

УДК 551.322

DOI: 10.34753/HS.2019.1.3.005

АНАЛОГИЧНОСТЬ В ОБРАЗОВАНИИ МЕТЕЛЕВЫХ ЛАВИН В ХИБИНАХ

П.А. Черноус¹, А.В. Волков²

¹Специальное конструкторское бюро
средств автоматизации морских исследова-
ний Дальневосточного отделения Российской
академии наук, г. Южно-Сахалинск, Россия;

²Управление главного инженера АО «Апа-
тит», г. Кировск, Россия
pchernous48@gmail.com

AN ASSESSMENT OF THE SIMILARITY OF SNOWSTORM AVALANCHING IN THE Khibiny MOUNTAINS

Pavel A. Chernous¹, Aleksandr V. Volkov²

¹Special Research Bureau for Automation of
Marine Researches, Far East Branch of
Russian Academy of Sciences,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia;

²Management of the chief engineer "Apatit"
JSC, Kirovsk, Russia
pchernous48@gmail.com

Аннотация. На практике прогнозирование возникновения лавин в отдельно взятом лавинном очаге осуществляется, как правило, субъективно на основе фоновых лавинных прогнозов, прогнозов погоды, данных о местоположении и рельефе лавинного очага, а также имеющихся данных о снежном покрове в этом очаге. При этом прогнозистами иногда выделяются лавинные очаги, в которых, по их мнению, лавинообразование происходит сходно. Обычно считают, что лавинообразование происходит сходно в лавинных очагах близких по морфологии и морфометрии, а также имеющих близкие экспозиции. Целью работы было установление количественной связи в лавинообразовании метелевых лавин в 22-х лавинных очагах, расположенных на территории площадью около 25 км², находящейся

Abstract. In practice, forecasting of avalanche occurrences in a single avalanche path is usually subjective based on background avalanche and weather forecasts, data on the location and topography of the avalanche starting zone, as well as available data on the snowpack in it. Moreover, forecasters sometimes identify avalanche starting zones, in which, according to their opinion, avalanche formation is similar. It is generally believed that avalanche formation occurs similarly in avalanche starting zones similar in morphology and morphometry, as well as having similar exposure. The aim of the work was to establish a quantitative relationship in the avalanche formation of snowstorm avalanches in 22 avalanche starting zones located in an area of about 25 km² located in the southern part

в южной части Хибин. Исследование проведено на основе многолетних наблюдений за лавинами в данном регионе. В качестве меры близости лавинообразования в двух лавинных очагах $P(i/j)$ была использована условная вероятность образования лавины в лавинном очаге i , если лавина образовалась в лавинном очаге j . Как показало исследование, статистические связи лавинообразования в различных лавинных очагах являются значимыми, но, как правило, довольно слабыми. Наиболее сходно образование метелевых лавин происходит в очагах имеющих сходную экспозицию. Помимо этого, влияют деформации воздушного потока в горной системе и размеры зон метелевого сноса снега, а также пространственная изменчивость физико-механических характеристик метелевого снега в лавинных очагах. Предложена методика вероятностной диагностики и прогнозирования метелевых лавин с использованием лавинных очагов-индикаторов.

Ключевые слова: метелевые лавины; массовый сход; вероятности; лавинные очаги-аналоги; диагностика лавин; прогнозирование.

of the Khibiny Mountains. The study was based on long-term observations of avalanches in this area. As a measure of the proximity of avalanche formation in two avalanche starting zones $P(i/j)$, we used the conditional probability of avalanche formation in avalanche starting zone i , if an avalanche formed in avalanche starting zone j . As the study showed, correlations between avalanche formation in various avalanche starting zones are statistically significant, but, as a rule, rather weak. The most similar formation of snow avalanches occurs in the starting zones having a similar exposure. In addition, the deformations of the air flow in the mountain system and the size of the snow drift zones, as well as the spatial variability of the physical and mechanical characteristics of snowpack in avalanche starting zones, also affect. A methodology for probabilistic diagnosis and forecasting of snowstorm avalanches using avalanche starting zones-indicators is proposed.

Keywords: snowstorm avalanches; numerous releases; probabilities; avalanche starting zones-analogues; avalanche diagnostics; forecasting

Введение

Естественно предположить, что одинаковым условиям лавинообразования будет соответствовать сходное лавинопроявление. Однако, полностью одинаковых условий, в которых формируются лавины, даже на незначительных площадях не бывает. Поэтому и связи

между лавинообразующими факторами и лавинопроявлением, а также между лавинопроявлением в различных лавиносборах носят не детерминированный, а вероятностный характер.

Рельеф лавиносбора, как правило, не меняется или меняется очень медленно, за исключением случаев, когда он подвергается воздействию быстрых геологических либо антропогенных процессов. Поэтому, рельеф, как фактор влияющий на лавинопроявление, можно считать постоянным для каждого лавиносбора. Сходство характеристик рельефа в лавиносборах определяет сходство в определении экстремальных динамических характеристик возможных лавин. Аналогичность в рельефе может быть использована, например, при проведении изысканий для строительства в малоизученных районах. Количественное описание рельефа лавиносборов и выбор соответствующих мер аналогичности лавиносборов по отношению к экстремальному лавинопроявлению не является задачей настоящей работы.

Целью работы является исследование аналогичности лишь в возникновении лавин в различных лавинных очагах. Количественная оценка такой аналогичности может быть полезна для выявления очагов-индикаторов лавинной опасности, пространственной дифференциации диагностики лавиноопасных ситуаций на основе данных о сошедших лавинах, а также для прогнозирования возникновения лавин. Выделение лавинных очагов-аналогов, то есть таких, в которых процесс лавинообразования протекает в значительной мере сходно, может использоваться при формировании более или менее однородных выборок приемлемых размеров, используемых для построения правил разделения метеорологических ситуаций на два класса – лавиноопасные и нелавиноопасные. Например, при дискриминантном анализе или методах распознавания образов. Для получения более четких связей между возникновением лавин в различных лавинных очагах, желательно проводить их анализ для лавин одного генетического типа. В настоящей работе рассматривается вопрос вероятностной связи и определения степени аналогичности образования метелевых лавин [Аккуратов, 1959] в различных лавинных очагах.

Методы и материалы

В связи с поставленной задачей возникает вопрос о выборе меры аналогичности. В качестве таковой предлагается использовать условную вероятность $P(i/j)$ образования лавины в лавинном очаге i , если лавина образовалась в лавинном очаге j [Judson, 1983]. Необходимо при этом определить период времени, к которому относится вероятность $P(i/j)$. Учитывая

точность определения времени схода большинства лавин этот период определен одними календарными сутками. Для лавин некоторых генетических типов, например, для лавин свежевывавшего снега и метелевых лавин, может быть использована длительность снегопада или метели, но не менее суток. В настоящей работе для этого взяты календарные сутки. Таким образом, если лавины сошли в очагах i и j в течение календарных суток, значит имело место совместное событие $A(i \cap j)$. В качестве оценки условной вероятности $P(i/j)$ использовано отношение числа таких совместных событий - $N_{A(i \cap j)}$ к общему числу сходов лавин $N_{A(j)}$ в лавинном очаге j , взятых за определенный период $P(i/j) = A(i \cap j)/A(j)$.

Для анализа вероятностей $P(i/j)$ были выбраны Хибинские лавинные очаги, контролируемые противолавинной службой ОАО «Апатит», на участке площадью около 25 км² (рисунок 1). Всего на этом участке было выделено 69 лавинных очагов, где за период с 1935 г. по 2010 г. сходила хотя бы одна лавина.

В настоящей работе использованы нумерация и границы лавинных очагов, как они отмечены в кадастре лавиносборов противолавинной службы ОАО «Апатит». Всего в вышеупомянутый период в этих очагах сошло 6565 лавин. Из кадастра лавин противолавинной службы ОАО «Апатит» отбирались лишь те случаи схода лавин, для которых дата схода была точно известна. Таких лавин было 5373. Причем в некоторые дни в отдельных лавинных очагах сходило по несколько лавин. Если в течение дня в лавинном очаге сходило несколько лавин, это учитывалось, как одно событие. Всего таких событий (дней с лавинами) за 75 лет было 2037.

При оценке вероятностей $P(i/j)$ во внимание принимались лишь те лавинные очаги, которые не были деформированы горными работами, а также наблюдения за которыми велись в тот же период, что и за другими очагами. Эти данные были использованы для оценки частот одновременного возникновения лавин в разном числе лавинных очагов, без учета их генетических типов. Генетический тип лавины указывался в кадастре лавин до 1986 года. Поэтому оценки вероятностей $P(i/j)$ для метелевых лавин выполнены по данным полученным до этого года. В некоторых лавинных очагах наблюдалось всего по несколько случаев образования метелевых лавин, такие лавинные очаги были исключены из рассмотрения. Анализу подверглись лишь те лавинные очаги, в которых отмечалось не менее 10 случаев (дней) схода лавин. Всего было учтено 813 случаев возникновения метелевых лавин в 22-х лавинных очагах (рисунок 1).

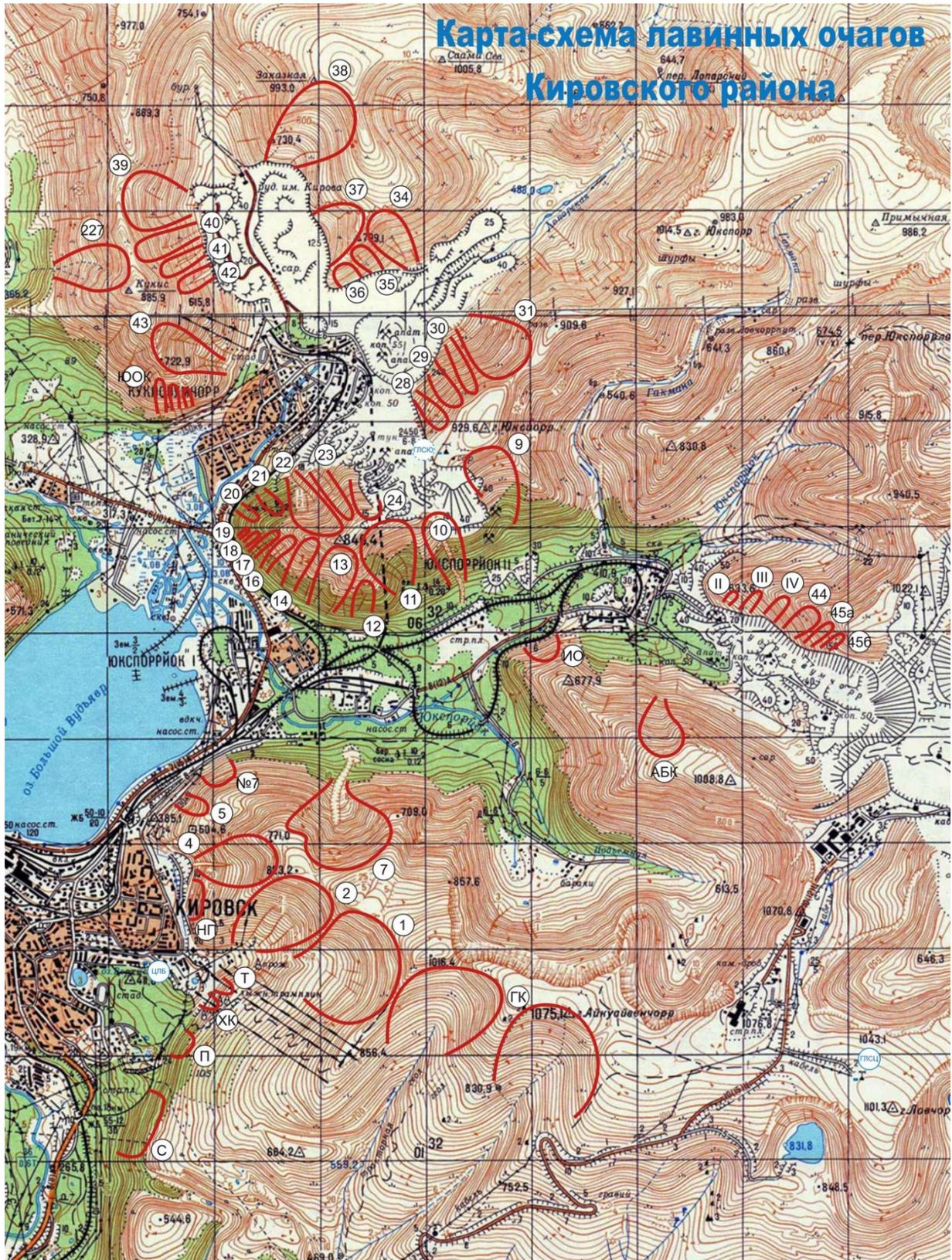


Рисунок 1. Схема лавинных очагов в районе наблюдений в Хибинах

Figure 1. Schema of avalanche starting zones in the avalanche monitoring area in the Khibiny Mountains

Обсуждение результатов

Сход лавин в один и тот же день во многих лавинных очагах явление довольно редкое. Наибольшее количество очагов за все время наблюдений в рассматриваемом районе, в которых сошли лавины в один и тот же день, было зафиксировано 15.12.1991 и составило 14, или 26% всех лавинных очагов, контролируемых в то время. Три раза в один и тот же день были активными 13 лавинных очагов, 12 лавинных очагов – один раз, 11 лавинных очагов – 2 раза и в 10 лавинных очагах – 6 раз. В 56% всех дней с лавинами был активен лишь один лавинный очаг. Массовых сходов лавин, когда наблюдается возникновение лавин более чем в 1/3 всех лавинных очагов в регионе¹, в Хибинах не зарегистрировано.

Похожие результаты были получены в Скалистых горах, в штате Колорадо, США. Там наблюдения на территории 200 км² показали, что только дважды в год наблюдаются такие сходы лавин, когда действуют более 10% лавинных очагов [Judson, 1983]. Тип лавин при этом во внимание не принимался.

Что касается метелевых лавин, то их одновременный сход во многих лавинных очагах также явление довольно редкое и вероятность его резко уменьшается с увеличением доли активных лавинных очагов к их общему количеству в данном районе. Анализ дат схода лавин в районе Хибин, контролируемом противолавинной службой ОАО «Апатит», показал, что доля случаев, когда в один и тот же день сходили метелевые лавины в более чем 10% всех очагов составляет не более 4% всех дней с метелевыми лавинами. Если совместный сход лавин относить не к календарным дням, а ко всему периоду метелевого явления, то сход метелевых лавин в более чем 10% лавинных очагов наблюдается почти в 10% всех ситуаций, в которых наблюдались метелевые лавины. Это объясняется тем, что достаточно большое количество «лавинных» метелей имеет продолжительность более суток и некоторыми временными различиями в метелевом снегонакоплении в различных лавинных очагах, необходимом для возникновения метелевой лавины.

Проверка вероятностных связей между возникновением лавин в различных парах лавинных очагов с помощью критерия χ^2 показала, что при 0,1% уровне значимости большинство связей являются значимыми. Оценки вероятностей $P(i/j)$ представлены в таблице 1.

¹ Методические указания по снеголавинному обеспечению народного хозяйства. Ташкент, 1987. 48 с.

Таблица 1. Оценка вероятностей $P(i|j)$ образования метелевой лавины в лавинном очаге i , если метелевая лавина образовалась в лавинном очаге j .

Table 1. Assessments of probabilities $P(i|j)$ of snowstorm avalanche release in avalanche starting zone i , if snowstorm avalanche has been released in avalanche starting zone j .

<i>ij</i>	2	3	4	9	13	14	16	17	18	19	22	23	24	28	29	30	31	34	35	37	38	43
2	1	0,00	0,08	0,16	0,12	0,12	0,14	0,08	0,12	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,06	0,04	0,04	0,26	0,06	0,04	0,14	0,06
3	0,00	1	0,00	0,09	0,09	0,00	0,00	0,09	0,18	0,00	0,00	0,00	0,18	0,09	0,09	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,29	0,00	1	0,14	0,29	0,21	0,07	0,00	0,07	0,07	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,21	0,07
9	0,21	0,03	0,05	1	0,13	0,18	0,24	0,08	0,13	0,08	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,18	0,08	0,10	0,13	0,05
13	0,15	0,03	0,12	0,12	1	0,50	0,32	0,35	0,32	0,09	0,12	0,06	0,00	0,00	0,09	0,09	0,03	0,29	0,09	0,06	0,06	0,09
14	0,21	0,00	0,11	0,21	0,61	1	0,43	0,25	0,32	0,18	0,07	0,04	0,00	0,00	0,11	0,07	0,07	0,04	0,25	0,04	0,04	0,11
16	0,14	0,00	0,02	0,18	0,22	0,25	1	0,39	0,50	0,18	0,04	0,02	0,04	0,02	0,06	0,04	0,02	0,18	0,04	0,04	0,06	0,04
17	0,08	0,02	0,00	0,06	0,23	0,13	0,36	1	0,43	0,15	0,15	0,06	0,04	0,02	0,09	0,04	0,06	0,21	0,06	0,08	0,04	0,08
18	0,12	0,04	0,02	0,10	0,23	0,19	0,46	0,48	1	0,27	0,12	0,08	0,02	0,00	0,02	0,04	0,04	0,19	0,04	0,06	0,06	0,06
19	0,04	0,00	0,04	0,14	0,14	0,23	0,41	0,36	0,59	1	0,09	0,14	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,32	0,04	0,14	0,09	0,09
22	0,06	0,00	0,03	0,00	0,12	0,06	0,06	0,24	0,18	0,06	1	0,18	0,15	0,18	0,09	0,12	0,18	0,21	0,06	0,09	0,29	0,00
23	0,09	0,00	0,09	0,09	0,18	0,09	0,09	0,27	0,36	0,27	0,54	1	0,00	0,18	0,00	0,00	0,18	0,18	0,00	0,18	0,09	0,00
24	0,05	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,100	0,10	0,05	0,00	0,25	0,00	1	0,05	0,00	0,05	0,05	0,20	0,00	0,05	0,05	0,00
28	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	0,00	0,07	0,33	0,13	0,07	1	0,27	0,07	0,20	0,20	0,27	0,20	0,00	0,07
29	0,25	0,08	0,00	0,00	0,25	0,25	0,25	0,42	0,08	0,08	0,25	0,00	0,00	0,33	1	0,00	0,08	0,25	0,08	0,17	0,00	0,08
30	0,10	0,05	0,00	0,05	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	0,15	0,00	0,05	0,05	0,00	1	0,35	0,10	0,05	0,00	0,00	0,00
31	0,12	0,00	0,00	0,12	0,06	0,06	0,06	0,19	0,12	0,00	0,38	0,12	0,06	0,19	0,06	0,44	1	0,12	0,12	0,06	0,00	0,00
34	0,12	0,00	0,01	0,07	0,11	0,08	0,10	0,11	0,10	0,08	0,06	0,020	0,039	0,029	0,039	0,020	0,020	1	0,052	0,088	0,118	0,069
35	0,10	0,00	0,00	0,14	0,14	0,05	0,10	0,14	0,10	0,05	0,05	0,00	0,00	0,14	0,05	0,05	0,10	0,29	1	0,10	0,10	0,10
37	0,06	0,00	0,00	0,11	0,08	0,03	0,06	0,11	0,08	0,08	0,08	0,06	0,03	0,14	0,06	0,00	0,03	0,28	0,14	1	0,14	0,14
38	0,19	0,00	0,08	0,14	0,06	0,08	0,08	0,06	0,08	0,06	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,06	0,14	1	0,14
43	0,15	0,00	0,05	0,10	0,15	0,06	0,10	0,20	0,15	0,10	0,00	0,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,00	0,35	0,10	0,25	0,25	1

В целом вероятности $P(i/j)$ довольно малы, что отражает большую неоднородность условий лавинообразования и указывает на низкую эффективность фоновых прогнозов, которые, по сути дела, улавливают лишь обобщенную тенденцию лавинообразования, конкретные проявления которой являются в рамках таких прогнозов непредсказуемыми. Наибольшее значение $P(i/j)=0,61$ ($P(j/i)=0,50$) получено для очагов $i=14$ и $j=13$ (рисунок 2).



Рисунок 2. Схема лавинных очагов № 13 – № 19 горы Юкспор

Figure 2. Schema of avalanche starting zones № 13 – № 19 of the Yukspor Mountain

Большие значения $P(i/j)$ также получены для пар очагов входящих в группу очагов с 13 по 19 (рисунок 2), а также для пар рядом расположенных очагов 22 и 23, 28 и 29, 30 и 31 (рисунок 1). Например, около 45% всех метелевых лавин в лавинном очаге 17 (рисунки 1 и 2) сходит во время метелей, при которых образуются лавины в лавинном очаге 18 и наоборот. Большие значения вероятностей объясняются сходной ориентацией и близким расположением очагов, принадлежностью к одному макросклону и общей областью сноса метелевого снега. Причем схожая ориентация лавинных очагов является необходимым, но недостаточным условием аналогичности лавинообразования. Например, вероятности $P(i/j)$ и $P(j/i)$ для

одинаково ориентированных очага 37 и очагов из группы с 13-го по 19-й сравнительно небольшие. То же самое можно отметить для очага 38 и очагов из группы с 13-го по 19-й.

Очевидно, что синхронность возникновения лавин зависит и от различий в крутизне лавинных очагов. На крутых склонах метелевые лавины формируются быстрее и чаще, чем на пологих. Влияния различий в площади лавинных очагов на тесноту связей в возникновении метелевых лавин отмечено не было. Как уже говорилось, условия образования метелевых лавин в лавинных очагах с 13 по 19 (рисунок 2) обладают наибольшей степенью аналогичности. Лавины, сходящие в этих очагах, угрожают одному объекту – железной дороге (рисунки 1 и 2). Этот факт был использован при создании методики прогноза лавинной опасности для этого объекта. Были сформированы достаточно большие однородные выборки лавинных и не лавинных ситуаций, описываемых набором характеристик, на основе которых были построены правила разделения ситуаций в этих очагах на лавинные и не лавинные [Черноус, 1975]. Используя расчетную вероятность образования лавины в лавинном очаге $P(j)$, полученную каким-либо образом, например с помощью статистического моделирования [Черноус, Перликов, Мокров, 1998], можно с помощью формулы полной вероятности оценить вероятность образования лавины в очаге i :

$$P(i) = P(i/j)P(j) + P(i/j_n)[1 - P(j)] \quad (1)$$

где $P(i/j_n)$ – вероятность образования лавины в лавинном очаге i , если лавина в лавинном очаге j не сошла.

Таблица вероятностей $P(i/j_n)$ здесь не приводится, но их значения значительно меньше, чем $P(i/j)$ и в расчетах их можно не учитывать

Заключительные замечания

Таким образом, полученные данные количественно подтверждают значительную пространственную изменчивость лавинообразования, связанного с метелями в Хибинах, где этот тип лавинообразования является основным. При образовании метелевых лавин, большую роль играют не только морфология и морфометрия лавинных очагов, но и их расположение по отношению к источникам сноса метелевого снега. Такая изменчивость сильно отличает образование метелевых лавин от лавин свежеснежного покрова. Что в свою очередь приводит к выводу о большей сложности прогнозирования метелевых лавин, по сравнению с прогнозированием лавин свежеснежного покрова.

Формулировки фоновых прогнозов лавин, в районах с интенсивной метелевой деятельностью, должны отличаться большим диапазоном описания лавинопроявления от мест, где метелей нет или они редки. Для детальных лавинных прогнозов в «метелевых районах» мониторинг предикторов должен осуществляться с более высоким пространственным и временным разрешением, чем в районах, где метелевая деятельность слабая, для достижения одинакового качества прогнозов.

Показатель аналогичности лавинных очагов $P(i/j)$ позволяет разбить очаги на группы, в которых процесс лавинообразования протекает сходно, а также определить репрезентативные лавинные очаги. В свою очередь, данные о сошедших лавинах в репрезентативных очагах, полученные оперативно, позволяют более обоснованно оценивать лавинную опасность в других очагах. Также для этих целей может быть использован любой надежный метод оценки возможности образования лавины в репрезентативном лавинном очаге. В том числе и экспертные оценки.

Представленная матрица $|P(i/j)|$ успешно использовалась в работе Центра лавинной безопасности ОАО «Апатит» для оценки лавинной опасности во время метелей.

Литература

References

Аккуратов В.Н. Генетическая классификация лавин // Труды Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции. Т. 1 (4): Снег, лавины и применение снега в народном хозяйстве: Материалы II Всесоюз. межвед. конференции, посвящ. вопросам снежного покрова / Под ред. Г.К. Сулаквелидзе и Г.К. Тушинского. Нальчик: Кабард.-Балкар. кн. изд-во, 1959. С. 215-232.

Черноус П.А., Перликов А.М., Мокров Е.Г. Автоматизированное рабо-

Akkuratov V.N. Geneticheskaya klassifikatsiya lavin [Genetic classification of avalanches]. In Sulakvelidze G.K., Tushinskogo G.K. (eds.) *Trudy El'brusskoi vysokogornoj kompleksnoi ekspeditsii. T. 1 (4): Sneg, laviny i primeneniye snega v narodnom khozyaistve: Materialy vtoroi Vsesoyuznoi mezhvedomstvennoi konferentsii, posvyashchennoi voprosam snezhnogo pokrova* [Transactions of the Elbrus Alpine Complex Expedition. T. 1 (4): Snow, avalanches and the use of snow in the national economy: Materials of the second All-Union Interdepartmental Conference on Snow Cover Issues]. Nalchik: Kabardino-Balkarian Book Publishing House, 1959, pp. 215-232. (In Russian).

чее место прогнозиста лавин // Материалы гляциологических исследований. 1998. № 84. С. 72-75

Черноус П.А. Применение многомерного дискриминантного анализа для распознавания лавиноопасных ситуаций // Исследования снега и лавин в Хибинах: материалы Хибинской гляциологической конференции (г. Кировск, 25-26 декабря 1972 г) / Отв. ред. Б.Н. Ржевский. Ленинград, Гидрометеиздат, 1975. С. 64-70

Judson A. On the potential use of index path for avalanche assessment. // Journal of Glaciology. 1983. Vol. 29. No. 101. P. 178-184.

DOI: [10.1017/S0022143000005232](https://doi.org/10.1017/S0022143000005232)

Chernous P.A., Perlikov A.M., Mokrov E.G. Avtomatizirovannoe rabochee mesto prognozista lavin [Automated work place of avalanche forecaster]. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies]*, 1998, no. 84, pp. 72-75. (In Russian; abstract in English).

Chernous P.A. Primenenie mnogomernogo diskriminantnogo analiza dlya raspoznavaniya lavinoopasnykh situatsii [Application of multivariate discriminant analysis for avalanche situations recognition]. In Rzhevskii B.N. (ed.) *Issledovaniya snega i lavin v Khibinakh: materialy Khibinskoi glyatsiologicheskoi konferentsii (g. Kirovsk, 25-26 dekabrya 1972 g) [Studies of snow and avalanches in the Khibiny: materials of the Khibiny Glaciological Conference (Kirovsk, December 25-26, 1972)]* Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1975, pp. 64-70. (In Russian).

Judson A. On the potential use of index path for avalanche assessment. *Journal of Glaciology*, 1983, vol. 29, no. 101, pp. 178-184.

DOI: [10.1017/S0022143000005232](https://doi.org/10.1017/S0022143000005232)