cover, snowpack stability, snowpack structure, weak layers and interfaces.

Рассматривается роль структуры снега в лавинообразовании и вводится понятие «структурной неустойчивости» снежного покрова, изучение которой необходимо для расширения знаний о механизмах схода снежных лавин. Под структурной неустойчивостью понимается наличие в структуре снежной толщи ослабленного слоя или контакта. Текущее состояние и история формирования снежного покрова на склоне определяют форму отрыва и характер формирующейся лавины. Поэтому генетическое разнообразие снежных лавин свидетельствует, что в снеге может наблюдаться структурная неустойчивость разных типов. Итогом выполненного аналитического обзора литературы и собственных полевых наблюдений стала классификация ослабленных слоёв в снеге. Слои классифицируются на основе их связности, причин для возникновения первичного нарушения, а также условий образования. Представленная классификация – необходимое звено в создании методики оценки устойчивости снежного покрова с помощью современных моделей развития снега.

Появление физических моделей высокого разрешения, воспроизводящих эволюцию снежного покрова, позволяет изучать его на качественно новом уровне. Такие модели служат источником детальной информации о строении, структуре, физических и механических свойствах снега в любой момент времени при моделировании. Несмотря на неизбежные допущения при физическом описании процессов в снеге и большое число эмпирически полученных зависимостей и коэффициентов, целесообразность использования таких моделей в практике снеголавинных исследований была доказана неоднократно [8, 16, 21, 24 и др.]. Одна из ключевых задач лавиноведения – оценка устойчивости снега на склоне для дальнейшего использования полученных результатов в практике прогноза снежных лавин. Применение физических моделей развития снега [18, 21 и др.] для поиска ослабленных слоёв и оценки их устойчивости может значительно расширить существующие возможности за счёт высокого временного разрешения, точности и разнообразия получаемых с помощью моделей данных. Однако создание методики оценки устойчивости снега на основе физических моделей требует пересмотра, уточнения и структурирования знаний о механизмах потери устойчивости, имеющих место в снежном покрове.

Постановка задачи

Устойчивость снежного покрова – это его способность сохранять равновесие на склоне под действием гравитационных сил и разнообразных внешних факторов [3]. Сход лавины должен быть заранее подготовлен внутри снежной толщи, что проявляется в наличии ослабленного слоя или контакта в структуре снега, т.е. в его «структурной неустойчивости». Ослабленным (неустойчивым, лавиноопасным) будет называться любой слой или контакт, присутствие которого в структуре снега может стать причиной нарушения его устойчивости и привести к образованию лавины.

Структурная неустойчивость снежной толщи напрямую не зависит от морфометрии подстилающего склона, т.е. снежный покров может иметь неустойчивую структуру, даже если он лежит на горизонтальной поверхности, что подтверждается возможностью его внезапной просадки при приложении определённой нагрузки [4, 20] или же часто наблюдаемой малой связности верхнего горизонта [6, 11]. При наличии ослабленного слоя в структуре снега возможность образования снежной лавины определяется морфометрией лавиноопасного склона и распределением на нём снега. Таким образом, комплексная оценка

устойчивости снега и возможности схода снежной лавины требует последовательного решения двух задач: 1) исследования структурной неустойчивости снежного покрова; 2) анализа напряжённого состояния снежного пласта и оценки удерживающих сил, действующих по его контурам и определяемых морфометрией лавиносбора. Вторая задача была рассмотрена в ряде математических моделей, описывающих условия равновесия и устойчивости снежного пласта на склоне [2, 17 и др.].

В настоящей работе оценивается влияние структуры снега на его устойчивость. Мы предприняли попытку комплексного анализа условий, складывающихся внутри снега в момент образования лавины, механизмов потери устойчивости и типов лавинообразования. До сих пор причины возникновения и разрушения ослабленного слоя или контакта в структуре снега не были достаточно детально описаны. В основе исследования лежит положение, что форма отрыва и характер формирующейся лавины определяются текущим состоянием снежного покрова на склоне и предысторией его развития. Это нашло отражение в существующих генетических классификациях снежных лавин. Многообразие генетических типов лавин определило цель работы, состоящей в систематизации знаний о причинах возникновения ослабленных слоёв и выявлении механизмов нарушения устойчивости снега всех возможных типов.

Всестороннее понимание процессов перехода снежной толщи из устойчивого состояния в неустойчивое имеет ключевое значение при выборе количественных критериев оценки устойчивости снежного покрова. Важно, что наиболее часто используемые критерии (в частности, прочность снега на сдвиг) подходят далеко не для всех типов ослабленных слоёв и связанных с ними лавин ввиду их широкого генетического разнообразия. В частности, за пределами анализа остаются лавины свежеснежного покрова [1], грунтовые [11], адвекционные и инсоляционные [1].

Классификация ослабленных слоёв в снежном покрове на основе условий их образования

В настоящее время разработан ряд генетических классификаций снежных лавин [1, 6, 7, 10, 15 и др.], и каждая из них имеет свои достоинства и недостатки. Наиболее известна, несмотря

на некоторое нарушение классификационных принципов, классификация В.Н. Аккуратова (1958 г.) [1], где предпринята попытка установить прямую связь между внешними и внутренними условиями, вызывающими сход лавины. Все существующие классификации прежде всего стремятся связать факт образования лавины с метеорологическими явлениями, которые предшествовали или сопровождали её сход, однако в них можно найти важные ссылки на местоположение первичного нарушения в структуре снега, которое приводит к образованию лавин того или иного типа. Всего было выделено шесть видов таких местоположений: в поверхностном слое; на контакте свежеснежного покрова со старым; внутри разрыхлённого слоя в старом снеге; внутри водонасыщенного слоя в старом снеге; внутри мокрого слоя в старом снеге; на контакте снег–грунт.

Отметим, что в данной работе под *разрыхлёнными слоями* понимаются только ослабленные слои сухого снега с водосодержанием (Liquid Water Content) LWC, равным 0%, как эпигенетические (состоят из гранёных кристаллов или глубинной изморози), так и сингенетические (погребённые слои поверхностной изморози и атмосферных кристаллов). Ослабленные слои, разрыхлённые в результате динамического воздействия фильтрующейся воды, будут называться *мокрыми* (LWC > 0%). Кроме того, ряд ослабленных слоёв мокрого снега, характеризующихся высокой степенью насыщения водой (LWC > 8% [19]), будут определяться как *водонасыщенные*.

В таблице представлены выделенные типы местоположений первичного нарушения в структуре снега и связанные с ними генетические типы лавин, когда-либо упомянутые или описанные в литературных источниках. При составлении таблицы использовались оригинальные определения генетических типов лавин, представленные в первоисточниках. Материалы данной таблицы позволяют утверждать, что нарушения в снеге, вызывающие сход лавины определённого генезиса, как правило, имеют в структуре снега чёткое фиксированное положение, приуроченное к ослабленным слоям. Детальный анализ физических и механических свойств, характерных для неустойчивого слоя, а также внешних и внутренних условий образования таких слоёв позволил создать комплексную классифи-

Местоположения первичного нарушения в структуре снежной толщи (серый фон), приводящего к образованию лавин разных генетических типов

Генетический тип лавины	Местоположение первичного нарушения в структуре снежной толщи					
	в поверх- ностном слое	на контакте свежевыпав- шего снега со старым	на кон- такте снег— грунт	в старом снеге		
				внутри разрыхлён- ного слоя	внутри водо- насыщенно- го слоя	внутри слоя мокрого снега
<i>Выделяются в существующих генетических классификациях</i>						
Из свежевыпавшего снега [1]						
Из метелевого снега [1]						
Сублимационной перекристаллизации [1]						
Температурного сокращения снега [1]						
Инсоляционные [1]						
Адвекционные [1]						
Смешанные [1, 6, 10]						
<i>Встречаются в различных литературных источниках</i>						
Ветрового разрыхления [6]						
Вызванные скачком атмосферного давления [7]						
Температурного расширения [14]						
Сходящие по погребённому слою поверх- ностной изморози [22, 24 и др.]						
Сходящие по погребённой мягкой снежной доске [4, 13, 24]						
Зимние грунтовые [6, 10]						
Водоснежные потоки с гравитационным механизмом образования [5]						

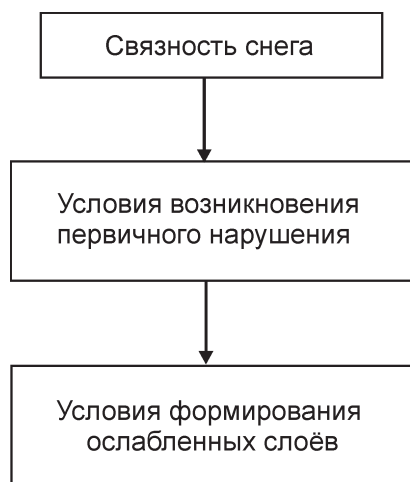


Рис. 1. Принципы классификации ослабленных слоёв в снеге
Fig. 1. Principles to classify weak layers in snowpack

кацию ослабленных слоёв в снеге. Принципы классифицирования приведены на рис. 1. Данная классификация объединяет все возможные типы структурной неустойчивости снежного покрова (рис. 2).

Первоначально ослабленные слои разделяются исходя из связности слагающего их снега, которая полностью определяет форму отрыва возможной лавины. Чаще всего снег на склоне имеет хорошо развитую ледяную решетку (зёрна и связи между ними), что способствует площадному отрыву лавины. Площадной отрыв снежной массы происходит либо по ослабленному слою или контакту внутри снежного покрова, либо по границе снег—грунт и неразрывно связан с образованием поверхности скольжения (сдвига) — плоскости, вдоль которой вышележащий пласт снега сдвигается относительно его неподвижного основания. Доказано, что при образовании лавины с площадным отрывом сначала формируется трещина в плоскости сдвига (поверхность скольжения), которая по мере увеличения площади генерирует повышенное разрывающее напряжение выше по склону [2, 3, 22 и др.], приводящее к раскрытию трещин разрыва и обрушению снежного пласта, потерявшего поддержку контурных сил.

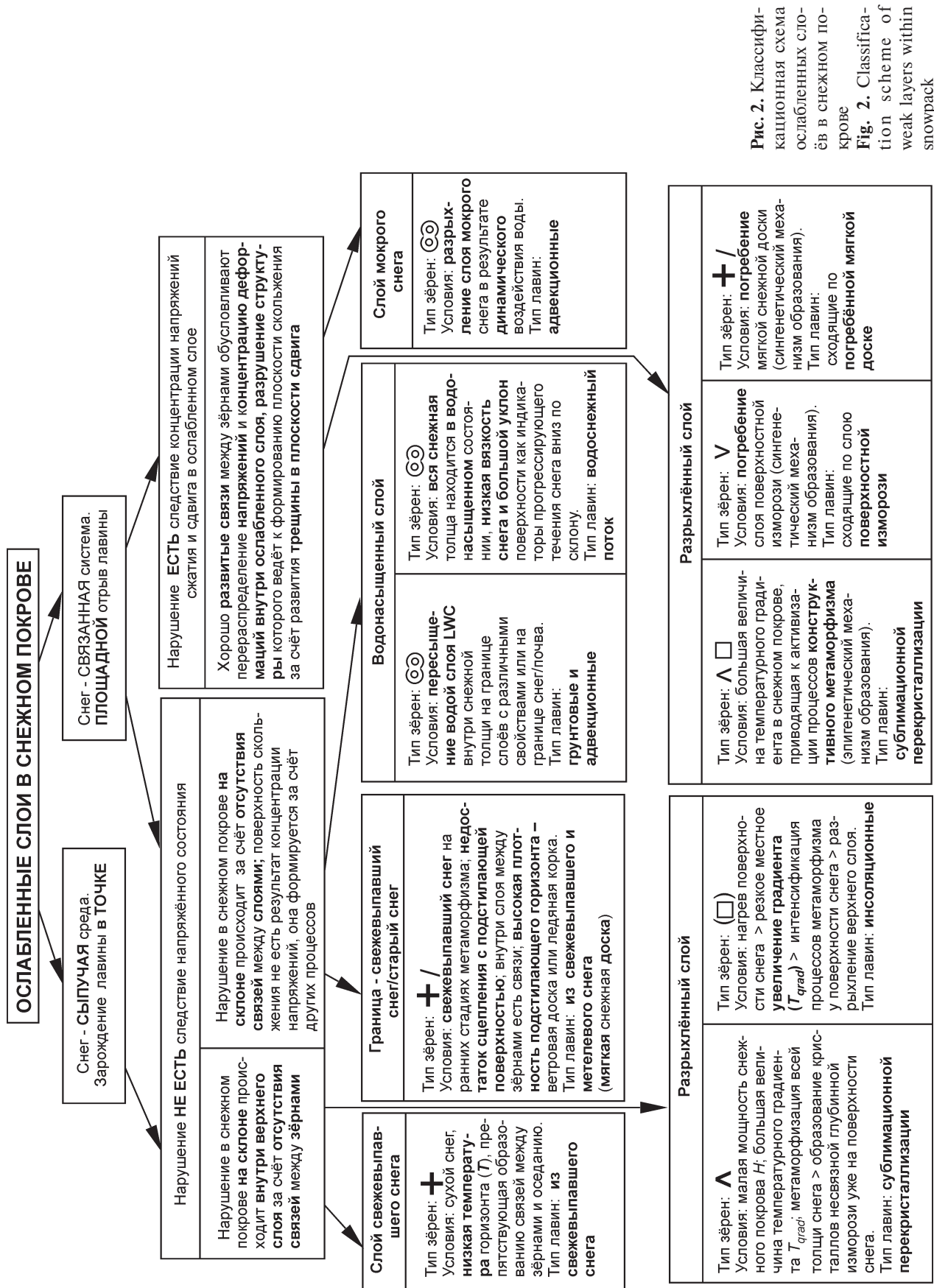


Рис. 2. Классификационная схема ослабленных слоёв в снежном покрове
Fig. 2. Classification scheme of weak layers within snowpack

Если связи в снежном покрове отсутствуют или выражены слабо, то снег может рассматриваться как сыпучая среда и образовывать лавины с точечным отрывом, формирующиеся из поверхностного слоя снежной толщи. Выделение лавин из точки в данном случае происходит на основе механизма отрыва – «от одного зерна». Расходящуюся форму лавинного следа (индикатор, используемый на практике) могут иметь лавины и с площадным отрывом.

Следующая ступень классификации – *условия для возникновения нарушения в ослабленном слое или на контакте*. Деление неустойчивых слоёв на категории происходит, исходя из роли действующих напряжений для возникновения первичного нарушения в слое. Так, в сыпучем снеге за счёт отсутствия связей между зёрнами невозможны процессы перераспределения напряжений и концентрации деформаций, ведущие к разрушению структуры слоёв и развитию трещин. Следовательно, формирование лавин из точки не связано с напряжённым состоянием снега на склоне, а представляет собой осыпание снежных зёрен, слагающих верхний слой снежного покрова, под действием силы тяжести со склонов достаточной крутизны.

При сходе лавин с площадным отрывом поверхность скольжения снежного пласта, как правило, формируется за счёт концентрации деформаций внутри ослабленного слоя или контакта и последующего разрушения его структуры [2–4, 20, 22, 23 и др.], т.е. это – прямое следствие текущего напряжённого состояния снега. Такой механизм потери устойчивости связанного снежного пласта хорошо известен, и нередко исследователи ограничиваются только его изучением. Однако материалы полевых исследований показывают, что поверхность скольжения пласта сухого или мокрого снега может быть сформирована иным образом: за счёт процессов, приводящих к низкой связности отдельных слоёв внутри снежной толщи, например, накопления в слое большого количества воды или невозможности образования связей ввиду замедленных процессов метаморфизма. В этом случае возникновение поверхности скольжения не связано с действующими в снеге напряжениями, и сход снежной лавины представляет собой соскальзывание снежного пласта по подготовленной поверхности сдвига в случае потери поддержки контурных сил. Доказательная база, лежащая в основе этих утверждений, рассмотрена ниже.

Таким образом, на второй ступени классификации выделяются три группы ослабленных слоёв в зависимости от трёх причин, которые могут повлечь образование первичного нарушения в слое: низкая связность верхнего слоя снега; низкая связность между слоями снега; действующие напряжения сжатия и сдвига, приводящие к разрушению структуры слоя. При этом под связностью снега понимается степень развития связей между зёрнами в ледяной решётке снежного покрова. Мерой связности может служить величина удельной поверхности контактов между зёрнами [3]. Отметим, что сделанные выводы о роли напряжений при формировании первичного нарушения в снеге позволяют выделить в рамках оценки структурной неустойчивости два принципиальных случая:

1) если речь идёт о низкой связности снега (внутри слоя или между соседними слоями), то оценка структурной неустойчивости сводится к поиску ослабленного слоя или контакта, само наличие которого уже позволяет считать снежный покров неустойчивым;

2) если поверхность скольжения формируется вследствие разрушения структуры ослабленного слоя, т.е. обусловлена текущим напряжённым состоянием, то наличие ослабленного слоя становится лишь необходимым признаком неустойчивости снежного покрова; в этом случае, наряду с поиском такого слоя, необходимо оценивать возможность разрушения его структуры в сложившемся напряжённом состоянии.

На третьей ступени классификации рассматриваются *внешние и внутренние условия*, которые приводят к формированию ослабленных слоёв трёх указанных групп. Данный подход не только позволяет выделить все возможные генетические типы неустойчивых слоёв в структуре снега, но и установить их связь с генетическими типами снежных лавин.

Условия для формирования несвязного поверхностного слоя снега и связанных с ним лавин. Чаще всего слой, состоящий из несвязных ледяных кристаллов, образуется на поверхности снежного покрова во время снегопада в условиях безветрия и низких температур воздуха. Высокая температура способствует сцеплению снежных кристаллов, делая возможным процесс режелеации в точках соприкосновения, одновременно увеличивая их пластичность. Установлено, что при температуре около $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинает про-

являться способность снега к слипанию [11]. При температурах ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ выпадающие снежинки хрупки, не смерзаются при соприкосновении друг с другом и легко переметаются ветром. Ветер увеличивает силу удара при падении снежинок, что ведёт к лучшему сцеплению кристаллов. Таким образом, быстрое оседание свежеснежавшего снега и рост связей между кристаллами будут затруднены в морозную штилевую погоду, что создаёт резкие различия в строении снежной толщи. Кроме того, экспериментально установлено, что процессы изотермического метаморфизма в свежеснежавшем снеге на начальных этапах также ослабляют сцепление внутри горизонта [11].

К формированию разрыхлённого несвязного слоя на поверхности снежного покрова также приводят процессы градиентного метаморфизма. Так, в условиях морозной малоснежной зимы в снеге могут возникать большие температурные градиенты, приводящие к перекристаллизации всей толщи снега, а не только отдельных её слоёв. Зафиксированы случаи схода лавин из точки из верхнего слоя снега, состоящего из несвязных крупных кристаллов, связи в котором были полностью разрушены в процессе перекристаллизации [6].

Разрыхление поверхностного слоя снега возможно также за счёт интенсивных процессов метаморфизма, развивающихся вследствие нагрева поверхности снега солнечными лучами и появления большого местного градиента температуры. Такой градиент имеет встречное направление к главному градиенту. Описанный процесс ведёт к сходу точечных инсоляционных лавин. Отметим, что В.Н. Аккуратов, автор термина «инсоляционная лавина», в своей генетической классификации указывает на иную причину их возникновения, относя их к классу мокрых и считая причиной нарушения таяние частиц льда на контактах снежных слоёв, вызываемое проникающей солнечной радиацией [1]. Однако многочисленные эксперименты [12, 21, 23, 24 и др.] показали, что появление в снеге талой воды увеличивает его прочность за счёт капиллярных сил до тех пор, пока не будет достигнута его максимальная водоудерживающая способность (водосодержание $\text{LWC} < 8\%$ [19]), т.е. только мигрирующая подвижная вода может способствовать разрушению связей и ослаблению прочности снега из-за динамического воздействия на его струк-

туру. Таким образом, настоящее объяснение схода лавин из точки при воздействии на снежной покров солнечной радиации более приближено к реальности. Это позволяет заключить, что лавины из точки (по форме отрыва) могут образовываться только из сухого снега.

Отметим, что на практике термин «инсоляционная» часто применяют к мокрым лавинам, вызванным падением камней или комьев снега на поверхность снежной толщи. Согласно определению, данному в работе [1], такие лавины следует относить к адвекционным, так как их сход, как правило, связан с приходом тёплых воздушных масс. Кроме того, их отрыв происходит по площади, пусть и очень малой, а не от одного зерна, что не позволяет относить подобные лавины к классу лавин из точки.

Итак, у поверхности снежного покрова выделяются два принципиально разных слоя несвязного снега – горизонт свежеснежавшего снега и слой разрыхления. Из этих слоёв могут образовываться три типа лавин с точечным отрывом: лавины из свежеснежавшего снега; лавины сублимационной перекристаллизации; инсоляционные лавины, обусловленные рассмотренными ранее процессами, развитие которых во многом зависит от погодной обстановки, т.е. определяется местными климатическими условиями. В связи с этим лавины из точки часто имеют чёткую географическую принадлежность или, по крайней мере, ограниченное распространение. В частности, устойчиво низкий температурный фон и малая снежность зим в северо-восточных районах России практически полностью определяют ареал распространения точечных лавин сублимационной перекристаллизации.

Условия для формирования лавиноопасных слоёв/контактов, представляющих собой готовую поверхность скольжения. Выводы предыдущего раздела позволяют заключить, что отрыв снежных масс, насыщенных водой, всегда происходит по площади, несмотря на многочисленные литературные свидетельства о фактах схода мокрых лавин с точечным отрывом [3, 4, 7 и др.]. Изначально при появлении в снеге воды капиллярные силы увеличивают его связность [12]. В случае превышения максимальной водоудерживающей способности в верхних слоях снежной толщи вода начинает фильтроваться и замерзать на более низких уровнях, тем самым временно «укрепляя»

структуру снега. Естественно, что фильтрация способствует разрушению ледяной решётки из-за образования микроканалов стока, однако при насыщении снега водой увеличиваются размер зёрен [5] и связность снега вне каналов стока. Эти факты свидетельствуют о невозможности существования мокрого снега на склоне в сыпучем состоянии – необходимого условия для образования лавин из точки. Многократно зафиксированные факты схода мокрых лавин из точки часто связаны с небольшой площадью отрыва, которую издаля можно принять за точку, и характерной расходящейся формой лавинного следа. Однако само нарушение в мокром снеге возможно только по площади, что согласуется с данными полевых наблюдений [9], где был засвидетельствован факт начала образования мокрых лавин от некоторого ядра зарождения, в котором снежные зёрна связаны между собой адгезионными силами.

Сход мокрых лавин чаще всего происходит по водонасыщенному слою, который служит одним из ярких примеров подготовленной поверхности скольжения, когда сдвиг вышележащей снежной толщи становится возможным из-за накопления в слое снега большого количества воды ($LWC > 8\%$ [19]). Образование слоя насыщения возможно на контакте слоёв с резко отличающимися микроструктурными свойствами или же на границе снег–грунт. При наличии такого слоя снег может сохранять равновесие на склоне только за счёт контурных сил до тех пор, пока не образуются вертикальные трещины разрыва в ходе вязкого (как правило, мокрый снег – адвекционные лавины) или хрупкого (сухой снег – грунтовые лавины) разрушения вышележащего снежного пласта. Таким образом, задача оценки структурной неустойчивости снега при сходе грунтовых [10] и адвекционных [1] лавин сводится к поиску водонасыщенного слоя и определению степени его насыщения.

Во многих литературных источниках [2, 3, 9, 12, 24 и др.] описан также эффект сползания или стекания снежного покрова со склонов, скорость которого тем больше, чем ниже вязкость снега. Если скорость стекания снега превышает некоторый предел, то создаются условия для его вязкого разрушения при переходе деформации в стадию прогрессирующей ползучести. Следовательно, наиболее

вероятные условия для подобного разрушения будут достигаться, когда вся снежная толща находится в водонасыщенном состоянии, что служит одним из механизмов зарождения водоснежных потоков ($LWC > 15\%$ [19]).

Наличие в структуре снега подготовленной поверхности скольжения также проявляется при сходе лавин из мягкой снежной доски по плоскости её контакта со старым снегом. Мягкая снежная доска представляет собой короткую фазу в жизни переметённого ветром снега, когда, несмотря на бархатную текстуру, снег хорошо связан, но очень хрупок и находится в напряжённом состоянии [13]. Мягкая доска формируется при снегопаде (метели) в условиях очень узкого диапазона температуры, влажности и скорости ветра (чёткие границы до сих пор не установлены). Процесс образования связей между мягкой доской и поверхностью старого снега часто осложнён, особенно если подстилающий слой представлен плотной ветровой доской или же ледяной коркой [3, 23 и др.]. Кроме того, интенсивная диффузия, когда тепловой поток направлен от слоя с большой плотностью к слою с малой плотностью, обеспечивает возгонку в контактной зоне [1]. Таким образом, возможность схода лавины из мягкой доски по заранее подготовленной поверхности скольжения должна отражаться в структуре снега: в резком изменении его плотности и микроструктуры при переходе от верхнего слоя к слою, лежащему ниже.

Нарушение внутри горизонта связного свежевыпавшего снега, вызывающего площадной отрыв лавины, также возможно, но только, когда погодные условия во время снегопада резко меняются, что приводит к формированию ряда слоёв в составе одного горизонта свежевыпавшего снега. В данном случае поверхностью скольжения может служить поверхность одного из таких слоёв. Отметим, что в случае погребения мягкой снежной доски она перестаёт быть слоем, формирующим лавину, но продолжает сообщать снежной толще значительную неустойчивость. Роль таких ослабленных слоёв при образовании снежных лавин подробно рассмотрена ниже.

Условия для образования ослабленных слоёв, разрушение которых приводит к формированию поверхности скольжения. Самым распространённым механизмом образования лавин считается возникновение и развитие сдвиговых

трещин в снежном покрове, которые затем вызывают раскрытие трещин разрыва по контурам снежного пласта. Трещины в плоскости сдвига формируются за счёт перераспределения напряжений и концентрации деформаций внутри локальных областей в снеге в результате действия гравитационных сил и дополнительных внешних факторов. Доказано, что максимальные напряжения в снеге (до 90% [22]) возникают на контактах между зёрнами в ослабленном слое или на границе раздела двух слоёв с различными структурными свойствами. Чаще всего появление сдвиговой трещины в сухом снеге служит индикатором его хрупкого разрушения вследствие мгновенного или быстрого роста нагрузки (в частности, такой механизм образования имеют лавины, инициированные лыжниками). Также есть свидетельства схода самопроизвольных лавин из старого снега, образовавшихся при тех же условиях, но в отсутствие внешней видимой причины. Считается, что причина образования таких лавин – это уменьшение прочностных характеристик снега до величины, когда существующей нагрузки, создаваемой снежной доской, достаточно для разрушения ослабленного горизонта [3, 23], т.е. в данном случае процессы ползучести и метаморфизма идут дальше, чем в первом.

Необходимым условием для формирования и развития трещины в снежном покрове служит наличие ослабленного слоя или контакта двух слоёв, имеющих наименьшую прочность по сравнению с другими слоями или контактами. Такой слой может быть сформирован при активном протекании сублимационных процессов, наиболее интенсивных на контактах слоёв, где свойства снега скачкообразно меняются, чему способствуют различия в теплопроводности слоёв, создающие большие температурные градиенты и вызывающие местную активизацию сублимационных процессов (лавины сублимационной перекристаллизации) [1]. Кроме того, как уже отмечалось, в качестве ослабленных слоёв могут выступать погребённые горизонты свежеснежного покрова (мягкая снежная доска) и поверхностной изморози. Чаще всего ослабленные слои в снеге, несмотря на свою хрупкую структуру, относительно медленно упрочняются и уплотняются [23], так как состоят из термодинамически стабильных типов снежных кристаллов (исключение – кристаллы

атмосферного происхождения) [4 и др.]. Таким образом, они могут сообщать неустойчивость снежной толще в течение многих дней или даже недель и вызывать сход лавин сухого снега из твёрдых снежных досок.

Кроме того, ввиду недостаточной изученности механизмов схода лавин из мокрого снега (адвекционных), нельзя полностью исключить возможность формирования поверхности скольжения за счёт вязкого разрушения ослабленного слоя мокрого снега, разрыхлённого в результате фильтрации воды. Ссылки на такой механизм имеются в ряде литературных источников [3, 4 и др.]. Наиболее благоприятные условия для разрушения ослабленного слоя в мокром снеге могут возникнуть при резком росте нагрузки на слой в случае выпадения нового снега или дождя. Однако более вероятный механизм образования адвекционных лавин – соскальзывание пласта мокрого снега по насыщенному водой слою, который не требует разрушения структуры слоя.

Заключение

Рассмотренная в статье классификация ослабленных слоёв в снежном покрове призвана связать условия образования структурной неустойчивости в снеге, механизмы потери устойчивости и типы лавинообразования. Всего выделено три вида ослабленных слоёв на основе их связности и условий для возникновения первичного нарушения. Детальный анализ условий их образования в снеге позволил на третьей ступени классификации выделить шесть типов ослабленных слоёв и связать с ними все существующие генетические типы снежных лавин. Данная классификация является необходимым звеном в рамках создания методики оценки устойчивости снежного покрова с помощью современных моделей развития снега, использование которых может дать существенный импульс развитию представлений о роли структуры снега в процессах потери устойчивости и образования лавин. Кроме того, результаты данной работы могут быть использованы в моделях равновесия снежного пласта на склоне.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность Ю.Г. Селиверстову за ценные замечания и советы.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Ведущие учёные» 11.G.34.31.007.

Литература

1. Аккуратов В.Н. Генетическая классификация лавин // Тр. Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции. Т. 1. Нальчик, 1959. С. 215–232.
2. Божинский А.Н. Неустойчивость естественных масс снега и люда на склонах гор // Итоги науки и техники. Сер. «Гляциология». 1980. Т. 2. 122 с.
3. Божинский А.Н., Лосев К.С. Основы лавиноведения. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 280 с.
4. Болов Р.В. Структура снега и ее связь с лавинообразованием // МГИ. 1982. Вып. 43. С. 49–55.
5. Водоснежные потоки Хибин / Под ред. А.Н. Божинского и С.М. Мягкова. М: изд. МГУ, 2001. 167 с.
6. Дзюба В.В., Лантев М.Н. Генетическая классификация и диагностические признаки снежных лавин // МГИ. 1984. Вып. 50. С. 97–104.
7. Канаев Л.А. Проблемы классификации лавин // Тр. САНИГМИ. 1980. Вып. 71 (152). С. 11–24.
8. Клименко Е.С. Моделирование снежного покрова на лавиноопасном склоне для оценки его устойчивости // Геориск. 2011. Вып. 1. С. 52–57.
9. Королев А.И. Некоторые наблюдения над сходом лавин // Тр. САНИГМИ. 1972. Вып. 63 (78). С. 80–88.
10. Лосев К.С. Лавины СССР (распространение, районирование, возможности прогноза). Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 129 с.
11. Лосев К.С. О механизме возникновения лавин, связанных со снегопадами и метелями // Тр. САНИГМИ. 1972. Вып. 63 (78). С. 3–11.
12. Москалев Ю.Д. Возникновение и движение лавин. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 151 с.
13. Отуотер М. Охотники за лавинами. М.: Мир, 1980. 254 с.
14. Ржевский Б.Н. Лавины резких температурных изменений и способы их прогнозирования // Тр. ВГИ. 1967. Вып. 12. С. 253–259.
15. Avalanche atlas. International Commission of Snow and Ice. Paris: UNESCO, 1981. 268 p.
16. Bellaire S., Jamieson J.B., Fierz C. Forcing the snow-cover model SNOWPACK with forecasted weather data // The Cryosphere. 2011. V. 5. P. 1115–1125.
17. Bozhinskiy A.N., Nazarov A.N., Chernouss P.A. Avalanches: a probabilistic approach to modelling // Annals of Glaciology. 2001. V. 32. P. 255–258.
18. Durand Y., Giraud G., Brun E., Merindol L., Martin E. A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting // Journ. of Glaciology. 1999. V. 45. P. 469–484.
19. Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. IHP-VII Technical Documents in Hydrology №83. IACS Contribution №1. Paris: UNESCO, 2009. 80 p.
20. Heierli J. Anticrack model for slab avalanche release. Ph. D. Thesis. University of Karlsruhe–Karlsruhe, Germany. 2008. 102 p.
21. Lehning M., Bartelt P.B., Brown R.L., Fierz C., Satyawali P. A physical SNOWPACK model for the Swiss Avalanche Warning Services. Part III: meteorological boundary conditions, thin layer formulation and evaluation // Cold Region Science and Technology. 2002. V. 35. № 3. P. 169–184.
22. Reiweger I. Failure of weak snow layers. PhD thesis. ETH Zürich, Switzerland. 2011. 158 p.
23. Schweizer J., Jamieson B. Snowpack properties for snow profile analysis // Cold Regions Science and Technology. 2003. V. 37. P. 233–241.
24. Schweizer J., Bellaire S., Fierz C., Lehning M., Pielmeier C. Evaluating and improving the stability predictions of the snow cover model SNOWPACK // Cold Regions Science and Technology. 2006. V. 46. P. 52–59.

Summary

The paper considers the role of vertical snowpack structure for snow avalanche formation and describes the idea of «structural instability». It aims at enhancing the knowledge about transition mechanisms between stable and unstable states of snowpack and snow avalanches release. Structural instability implies the presence of weak layer or interface in vertical snowpack profile. Type of snow failure and avalanche characteristics are completely defined by snowpack state and properties. Thus wide variety of genetic types of snow avalanches indicates the existence of structural instability of different types. The detailed analysis of scientific publications and field observations led to the creation of a new classification of weak layers. The layers are classified basing on their cohesiveness, the causes of initial disturbance and internal and external processes which form a weak layer. The classification is a necessary part of global method which allows assessing snowpack stability using modern physical models of snow cover evolution.