

Краткосрочный пространственно-временной прогноз сухих лавин сублимационной перекристаллизации и смешанного типа

© 2013 г. Ю.Б. Андреев¹, А.Н. Божинский¹, П.А. Черноус²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

²Центр лавинной безопасности ОАО «Апатит», Кировск

ayura2@rambler.ru

Статья принята к печати 29 октября 2012 г.

Вероятность зон отложений, снежные лавины, перекристаллизация снега, прогноз.
Deposition zone probability, forecast, snow avalanches, snow recrystallization.

Авторы продолжают разработку методики краткосрочного (суточного) пространственно-временного локального прогноза-диагноза (прогноза с нулевой заблаговременностью) сухих и мокрых лавин со снегопадом по материалам наблюдений в Приэльбрусье и Хибинах. Рассматриваются сухие лавины с учётом сублимационной перекристаллизации снежной толщии во время снегопада. Методика основана на проверке степени соответствия (корреляции) функций прогноза и вероятностей границ лавинных отложений. Акцент в работе сделан на исследовании и выборе метеопараметров и их сочетаний, входящих в функцию прогноза, которые дают наилучшую корреляцию с вероятностями границ лавинных отложений.

Введение

В предлагаемом исследовании продолжает-ся разработка принципов краткосрочного пространственно-временного прогноза лавин разного генезиса как в локальном, так и в фоновом отношении. Используются многолетние ряды наблюдений на базовых лавиносборах «Домашний» в Приэльбрусье и № 22 в Хибинах. В данной работе использованы данные Цеха противолавинной защиты Кировского комбината «Апатит» (сейчас Центр лавинной безопасности ОАО «Апатит»), полученные на лавиносборе № 22 в Хибинах в период 1937–1979 гг. Временная часть рассматриваемого вида прогноза основана на текущих метеоданных по температуре, осадкам, толщине снежного покрова и их комбинациях, а пространственная – на контурах соответствующих лавинных отложений и дальности выноса лавин. По метеоданным строится, а затем вычисляется функция прогноза, соответствующая определённому генетическому типу лавин, значения которой сопоставляются с положением (максимальной дальностью) нижней границы лавинных отложений, которое определяется вероятностным зонированием лавиносбора [3, 7]. В результате получается уравнение связи (регрессии), на основе которого с той или иной достоверностью можно дать кратковременный прогноз-диагноз о возможном сходе лавин определённого типа предполагаемой дальности в данном и окрестных лавиносборах в соответствии с их орографией. Ранее нами получены результаты по методам прогноза такого типа для сухих лавин из свежее выпавшего снега и мокрых лавин [2]. Цель настояще-

го исследования – сухие лавины сублимационной перекристаллизации и смешанного типа (перекристаллизации со снегопадом).

Лавины сублимационной перекристаллизации

Для исследования выбран лавиносбор № 22 (Хибины). По этому лавиносбору в нашем распоряжении был ряд наблюдений более чем по 100 лавинам разных генетических типов за период 1934–2004 гг. с полным набором данных: типом лавин и осадков; толщиной снежного покрова; температурой воздуха; границами и объёмами отложений. В результате детального анализа, основанного на материалах исследований по Хибинам [4–6], из этого ряда к лавинам рассматриваемого подтипа отнесено 17 событий схода лавин за период 1937–1958 гг. Анализ корреляции средней толщины снега, суммы температур за четыре дня, температуры в день схода, а также других метеопараметров и их сочетаний для этих лавин показал, что первые три параметра – наиболее подходящие предикторы для прогноза приближения даты схода и последующей длины зоны отложений. Указанные предикторы характеризуются максимальной корреляцией по сравнению с другими величинами вероятности нижних границ зоны отложений, а именно: корреляция первых двух предикторов с зонами вероятности составляет $-0,12$ и $-0,30$ соответственно, а третьего $-0,19$.

Для построения функции прогноза-диагноза в случае лавин сублимационной перекристаллизации примем в расчёт наличие границ между слоями метаморфизованного снега разной плот-

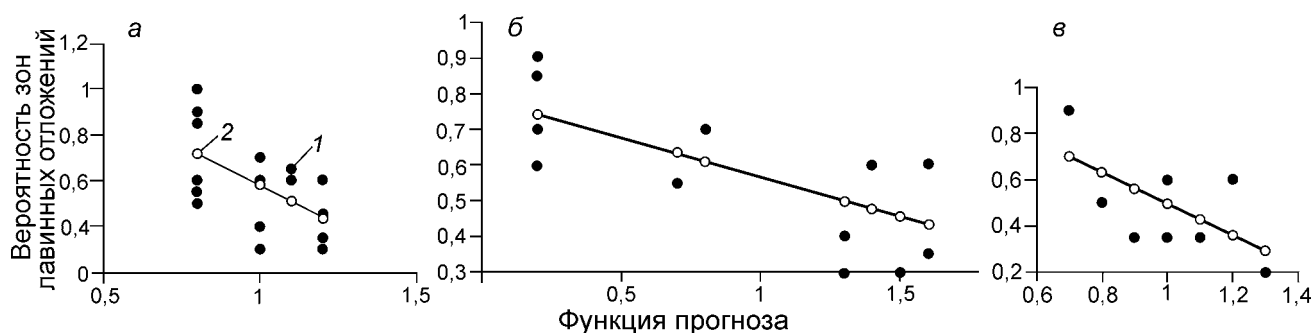


Рис. 1. График связи значений функций прогноза и соответствующих вероятностей зон лавинных отложений (лавино-сбор № 22, Хибины):

a – для лавин сублимационной перекристаллизации с функцией прогноза на основе суммы температур за четыре дня; *b* – для лавин сублимационной перекристаллизации с функцией прогноза на основе взвешенных сумм температур за четыре дня; *в* – для сухих смешанных лавин с функцией прогноза на основе средней высоты снега за четыре дня; 1 – зарегистрированные значения; 2 – точки линии регрессии

Fig. 1. The connection curve between forecast function values and related avalanche deposit zone probabilities (Khibiny avalanche site № 22):

a – for sublimative re crystallization avalanches with forecast function based on temperature sum for 4 days; *b* – for sublimative recrystallization avalanches with forecast function based on weighted temperature sum for 4 days; *c* – for mixed type dry avalanches with forecast function based on averaged snow height for 4 days; 1 – registered values; 2 – regression line points

ности, разделяющих всю толщу снега на склоне на несколько пластов. Эти слои при разрыхлении в связи с определённым запасом холода могут становиться неустойчивыми и соскальзывать по границам между ними вплоть до грунта. Смоделируем функцию прогноза на основании увеличения сдвигающей нагрузки с ростом толщины слоя снега за счёт ослабления внутреннего трения по мере разрыхления и разрушения внутренних связей вследствие перекристаллизации и накопления запаса холода в толще снега. В качестве основного члена формулы функции прогноза возьмём сумму отрицательных среднесуточных температур за четыре дня. Кроме того, примем гипотезу, что чем больше эта сумма, тем более толстый слой снега сойдёт со склона и таким образом лавинные отложения сойдут дальше вниз по склону. В первом приближении наиболее подходящий вид функции прогноза для лавин сублимационной перекристаллизации будет $F = 0,04[40 - |\Sigma t|]$ в критической области среднесуточной температуры $|t| > 10$ °С при сумме осадков за четыре дня менее 10 мм и толщине снега на склоне более 90–100 см. Причём теоретическая оправдываемость прогноза при $F > 1$ равна 55%, а корреляция функции прогноза с вероятностями зон отложений составляет порядка $-0,3$. Иными словами, с учётом предельной статистической погрешности оправдываемости прогноз фактически оказывается неопределённым.

Попытаемся найти несколько другой, более эффективный вариант функции прогноза. С зонами отложений сильнее коррелирует сумма температур за четыре дня: коэффициент корреляции равен $-0,63$.

Тогда функцию прогноза можно записать как $F = \Sigma t_4 / (\Sigma t_4)_{\text{ср}}$. Предположим возможность функциональной связи между этими двумя предикторами, где уровень значимости связи равен 0,02, т.е. $p = 1,28 - 0,7F$. Таким образом, согласно графику рис. 1, *a*, видно, что чем больше значения функции прогноза, тем меньше соответствующие им вероятности границ зон отложений, т.е. тем дальше распространяются лавины, поскольку это связано с большей толщиной снега.

Можно предложить ещё один вариант функции прогноза, который на практике, вероятно, окажется более эффективным. Основываясь на материалах работы [4], предложим для этого модель стратиграфии снежной толщи на склоне, состоящую, по крайней мере, из трёх слоёв снега разной текстуры, разделённых двумя границами – корками сублимационной перекристаллизации, определяемыми величиной температурного градиента и имеющими большую плотность по сравнению со слоями разрыхления. Эти слои разрыхления при соответствующем запасе холода могут становиться неустойчивыми и сходиться, соскальзывая по границам-коркам. Для выявления влияния запаса холода разделим соответственно сумму температур на три диапазона 30–40, 50–60 и 60–70 °С и выше, а затем придадим этим диапазонам соответствующие веса в пропорции, например, 1:2:4 или 1:3:5, исходя из лавинообразного нарастания процесса. Теперь смоделируем функцию прогноза в соответствии со следующим механизмом: сдвигающая нагрузка увеличивается с ростом толщины потенциально сходящего слоя снега, а также за счёт ослабления внутреннего

трения из-за разрыхления. В качестве основного члена формулы функции возьмём сумму среднесуточных температур за четыре дня, скорректированную (взвешенную) в соответствии с ранее отмеченным предположением: $F = |\Sigma t_{4\text{вз}}| / |\Sigma t_{4\text{вз}}|_{\text{ср}}$. В этом случае коэффициент корреляции взвешенных таким образом температур (и соответственно функции прогноза) с вероятностями зон дальности выброса возрастёт с $-0,30$ до $-0,71$, что выше чем $-0,63$. В итоге данная модель краткосрочного прогноза-диагноза лавин перекристаллизации может оказаться на практике более эффективной. На рис. 1, б показан график связи значений функции прогноза и вероятностного зонирования, который даёт основание и для пространственного прогноза дальности выброса лавин перекристаллизации. Уравнение связи между вероятностью зон отложений и значением взвешенной суммы температур за четыре дня при уровне значимости порядка $0,02$ будет иметь следующий вид: $p = 0,78 - 10^{-3} |\Sigma t_{4\text{вз}}| / [^{\circ}\text{C}]$.

Сухие лавины смешанного типа (перекристаллизация и осадки)

Теперь рассмотрим сухие лавины смешанного типа (за счёт сублимационной перекристаллизации и выпадения снега). После критического анализа из общего списка лавин за период 1934–2004 гг. мы отобрали девять лавин такого типа в Хибинах, сошедших в 1937–1958 гг. Лавины смешанного типа зависят от определённого диапазона осадков, толщины снега и суммы температур и возникают при превышении суммы температур за четыре дня (абсолютные величины $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$) и толщины снега 50 см. При этом сумма осадков за четыре дня не должна превышать $15\text{--}20$ мм – в противном случае более вероятен маскирующий сход лавины из свежеснегавшего снега. Чем больше сумма температур по абсолютной величине, тем сильнее разрыхление (и соответственно меньше трение) в слоях перекристаллизации и толще общий пласт снега, подготавливаемый к срыву. Поэтому с величиной функции прогноза должна коррелировать и дальность выброса лавин. При этом в лавинах смешанного типа свежеснегавший снег заметно увеличивает объём сходящих лавин и, как правило, их дальность. Корреляция средней толщины снежного покрова за четыре дня с вероятностью зон нижних границ лавин составляет $-0,63$, что указывает на определённую функциональную связь между указанными параметрами. Таким образом, в случае лавин смешанного типа функция прогноза будет такой: $F = h/h_{\text{ср}}$. Лавины смешанного типа должны сходиться, как правило, когда произведение средней толщины снега и суммы температур за четыре дня по абсолютной величине превышает $2500\text{--}3000$ [$^{\circ}\text{C}$ см]. Приведём уравнение связи

между вероятностью зон отложений и значением функции прогноза в данном случае (см. рис. 1, в): $p = 1,17 - 0,68F$. При этом значимость нулевой гипотезы составляет $0,07$.

Преобразование краткосрочных функций прогноза лавин перекристаллизации и лавин смешанного типа в долгосрочные

Для выполнения преобразования проведём осреднение по скользящим средним текущих многолетних реализованных значений краткосрочной функции прогноза по пятилетним интервалам – наиболее оптимальным в нашем конкретном случае. Осреднение позволяет сгладить случайные колебания значений этой функции за выбранный период, выявить долговременную тенденцию изменения этих значений, связанную с климатическими колебаниями, и таким способом прогнозировать лавинную

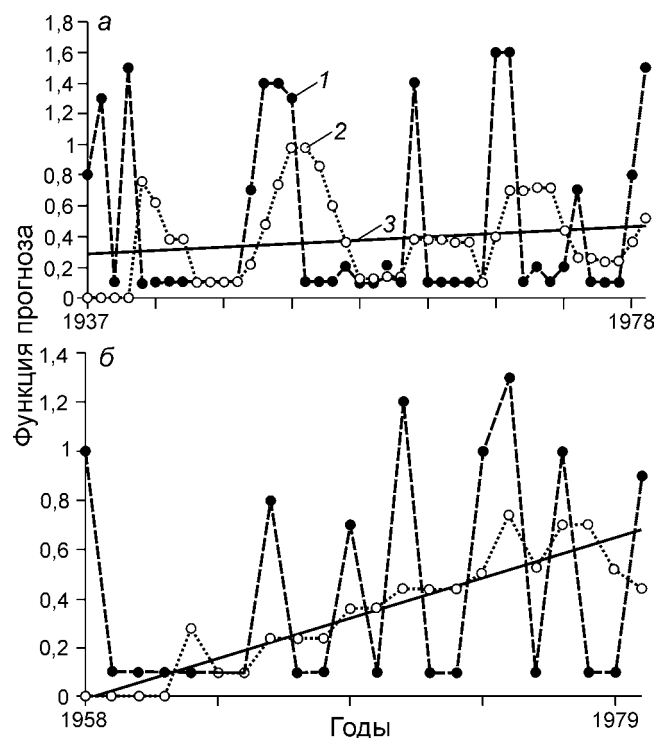


Рис. 2. Ход реализованных значений функций прогноза и кривой осреднения по скользящим 5-летним интервалам (лавиносбор № 22, Хибинь):

а – для лавин сублимационной перекристаллизации за период 1937–1978 гг.; б – для сухих лавин смешанного типа за период 1958–1979 гг.; 1 – реализованные значения; 2 – средние значения; 3 – тренд

Fig. 2. The realized forecast function values curve and averaged values curve on slipping 5-years intervals for Khibiny avalanche site № 22:

а – for sublimative recrystallization avalanches in 1937–1978; б – for mixed type dry avalanches in 1958–1979; 1 – realized values; 2 – averaged values; 3 – trend

активность в долгосрочной перспективе. В результате получаем кривые многолетних колебаний функции прогноза, связанных с лавинной активностью (рис. 2). Соответствующий анализ долгосрочных функций прогноза (вместе с ранее опубликованными результатами) показывает, что для всех типов лавин в Хибинах характерен общий тренд повышения активности на своём временном интервале. Кроме того, можно предположить, что активность лавин разного типа подвержена разным ритмам колебаний климата и снежности. Например, для лавин перекристаллизации характерны более короткие (8–10-летние), а для лавин смешанного типа – долгопериодические (32-летние) гармоника.

Выводы

Существует принципиальная возможность составления краткосрочного локально-фоновое прогноза-диагноза для лавин сублимационной перекристаллизации и смешанного типа в Хибинах (как это было сделано для сухих и мокрых лавин из свежеснежного снега в случае Хибин и Приэльбрусья), а также, вероятно, и для других горных регионов. Чтобы проверить это, требуются соответствующие ряды наблюдений, которыми пока мы не располагаем. Кроме того, на данном этапе исследований приходится констатировать более приближённый характер прогноза для лавин данного генезиса, чем в случае сухих и мокрых лавин из свежеснежного снега. Отметим также, что для наиболее распространённого генетического типа лавин в Хибинах – метелевых – пока не найдена адекватная функция краткосрочного локального прогноза по материалам лавиносбора № 22, однако работа в этом направлении продолжается. Для дальнейшего повышения качества прогноза рассматриваемого типа для лавин сублимационной перекристаллизации и смешанного типа требуются как соответствующий теоретический вклад в разработку функций прогноза, так и наращивание ряда наблюдений за такими лавинами в разных горных регионах. Краткосрочный пространственно-временной прогноз можно дополнить максимальными оценками, которые получают в случае прогноза сухих и мокрых лавин при тех же метеоданных, т.е. осадках, толщине снега и температурах. Хотя диапазоны этих предикторов для лавин разных генетических типов и различаются, но за счёт существующего перекрытия диапазонов приближённая максимальная пространственно-временная прогноз-оценка возможна. Анализируя ранее полученные результаты по составлению функций прогноза для сухих и мокрых лавин [1, 2] и рассмотренные в настоящей статье, мы пришли к выводу, пока теоретическому, о целесообразности применения не одной, а двух

функций прогноза – одной для времени схода и другой, уточняющей, по длине отложений, которые в ряде случаев могут совпадать.

Литература

1. Андреев Ю.Б., Трошкина Е.С. Методика статистического макрофизического моделирования условий лавинообразования // МГИ. Вып. 86. 1998. С. 165–169.
2. Андреев Ю.Б., Божинский А.Н., Молоткова Ж.Л., Олейников А.Д., Черноус П.А. Краткосрочное пространственно-вероятностное прогнозирование сухих и мокрых лавин // Лёд и Снег. 2011. № 4 (113). С. 64–68.
3. Божинский А.Н., Молоткова Ж.Е. О вероятностном крупномасштабном зонировании лавиноопасной территории // МГИ. Вып. 103. 2007. С. 87–90.
4. Савельев Б.А., Лаптев М.Н., Лаптева Н.И. Строение, состав, физико-механические свойства снега в Хибинах и их изменение в процессе метаморфизма // Снег и лавины Хибин. М.: изд. МГУ–ЦПЗ Комбината «Апатит», 1967. С. 201–239.
5. Трошкина Е.С. Лавинный режим горных территорий СССР // ВИНТИ. Итоги науки и техники. Сер. Гляциология. 1992. Т. 11. 185 с.
6. Трошкина Е.С., Данилина А.В., Андреев Ю.Б., Светлосанов В.А. Методика количественной оценки метеорологических параметров для районирования лавиноопасных районов СССР по типам лавинного режима // МГИ. Вып. 59. 1987. С. 122–125.
7. Bozhinskiy A.N., Sukhanov L.A., Andreev Yu.B., Sidorova T.L. Probabilistic zoning of avalanche paths and risk estimation // МГИ. Вып. 93. 2002. С. 117–121.

Summary

A possibility of space-temporary short-term forecast-diagnosis of dry sublimative recrystallization and mixed (recrystallization plus fresh snow) avalanches is under consideration. The special discriminate analog–macrophysical models of the short-term background forecast is verified on correlation degree with probabilistic zoning of avalanche site № 22 in Khibiny. As a result we have correlation coefficients of order $-(0.6 \div 0.7)$. The statistical significance of correlation coefficients (an order of 0.02–0.07) are checked and a conclusion on likelihood of assumed hypothesis is made. So by the current and predicted meteorological data such kind of forecast for such genetic avalanche types release in concrete sites becomes possible. The short-term forecast function transformation of the examined in the article avalanche types into long-term ones by averaging perennial realized forecast function values on slipping optimal 5-years intervals shows avalanche activity trend with probable 8–10- and 32-years harmonics during selected observation period. But in comparison with purely dry and wet fresh snow avalanches forecast analysed before the examined here above types are less precisely predicted. So it is needed an improvement of correspondent forecast functions on the base of theory contribution and future observations by increasing their series.