

Санкт-Петербургский государственный университет

Михайленко Никита Олегович

Выпускная квалификационная работа

**Оценка пространственной статистической структуры высоты снега для
определения лавинной опасности (на примере Хибин)**

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.04 «Гидрометеорология»

Основная образовательная программа: «Опасные гидрологические явления: от мониторинга до принятия решений»

Научный
руководитель:
*Доцент с
возложенными
обязанностями
заведующей кафедрой
гидрологии суши, к.г.н.
Пряхина Галина
Валентиновна*

Научный консультант:
*Ведущий научный
сотрудник СКБ САМИ
ДВО РАН к.г.н.
Павел Александрович
Черноус*

Рецензент:
*Ведущий научный
сотрудник ФГБОУ
ГГО к.ф. – м.н.,
Бекряев Роман
Викторович*

Санкт-Петербург
2023

Содержание

Содержание	2
Введение	3
1. Краткая физико - географическая характеристика района исследований	7
1.1. Рельеф.....	7
1.2. Климат	8
1.3. Растительность	12
1.4. Снежный покров.....	12
1.5. Лавины	14
2. Методика работы	17
2.1 Полевые измерения	17
2.2 Обработка данных	20
3. Результаты исследования и их анализ	24
Заключение	29
Благодарности	30
Приложение №1. - Список использованной литературы.....	31
Приложение №2. – Коэффициенты автокорреляции и стандартное отклонение.....	33
Приложение №3. – Описательная статистика.....	37
Приложение №4. – Морфологическая и генетическая классификация лавин.....	41

Введение

Снежные лавины одно из самых опасных природных явлений в горах. Лавины в России ежегодно являются причиной гибели людей и большого материального ущерба. Обычно лавины могут образовываться на склонах крутизной более 20° и относительной высотой более 20—30 метров, где высота снега превышает 30—50 см. Ударное давление лавин может превышать 100 тонн на квадратный метр, а объем - несколько миллионов кубометров (Божинский, 1987). Лавины могут сходить с уступов речных и морских террас, а также со склонов оврагов. Также лавиноопасными могут быть и антропогенные склоны. Например, борта карьеров, откосы насыпей, горных отвалов, и дорожных выемок (Боброва и др, 2019). Для оперативной оценки лавинной опасности используются лавинные прогнозы. Обычно прогнозы лавинной опасности разделяются на три типа - фоновый мелкомасштабный для горной территории, фоновый крупномасштабный для горного бассейна или группы лавиносборов и детальный для лавиносбора или его части (Практическое пособие..., 1979). Настоящая работа связана с последним типом - т.е. локальным прогнозом возникновения лавин в конкретном лавинном очаге.

Сход лавины со склона вызывают напряжения и связанные с ними деформации, возникающие в снежной толще, и обуславливающие ее неустойчивость. Получение пространственных распределений напряжений и деформаций в пространственно-неоднородным снежном покрове на склоне произвольной конфигурации возможно лишь путем численного решение довольно сложных систем дифференциальных уравнений (Руководство..., 1965). Иногда достаточно точно определить зоны неустойчивости снежной доски на склоне можно получить с использованием клеточных автоматов. В любом случае для получения таких решений требуется большой объем исходных данных. В идеале необходимо знание характеристик, определяющих устойчивость снега, в каждой точке лавинного очага. Обычно это угол склона, высота, плотность, температура и прочностные характеристики снега. Отсутствие таких данных заставляет упрощать модели, использовать осредненные характеристики, что сильно снижает качество моделирования и делает его бесполезным для практического использования. В качестве возможного метода интерпретации чрезвычайно бедной исходной информации для оценки устойчивости снега на склоне может быть использован подход,

предложенный в работах (Chernous, Fedorenko, 1997; Божинский, Черноус, 2005). Суть этого подхода заключается в построении вероятностной модели основанной на использовании детерминированной физически обоснованной модели устойчивости, входные данные для которой получаются путем статистического моделирования пространственных распределений характеристик снега. Статистическое моделирование осуществляется на основе данных измерений и сведений о пространственной статистической структуре характеристик снега. На рисунке 1 представлен пример распределения толщины снежного покрова с использованием вероятной модели, при помощи метода Монте-Карло.

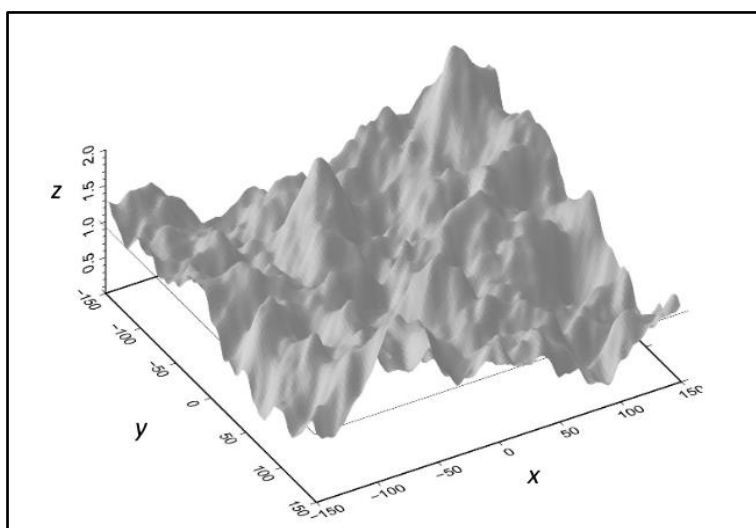


Рисунок 1. - Пример распределения толщины снежного покрова (сгенерировано при помощи метода Монте-Карло) (Chernous, Fedorenko, 1997)

В качестве статистик, характеризующих пространственную изменчивость, могут использоваться оценки математических ожиданий, дисперсий, автокорреляционных и структурных функций или вариограммы. Предложенный подход позволяет отобразить существующую неопределенность входных данных в вероятностном заключении об устойчивости снега и возможности. На практике он был реализован в автоматизированном рабочем месте прогнозиста лавин (Chernous, Fedorenko, 1997) (рис. 2). Одной из проблем применения такого подхода является недостаток знаний о параметрах пространственной статистической структуры на горных склонах. В отличие от гидрологических моделей, характерный размер территорий для которых должно осуществляться статистическое моделирование значительно меньше. Характерный размер участков склона с однородным залеганием снежного покрова в лавинных очагах

обычно составляет 50 – 100 м. Параметры пространственной статистической структуры полей характеристик снега, необходимые для оценки его устойчивости, должны соответствовать такому масштабу. Кроме того, эти параметры зависят от микрорельефа подстилающей поверхности и погодных условий, в которых формируется снежный покров.

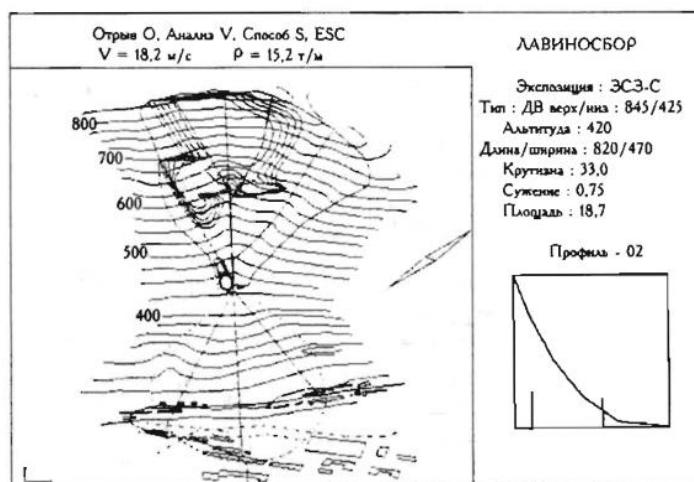


Рисунок 2. - Пример вывода информации об устойчивости (изолинии вероятности возникновения лавины) снега в лавинном очаге и динамических характеристиках возможной лавины (Chernous, Fedorenko, 1997)

Оценки параметров пространственной статистической структуры характеристик снега на небольших участках склонов в различных физико-географических условиях немногочисленны и пока не позволяют создать их универсальную классификацию в зависимости от этих условий. Новые данные будут полезны для решения этой задачи.

Знание пространственной статистической структуры является важным также для построения систем мониторинга характеристик снега, определяющих его устойчивость на склоне. Точность данных, получаемых с такой сети, определяется числом и схемой точечных измерений, их ошибками, а также пространственной статистической структурой полей, в которых проводятся эти измерения. Опыт таких оценок имеется. В ранее проделанной работе по рационализации измерений характеристик снежного покрова (Черноус, 2019) представлены результаты оценки точности интерполяции, замены средней интегрального значения по площади и математического ожидания для полей толщины снежного покрова, плотности и прочности снега на сдвиг в различных горных районах.

Целью настоящей работы является оценка параметров пространственной статистической структуры высоты снежного покрова на склонах Хибин с различным микрорельефом подстилающей поверхности и сравнение результатов с уже имеющимися оценками, полученными в других районах и других условиях (Черноус и др., 2018). В связи с тем, что для описания пространственного распределения снегонакопления, используются как высота, так и толщина снежного покрова, целью работы было экспериментальное сравнение параметров изменчивости этих характеристик.

1. Краткая физико - географическая характеристика района исследований

Хибины расположены примерно в центре Кольского полуострова, координаты - 67°45'С, 33°45'В. Массив площадью порядка 1000 км² имеет овальную форму (длина осей – около 40 км и 50 км). По своему происхождению массив представляет собой интрузивное тело, застывшее около 300 миллионов лет назад и подвергнувшееся воздействию различных экзогенных процессов (Бобруцкий, 2010). Ниже приводятся некоторые физико-географические характеристики Хибин, которые могут быть полезны для лучшего понимания настоящей работы.

1.1. Рельеф

Большое влияние на рельеф Хибин оказали произошедшие оледенения. Отметка высшей точки Хибин - горы Юдычвумчорр составляет 1208 м.н.у.м. м; преобладающие высоты платообразных вершин колеблются в диапазоне 900 - 1100 м.н.у.м. Сквозной долиной меридионального направления Куниок - Кукисиок - Б.Белая массив делится на Западные (Малые) и Восточные (Большие) Хибины. Восточный борт этой долины, состоящий из плато Лявочорр, Рисчорр, Кукисвумчорр, Юкспор, Расвумчорр, Айкуайвенчорр является главным водоразделом Хибин, от которого ответвляются остальные водоразделы, ограничивающие основные долины: Вуоннемиок, Тульок, Каскаснюок, Майвальтиок, Кальиок на востоке и М.Белая, Гольцовка - на западе. (рис. 3). Долины в Хибинах обычно широкие. Борта долин прямые, и не осложнены уступами. Днища долин плоские, местами перегорожены моренными грядами. Вершины горных массивов обычно заняты мелкощебнистыми либо крупнообломочными россыпями с участками каменных многоугольников и полос. Плоские вершинные поверхности являются источником сноса метелевого снега на прилегающие склоны, и последующему формированию лавин (Зюзин, 2006).

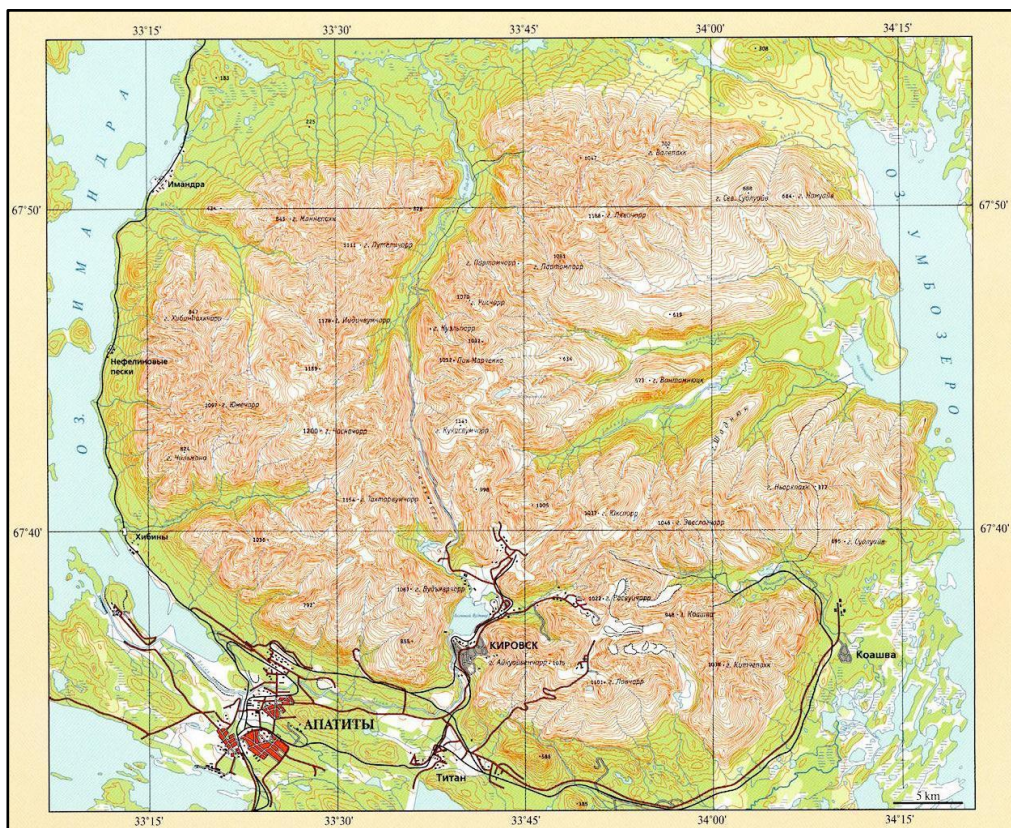


Рисунок 3. - Топографическая карта Хибин

1.2. Климат

Кольский полуостров является частью северной атлантико-арктической климатической области. Несмотря на высокие широты, климат на полуострове значительно мягче, чем в более восточных районах. Это обусловлено влиянием Гольфстрима. Хибинны подвержены интенсивной циклонической активности. Значение имеет также горный рельеф, обостряющий все происходящие в атмосфере процессы, из-за чего все горные плато по климатическим особенностям соответствуют островам российского арктического сектора. Наблюдается высотная зональность климата. В Хибинах наиболее характерными климатическими особенностями являются: длительная, но относительно мягкая зима, короткое и прохладное лето, наличие полярной ночи и полярного дня, высокая облачность, слабое испарение, большое

количество осадков, и высокая скорость ветра (Аккуратов, 1996). Температура воздуха в Хибинах сильно варьируется в зависимости высоты, В Таблице 1 представлены среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха в Хибинах для различных станций. Высота нум. для рассматриваемых в данном параграфе станций составляет (Зюзин, 2006):

1. Метеостанция “Хибины” - 135 м нум.
2. Метеостанция “Хибины, горная” - 761 м нум.
3. Метеостанция “Апатитовая гора” 360 м нум.
4. Метеостанция “Апатиты” - 136 м нум.
5. Метеостанция “Кировск-1” - 349 м нум.
6. Горно-лавиная станция “Юкспор” - 910 м нум.
7. Горно-лавиная станция “Расвумчорр” - 1052 м нум.
8. Горно-лавиная станция “Расвумчорр - цирк” - 740 м нум.
9. Горно-лавиная станция “Центральная” - 1050 м нум.
10. Горно-лавиная станция “Коавша” - 310 м нум.
11. Горно-лавиная станция “УДО-1” - 378 м нум.
12. Горно-лавиная станция “Кировск-2” 400 м нум.
13. Горно-лавиная станция “Восточная” 210 м нум.

Таблица 1. - Среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха в Хибинах для различных мест измерений (Зюзин, 2006).

Станция	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Год
Центральная	-13,2	-13,3	-11,1	-8,1	-2,9	3,6	7,4	5,2	0,3	-5,2	-9,2	-11,7	-4,9
Юкспор	-12,2	-12,6	-10,9	-6,9	-1,9	4,8	9	7,2	1,5	-4,1	-7,7	-10,5	-3,7
Кировск-2	-10,5	-10	-6,3	-2,4	2,6	9,8	13,2	10,5	5,8	-0,3	-6,1	-8,7	-0,2
Коавша	-11,2	-12	-7,7	-3,1	2,6	8,5	12,2	8,9	5,3	-0,4	-5,9	-9,2	-1
Кировск-1	-11,1	-11,8	-9,3	-3,1	2,1	9,6	13,2	11,4	5,9	-0,4	-4,6	-8,3	-0,5
УДО-1	-12,3	-11,6	-7,9	-4	1,5	8,7	12,5	9,6	5,1	-1,2	-7	-10,2	-1,4
Восточная	-11,2	-10,2	-6,4	-2,2	3,3	10,4	13,9	11,5	6,2	0,3	-6,4	-8,9	0
Апатитовая гора	-10,4	-11,4	-9,2	-3,1	2,1	9,1	13,2	11,3	5,2	-0,6	-4,6	-8,2	-0,6
Апатиты	-13	-13,9	-10,3	-2,8	3,3	10,7	13,9	12,3	6,6	0,4	-4,4	-9	-0,5
Хибины, горная	-10,1	-12	-10,5	-5,2	-0,5	5,7	10,5	9,1	2,1	-2,6	-5,7	-8,1	-2,3
Хибины	-12,2	-12,7	-9,2	-2,4	3	9,5	13,7	11,9	6,6	0,5	-5,1	-9,5	-0,5

В отдельные дни распределения температуры воздуха могут нарушаться фёнами и температурными инверсиями при антициклональной погоде. При положительной температуре воздуха происходит образование влажного и мокрого снега. При отрицательной, могут возникнуть ледяные корки, В связи с интенсивной циклонической деятельностью над Кольским полуостровом, и динамической конвекцией, обусловленной горным рельефом, в Хибинах выпадает значительно больше осадков, чем на соседних равнинах. В таблице 2 представлены среднемесячные суммы в Хибинах по различным станциям (Зюзин, 2006).

Таблица 2. - Среднемесячные и среднегодовые суммы осадков в Хибинах по различным участка наблюдений

Станция	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Год
Апатит. гора	62	52	52	62	55	80	76	92	117	101	92	79	920
Юкспор	77	62	62	72	67	87	91	116	142	111	112	94	1093
УДО-1	61	52	52	53	64	73	99	108	158	117	89	75	1001
Центральная	109	85	93	92	83	102	126	146	191	177	140	117	1461
Восточная	65	70	69	49	49	57	88	68	73	101	83	77	849
Кировск-2	70	68	67	51	54	62	90	81	82	113	94	77	909
Апатиты	43	36	32	34	38	52	65	69	60	57	54	47	587
Коашва	70	52	72	56	58	81	90	128	153	115	99	66	1040
Кировск-1	77	72	62	57	63	68	78	85	92	96	95	80	928
Хибиньы	42	38	36	40	45	57	66	71	67	65	63	50	640

Осадки являются источником снега в Хибинах. Ветры в Хибинах достаточно сильны и порывисты. В таблице 3 (Зюзин, 2006) представлены среднемесячные и среднегодовые скорости ветра в Хибинах по различным участкам измерений.

Таблица 3. - Среднемесячные и среднегодовые скорости ветра в Хибинах по различным участка наблюдений

Станция	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Год
Центральная	7,1	7,1	6,3	6	5,2	4,8	4,7	4,9	5,8	6,7	6,6	6,9	6
Юкспор	5,6	5,5	5,3	5,3	4,7	4,4	4,2	4,4	5,1	5,3	5,4	5,5	5
Кировск-2	3,3	3,4	3,4	3,1	3,3	3,1	2,9	2,7	2,8	3,4	3,2	3,3	3,1

Кировск-1	3,8	3,3	3,8	3,6	3,5	3,7	3,4	3	3,3	3,5	3,5	3,3	3,5
Восточная	1,6	1,5	1,7	1,7	1,8	2,2	1,9	1,2	1,6	1,6	1,4	1,4	1,6
Апатитовая гора	3,4	3,4	3,5	3,4	3,2	3,5	3,3	3	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3
УДО-1	3	2,9	2,6	2,7	2,3	2,4	2,5	2,3	2,6	3	3	3,1	2,7
Апатиты	3,5	3,4	3,6	4	4,1	4,3	3,7	3,5	3,9	4,1	3,8	3,7	3,8
Коавша	2,7	2,5	2,7	2,5	2,3	2,3	2,2	2,2	2,3	2,5	2,9	3	2,5
Хибины	3,7	3,9	3,8	4	4,1	4,4	4	3,9	4,2	3,8	3,8	3,9	4

Ветер создает условия для метелевого переноса снега, который в свою очередь способствует образованию значительной части лавин в Хибинах (более 70% лавин в Хибинах генетически связаны с метелями). Средняя продолжительность одной метели в Хибинах составляет 14 - 16 часов, максимальная может превышать 10 суток. Наиболее длительная продолжительность метелевых явлений наблюдается в зимние месяцы (К примеру, на г. Юкспорр средняя продолжительность метелевых явлений в феврале составляет 365 часов) (Зюзин, 2006).

Максимальная относительная влажность в Хибинах наблюдается в осенние и зимние месяцы. На вершинах гор в этот период среднемесячная относительная влажность составляет 92 - 95%, в долинах - 85 - 89%. В летние месяцы года среднемесячная влажность понижается до 78 - 84%, в долинах - до 64 - 65%. При поступлении сухого континентального воздуха и во время антициклональных фёнов относительная влажность может падать до 10 - 15%. Высокая влажность может приводить к отложению зернистой и кристаллической изморози на поверхности снега, из которых впоследствии может сформироваться ослабленный горизонт, по которому могут сойти лавины. Поступление коротковолновой солнечной радиации на снежный покров приводит к повышению температуры в верхних слоях снега и иногда к их таянию (Зюзин, 2006).

1.3. Растительность

Хибинские горы располагаются в северной таежной зоне. Для них характерна смена высотных поясов растительного покрова: лесной пояс сменяется переходным поясом березового криволесья, а затем поясом горной тундры. Характер растительных поясов определяется целым рядом факторов. Это - климатические условия, рельеф, характер грунтов. Пояс хвойных и смешанных лесов располагается на дне долин, в предгорьях, и не поднимается выше 470 м над уровнем моря. Лесной пояс в Хибинах занимает почти третью часть массива. Пояс субальпийских березняков (березовое криволесье) занимает узкую полосу (около 150 м по вертикали) между лесным поясом и тундрой. Верхняя граница этого пояса колеблется от 450 до 600 м. Площадь, занимаемая субальпийскими березняками, составляет около 6% площади гор. Свыше 50% площади Хибинского массива занято ландшафтами горных тундр. Горно-тундровый пояс начинается занимает верхние участки горных склонов, плато, днища цирков. Для нижней части пояса характерно наличие растительного покрова, верхняя часть каменистая, растительностью покрыт лишь крайне небольшой процент площади. Снежный покров, снежники и лавины играют важную роль в характере распределения растительности в Хибинах. Медленное сползание снежного покрова на склонах приводит к саблевидной форме и изогнутости стволов у берез. Под защитой снежной толщи формируются своеобразные формы древесной растительности: стелющиеся формы и ели в «юбках», когда нижняя часть кроны очень густая и начинается прямо от самой земли (Рябцева, 1975).

1.4. Снежный покров

Длительный холодный период, большое количество осадков, и интенсивная метелевая деятельность являются причиной крайне неравномерного распределения снежного покрова в Хибинах. В резких понижениях толщина снега может достигать 10 - 15 метров, а располагающиеся рядом возвышенности могут быть оголены от снега всю зиму из-за сильных ветров (Зюзин, 2006). Обычно устойчивый снежный покров в

Хибины образуются в начале октября. Продолжительность залегания постоянного снежного покрова на вершинах Хибин в основном зависит от мощности образовавшегося в холодный период снежного покрова, температуры воздуха, и количества жидких осадков, выпадающих в летний период, и составляет в среднем 240 - 280 дней. В начальный период формирования снежного покрова в Хибины, снег оседает на неровных поверхностях с низкой и редкой растительностью (Зюзин, 2006; Мягков, 1967). При выпадении снежных осадков в безветренную погоду, снег покрывает поверхность склонов однородным слоем, независимо от микрорельефа. Плотность сухого снега составляет до 100 кг/м^3 , влажного - до 200 кг/м^3 , и мокрого - до 300 кг/м^3 . С увеличением скорости ветра до 6 метров в секунду, и более, начинается перенос снега - заполняются выемки, появляются отложения на подветренных участках. Открытые участки в свою очередь обнажаются. В итоге происходит сглаживание микрорельефа, и создаются наиболее благоприятные условия для метелевого переноса и формирования полей снежного покрова на склонах гор.

В процессе метелевого переноса снежинки распадаются на части. Снежинки упаковываются более компактно, образуя слои метелевого снега плотностью до 300 кг/м^3 и более, формирующие лавины из снежной доски. Отложенный во время метели или снегопада слой снега уплотняется под воздействием собственного веса, и подвергается процессам перекристаллизации. В процессе перекристаллизации (конструктивного метаморфизма) уменьшается число кристаллов благодаря росту более крупных из них, за счет сокращения объема или даже полного исчезновения более мелких (Зюзин, 2006).

При последующих снегопадах и метелях формируются новые слои снежного покрова, оказывающие воздействие на ранее сформированные, и в свою очередь сами постоянно изменяются. В процессе формирования покрова может происходить образование ледяных корок, слоев глубинной изморози, и слоев с различной прочностью и структурой снега. Формирование ослабленных слоев в структуре снежной толщи приводит к образованию лавин (Зюзин, 2006; Черноус и др., 2015). Во время вторжения холодного арктического воздуха снег на вершинах Хибин может выпадать в любое время года, однако устойчивого снежного покрова в июле - августа не образуется. В таблице 4. (Зюзин, 2006) представлены среднемесячные высоты снежного покрова в Хибины в см для различных участков (характеристика участков представлена в п.1.2.).

Таблица 4. – средние многолетние высоты снежного покрова в Хибинах (см)

Станция	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Центральная	97	105	115	127	114	38	0	0	4	24	61	86
Юкспорр	104	117	126	140	128	59	0	0	4	19	48	81
Кировск-2	56	69	83	83	37	1	0	0	0	3	22	43
Кировск-1	85	103	111	111	43	1	0	0	0	6	26	62
Восточная	81	103	124	105	31	0	0	0	0	6	31	60
Апатитовая гора	86	104	116	120	56	4	0	0	0	7	24	57
УДО-1	108	122	136	147	89	8	0	0	1	11	45	81
Апатиты	37	48	55	52	12	0	0	0	0	1	9	25
Коавша	57	71	82	116	43	0	0	0	0	6	27	41
Хибиньы	34	45	53	46	9	0	0	0	0	1	9	21

1.5. Лавины

Пришедшие в движение низвергающиеся скользящие снежные массы на склоне называются снежными лавинами. Большая часть территории Хибин относится к районам со значительной лавинной опасностью. В естественных условиях они могут возникать при нарушении устойчивости снежного покрова на склоне, под влиянием различных факторов - процессов метаморфизма, метеорологических условий, антропогенного вмешательства. Большинство лавин сходит со склонов крутизной 30-45°, но многие – со склонов крутизной 20-30° (Божинский, 1987; Зюзин, 2006). Количество дней с лавинами разного рода, по данным противолавинной службы компании «Апатит», составляет в среднем 44 при колебаниях от года к году в пределах 22-71. Среднее число дней с лавинами, вызванными снегопадами и метелями, приблизительно равно 35. Максимальное число лавин приходится на январь и начало февраля, что обусловлено быстрым накоплением снега в эти месяцы. Затем, несмотря на продолжающееся снегонакопление, повторяемость лавин несколько снижается и вновь возрастает в апреле за счет оттепелей.

Всего в Хибинах существует 3 лавинных службы - одна муниципальная, и две принадлежащих горно - добывающим предприятиям. На территориях, контролируемых лавинными службами, в год сходит до 300 лавин. Наибольший объем лавины, зафиксированный в Хибинах - около 600 тыс. м³, максимальное измеренное ударное давление лавины – 5,88 мПа, а измеренная скорость - 51 м/с. Дальность выброса лавин в Хибинах широко варьируется - от нескольких десятков метров до 1,5 км. Отдельно стоит упомянуть про снежно - воздушную волну, сопровождающую сход текучих лавин. Снежно - воздушной волной принято называть облако снежной пыли, сопровождающее скоростные сухие лавины, и которое может вызывать разрушения вне зоны отложения основной массы лавинного снега. Образование воздушной волны объясняется сжатием и вытеснением воздуха перед фронтомдвигающейся лавины. Разрушительный путь волны может достигать 200 - 300 метров. С данным явлением связано несколько несчастных случаев, произошедших в Хибинах (Зюзин, 2006).

Основные принятые классификации снежных лавин — это генетическая и морфологическая классификация. Морфологическая классификация лавин — это система классификации лавин, основанная на их форме и характеристиках. Генетическая классификация лавин — это система классификации лавин, основанная на механизмах их образования. морфологическая и генетическая классификации лавин представлены в приложения 3 и 4 соответственно (Зюзин, 2006).

Лавинный очаг - это место, где начинается образование лавины. Обычно это место на склоне горы, где накопилось достаточное количество снега, чтобы образовать лавину. Очаги снежных лавин занимают около 15% площади Хибин и около 25% площади склонов. В среднем в Хибинах на один погонный километр склона любой экспозиции приходится 0,8-0,9 лавинных очага. На рисунке 4 представлена карта лавинных очагов в окрестностях города Кировск. Основной тип лавинных очагов в Хибинах - денудационные воронки; они составляют 80% от числа всех очагов (денудационные воронки на склонах горы Юкспор). Ширина таких воронок варьируется в пределах от 150 до 600 м, чаще всего составляя 200-300 м. Площадь в среднем составляет 6-8 га. Другими типами лавинных очагов в Хибинах являются слабо преобразованные тектонические трещины и нивационные воронки по периметру крупных цирков (шириной 75-125, редко - до 200м); а также кары и цирки, срабатывающие как один очаг (ширина 450-950 м) (Божинский и др., 1987; Аккуратов, 1973).

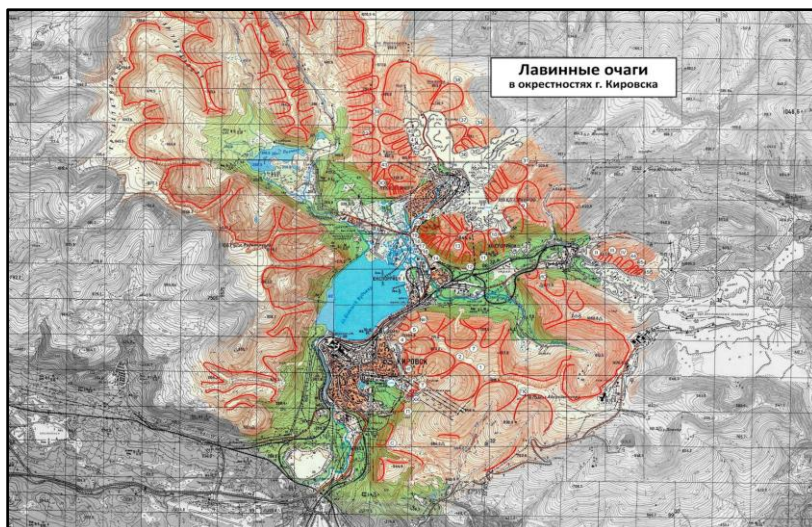


Рисунок 4. - Карта лавинных очагов в окрестностях города Кировска

Распределение лавин по долинам и между долинами неравномерно и зависит от абсолютных и относительных высот склонов, особенностей морфологии и морфометрии рельефа, а также растительного покрова. Наиболее сильно густота сети меняется в долинах, что связано с дробным расчленением склонов, примыкающих к долинам (Зюзин, 2006).

2. Методика работы

2.1 Полевые измерения

Исследуемые участки были пронумерованы от №1 до №5 (рис. 5) (интернет – источник: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/>). На участках №1 - №3 измерения были проведены в феврале 2023 года. Измерения на участках №4 и №5 - были проведены ранее и их результаты были любезно предоставлены работниками Хибинских противолавинных служб.

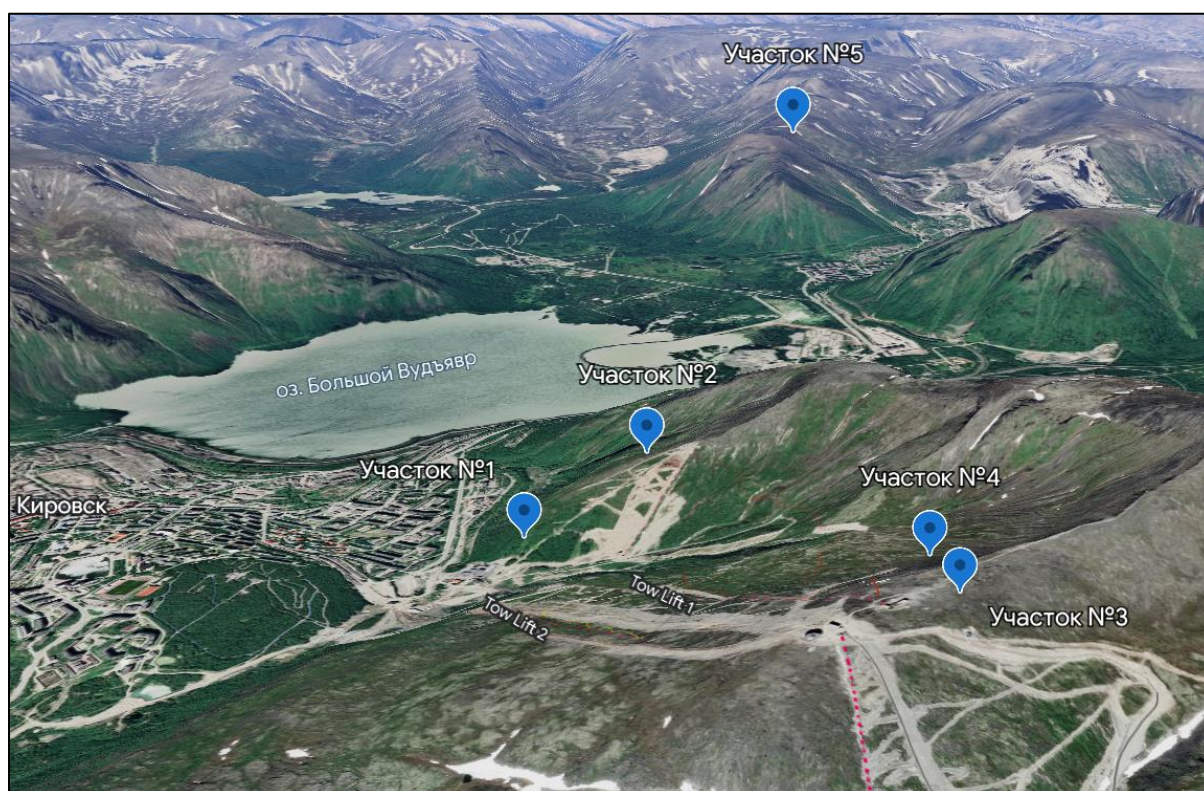


Рисунок 5. - Расположение исследуемых участков

Профили также были пронумерованы от 1 до 22. На участке №1 всего было проложено 4 профиля, на участке №2 - также 4 профиля, на участке №3 - 5 профилей, на участке №4 - 6 профилей, на участке №5 - 2 профиля. Все измерения проводились с шагом 1 метр. В таблице 5 представлена характеристика каждого исследуемого участка, в частности качественное описание подстилающей поверхности, высота нум., номера профилей, угол склона, и экспозиция.

Таблица 5. - Характеристика участков измерений

Уч.	Качественное описание подстилающей поверхности	Высота над уровнем моря	Профили	Угол склона	Экспозиция
№1	На участке был выкорчеван лес для строительства подъемника. Поверхность представляет собой рытвины глубиной несколько десятков сантиметров. Присутствуют редкие кустарники, небольшие насыпи грунта, оставленные техникой.	430 - 480 метров	№1 - №5	21 - 22 градуса	Южная
№2	Для участка №2 характерны гладкие скальные поверхности, покрытые мхом, присутствуют небольшие осыпи мелкого щебня естественного происхождения.	580 - 605 метров	№6 - №10	18 - 19 градусов	Юго - западная
№3	На склоне присутствуют достаточно резкие скальные выступы, большое количество различных каменных глыб с линейным размером до 1 метра.	770 - 840 метров	№11 - №14	22 - 23 градуса	Юго - восточная
№4	Сверху профиля - гладкая скальная поверхность с мелким обломочным материалом, снизу - мелкий и средний обломочный материал	700 - 800 метров	№ 15 - №20	17 - 18 градусов	Северо - западная
№5	Скальная поверхность, местами покрытая мхом	640 - 655 метров	№22	23 -24 градуса	Восточная

Ниже представлено более детальное описание каждого участка и профиля с фотографиями, где проводились измерения в феврале 2023 г. На рисунке №6, на первом участке измерения были выполнены исключительно в профилях, направленных вдоль линии падения склона. В связи с относительно небольшой шириной просеки, было принято решение не проводить измерения в горизонтальных профилях. Профиль №1 и №2 в действительности представляют из себя один длинный профиль, который был разделен на два небольших для более подробного исследования пространственной изменчивости высоты снежного покрова.

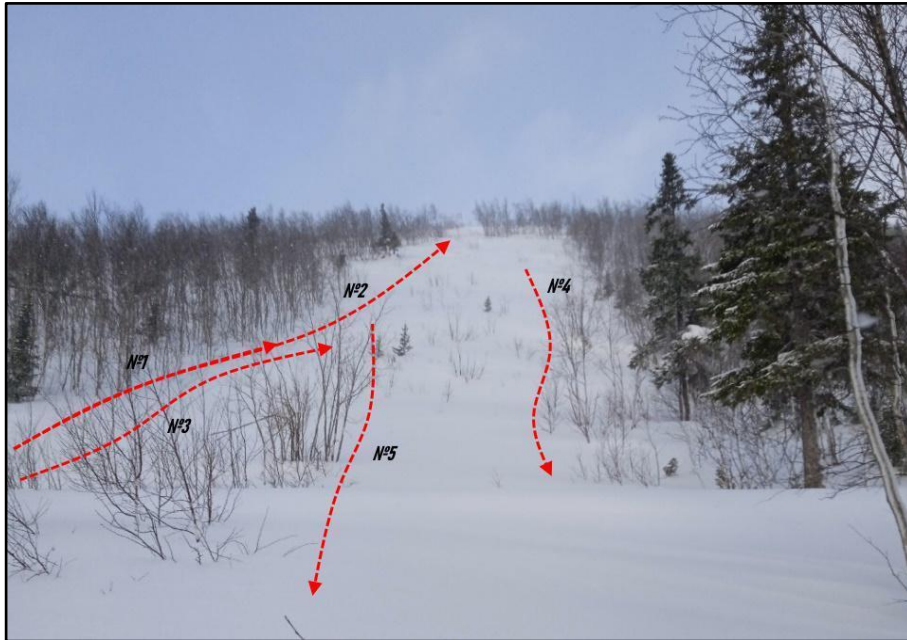


Рисунок 6. - Снегомерные профили на участке №1

На рисунке 7 представлен второй исследуемый участок, включающий в себя профили № 6 - №10. Профили №9 и №10 представляют из себя разделенный на две части один большой профиль, также профили, как и №6 и №7. Профиль №9 является горизонтальным. Профили №6, №7 и №8 - вертикальные.



Рисунок 7. - Снегомерные профили на участке №2

Рисунок 8 демонстрирует участок №3. Профиль №11 был проложен на склоне по диагонали, снизу вверх. Профиль №14 является горизонтальным, и расположен

перпендикулярно линии падения склона. Профили №12 и №13 являются вертикальными, пересекают профили № 11 и №14, проходят на расстоянии порядка двух десятков метров друг от друга. №12 проложен сверху вниз, №13 - снизу вверх.

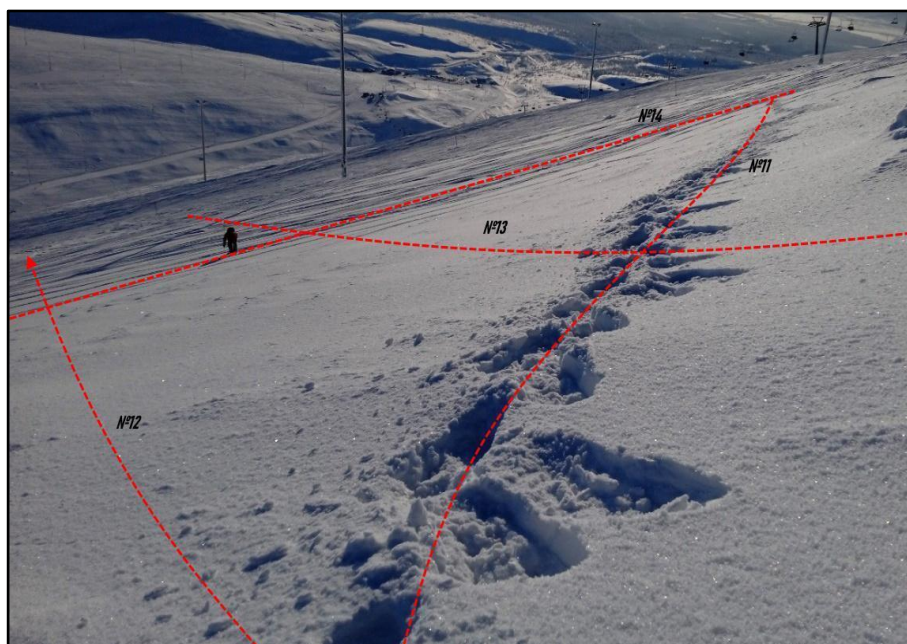


Рисунок 8. - Снегомерные профили на участке №3

2.2 Обработка данных

В процессе обработке данных были построены пространственные автокорреляционные функции, получены основные характеристики описательной статистики (средние значения, стандартные отклонения, коэффициенты вариации и др.). Пространственная автокорреляционная функция характеризует статистическую связь распределенных в пространстве величин высоты снежного покрова в зависимости от расстояния между точками измерений (связность поля характеристики) оценивается с помощью автокорреляционной функции (Казакевич, 1997; Жуковский, 1978). Оценкой автокорреляционной функции $r_k(l)$ был ряд значений коэффициентов автокорреляции, вычисленный по данным измерений в профилях, при помощи следующего выражения (1.0):

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (h_t - h) (h_{t+k} - h)}{\sum_{t=1}^n (h_t - h)^2} \quad (1.0)$$

где r_k - коэффициент автокорреляции, h - высота/толщина снежного покрова, t = шаг, n - общее кол-во членов ряда (количество измерений в профиле), k - целое число от 1 до $n - 1$, $l=kI(M)$. Для вычисления ошибок интерполяции замены средней интегральной высоты по площади средним арифметическим из точечных измерений, и их зависимости от площади и количества измерений, а также ошибки замены математического ожидания высоты снежного покрова средним арифметическим из точечных измерений, ее зависимость от кол-ва измерений были использованы ранее полученные зависимости (Черноус, 2019).

Ошибка линейной интерполяции (Дроздов, Шепелевский, 1946) характеризуется средним квадратическим отклонением результата интерполяции от истинной величины. Ниже представлены зависимости (1.1 - 1.3) относительной ошибки линейной интерполяции на середину отрезка между измерениями, по которым велись расчёты:

$$\varepsilon_h^2(l) = 1,5 - 2r_h(0,5l) + 0,5r_h(l) + 0,5\eta_h^2 \quad (1.1)$$

$$\eta_h = \frac{\Delta_h}{\sigma_h} \quad (1.2)$$

$$\text{где } \varepsilon_h = \frac{E_h}{\sigma_h} \quad (1.3)$$

где: ε_h - относительная ошибка интерполяции, $r_h(l)$ - значение автокорреляционной функции, η_h - относительная ошибка метода измерений, Δ_h - стандартное отклонение ошибки измерений, σ_h - стандартное отклонение поля высоты снежного покрова. Часто для оценки снегонакопления в лавинном очаге и связанного с ним прогнозом лавинной опасности нужна информация о характеристике снега h , относящаяся не к отдельным точкам, а ко всей его площади S или некоторой ее части. Таким образом, необходимо оценить среднее интегральное значение (1.4):

$$h_S = \frac{1}{S} \int \int (s) h(x, y) dx dy \quad (1.4)$$

где $h(x, y)$ – истинное значение характеристики h в точке лавинного очага или некоторой его части S с координатами x и y . Обычно за оценку среднего интегрального значения принимается среднее арифметическое (1.5):

$$\underline{h'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h'_i \quad (1.5)$$

где: h_i - измеренное значение характеристики h в точке i , n - количество точек, в которых произведены измерения. Здесь и дальше горизонтальная черта над символом или выражением означает операцию осреднения. В качестве оценки точности замены среднего интегрального значения средним арифметическим используются величины абсолютной (1.6) и относительной ошибок (1.7) такой замены:

$$\underline{\beta}_h^2 = \frac{(\underline{h} - h_s)^2}{n} \quad (1.6)$$

$$\gamma_h^2 = \frac{\beta_h^2}{\sigma_h^2} \quad (1.7)$$

Для случая, когда рассматриваемое случайное поле является однородным и изотропным, а погрешности измерений случайны, аддитивны и не коррелированы с измеряемой величиной можно рассчитать величину γ_h для произвольной конфигурации измерительной сети. Для случая, когда площадь S разбита на n равновеликих квадратов, в центрах которых проводятся измерения, а поля характеристики h описываются степенной или экспоненциальной корреляционными функциями, имеются готовые решения для определения γ_h . В настоящей работе приведены оценки ошибки для случая аппроксимации экспоненциальными функциями. Ошибка определяется следующим соотношением (1.8):

$$\gamma_h^2(n) = \frac{\eta_h^2}{n} + \frac{1}{n} C_2\left(\frac{a}{l_0}\right) \quad (1.8)$$

где η_h^2 - ошибка измерений, n - общее кол-во точек измерений, $l_0 = 1/b$, где b коэффициент экспоненциальной функции вида $r(l) = a * \exp(-b * l)$, $a = S/n$, где S - площадь участка. Функция $C_2\left(\frac{a}{l_0}\right)$ задана в табличном виде (таблица 6):

Таблица 6. - Зависимость $C_2\left(\frac{a}{l_0}\right)$

C_2	0	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3	4
$\frac{a}{l_0}$	0	0,06	0,12	0,17	0,23	0,34	0,43	0,5	0,57	0,68

В определенных задачах, к примеру, при статистическом моделировании неустойчивых стояний снега (Chernous, Fedorenko, 1997; Божинский, Черноус, 2005), вместо математического ожидания m_h , характеристики h , используется среднее арифметическое - \underline{h}' , полученное по данным измерений в n произвольных точках поля.

В качестве характеристики надежности подобной оценки можно использовать представленную ниже формулу (1.9), подходящую для несвязанных рядов:

$$\lambda_h^2 = \frac{\theta_h^2}{\sigma_h^2} = \frac{l + \eta_h^2}{n} \quad (1.9)$$

где n - общее количество измерений, η_h - погрешность измерения, σ_h - стандартное отклонение, θ_h - стандартное отклонение ошибки определения мат. ожидания. Для случая измерений в профиле, с равномерно распределенными n точками измерений, при наличии корреляции между величинами h , λ_h определяется следующим выражением (2.0):

$$\lambda_h = \frac{l}{nr(0)} [1 + 2\sum_{k=l}^{n-l} (1 - \frac{k}{n}) r_v(ak)] \quad (2.0)$$

где: k - переменная суммирования, n - общее кол-во точек, $r(0)$ - значение эмпирической автокорреляционной функции при $l = 0$, r_v - эмпирическая автокорреляционная функция, $a = L/(n-1)$, L - длина профиля исследуемого профиля высоты снежного покрова.

3. Результаты исследования и их анализ

Для анализа были использованы результаты 1271 измерений высоты снега (и в отдельных случаях толщины) в 22 профилях. Обработка и визуализация результатов измерений проводилась в специализированной программ StatGraphics и Microsoft Excel. На рисунке 9 представлены автокорреляционные функции для высоты и толщины снежного покрова, для участков №1 (а) (проф.1 - выс., проф.3 - толщ) и №5 (b) (проф 21. – выс., проф 22. - толщ). Как можно заметить автокорреляционные функции для высоты и толщины снега отличаются между собой незначительно.

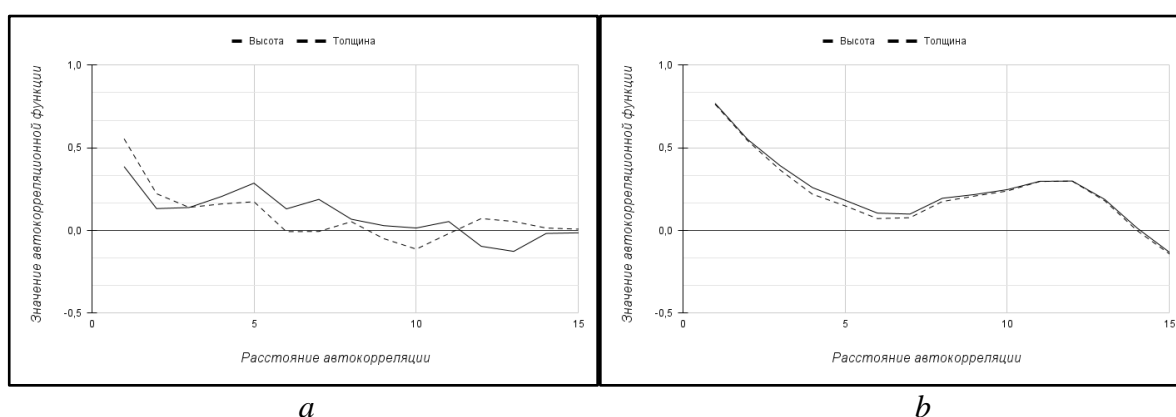


Рисунок 9. - Автокорреляционные функции для высоты и толщины снежного покрова для участка №1 (а) и №5 (b).

Ниже, на Рисунке 10, представлены осредненные автокорреляционные функции для участков №2 (а) и №3 (b) а также коэффициенты детерминации для аппроксимации каждой функции (R). Автокорреляционные функции были осреднены в связи с тем, что вычисленные по измерениям в отдельных профилях, они имеют плохую статистическую обеспеченность на расстояниях, превышающих несколько метров. В целом коэффициенты автокорреляции для участка №2 выше, что связано с более гладким и однородным подстилающим рельефом. Представленные автокорреляционные функции так же подтверждают высокую пространственную изменчивость высоты снежного покрова в Хибинах, отмеченную в предыдущих исследованиях (Черноус и др., 2018). Осредненные автокорреляционные функции хорошо аппроксимируются экспоненциальными функциями вида $r(l) = a * \exp(-b * l)$. Отличие $r(0)$ от 1 объясняется ошибками измерений.

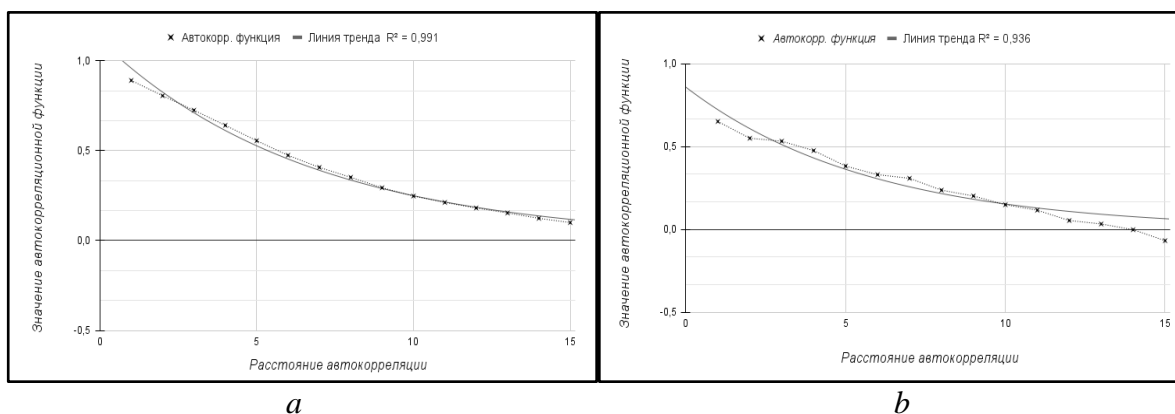


Рисунок 10. - Осредненные автокорреляционные функции для высоты снежного покрова по участку №2 (а) и №3 (б)

Радиусы корреляции для такого вида функций $R = 1/b$, характеризующие связность полей с экспоненциальной корреляционной функцией получены для всех участков (табл. 7).

Таблица 7. - Радиусы корреляции

Участок	№1	№2	№3	№4 (п. 15 - 17)	№4 (п. 18 - 20)	№5
Радиус автокорр.	3,3	6,7	5,8	3,1	4,5	3,7

Очевидно, что радиусы корреляции уменьшаются с увеличением неоднородности подстилающей поверхности. Оценки автокорреляционных функций, полученные ранее в Хибинах и других регионах очень сходны, по форме и мало отличаются радиусами корреляции. Хотя они были выполнены в большом диапазоне средних высот снежного покрова (0,4 от до 1,6 м) и коэффициентов вариации (Черноус, Христов, 1996; Черноус и др, 2018). Автокорреляционные функции, полученные для одинаковых подстилающих поверхностях на склонах горы Улав (Шпицберген) (Черноус и др., 2018) и в Хибинах имеют практически одинаковые радиусы корреляции.

На рисунке 11 представлена зависимость ошибки линейной интерполяции (Дроздов, Шепелевский, 1946) от расстояния между точками измерений. Анализируя данную зависимость, можно прийти к выводу, что существующие методы измерений высоты снежного покрова в лавинных очагах имеют очень низкую точность. Для существующих стандартных отклонений пространственных распределений высоты снежного покрова, наблюдаемых в Хибинах, ошибки интерполяции очень велики, что делает невозможным их использование в детерминированных моделях механической устойчивости (Chernous, Fedorenko, 1997; Божинский, Черноус, 2005). В целом количественные оценки измерений могут привести к грубым ошибкам. Вполне вероятно

достаточное для схода лавин снегонакопления между точками измерений, которое не будет отражено в результате интерполяции. Например, для достижения абсолютной ошибки интерполяции не превышающей σ_h , расстояния между снегомерными рейками в лавинных очагах должно быть от 3 м до 7,5 м, и это без учета ошибок измерений (рис. 11). Кстати, на малых расстояниях между точками измерений ошибка интерполяции определяется в большей степени ошибками измерений. Конечно, устанавливать сотни и даже тысячи снегомерных реек в одном лавинном очаге для достижения такой точности, нереально. Для измерений можно использовать другие методы. Например, фотограмметрическую съемку или лазерное сканирование.

Учитывая высокие значения σ_h в Хибинах (до 0,6 м), высота снега, определенная с помощью интерполяции, может иметь такую же ошибку. Если изменение высоты снежного покрова определяется, как разность последовательных отсчетов по снегомерным рейкам, то ошибка определения изменения высоты с помощью интерполяции, даже на столь малых расстояниях между точками измерения, может достигать 1 м. Для возникновения лавины из верхнего слоя снега достаточно его высоты 0,2 – 0,3 м.

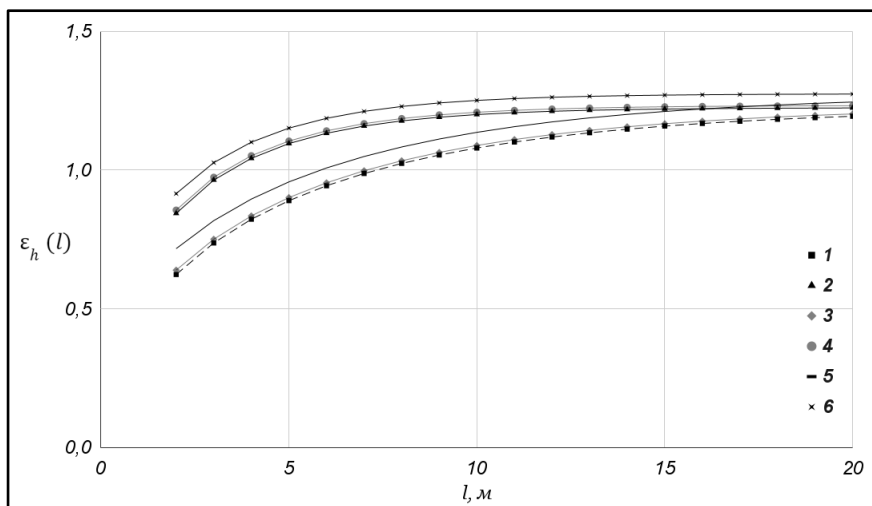


Рисунок 11. - Зависимость ошибки линейной интерполяции от расстояния между точками измерений. 1) $\eta = 0$ (Уч.№2); 2) $\eta = 0$ (Уч.№4, п.15-17); 3) $\eta = 0,2$ (Уч.№2); 4) $\eta = 0,2$ (Уч.№4, п.15-17); 5) $\eta = 0,5$ (Уч.№2); 6) $\eta = 0,5$ (Уч.№4, п.15 - 17).

На рисунке 12 представлен пример расчёта ошибки замены среднего интегрального значения по площади $S = 1000 \text{ м}^2$ средним арифметическим измерений в n точках, расположенных в центрах n равновеликих квадратов, на которые разбита вся площадь S , для полей с автокорреляционными функциями, полученными для участков

№2 и №4 (15 - 17 профиль). В случае с участком №2 где, подстилающая поверхность более гладкая, ошибка меньше.

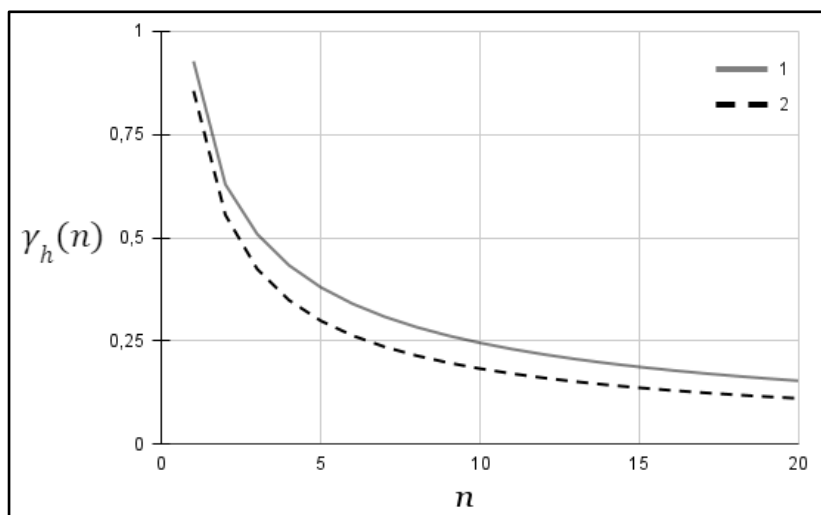


Рисунок 12. - Ошибка замены интегрального средним арифметическим для площади.

1. - Для участка №2; 2. Для участка №4 (15 - 17 профили)

На рисунке 13 демонстрируется зависимость ошибки замены математического ожидания средним арифметическим от количества точечных измерений. Анализируя данную зависимость, и принимая во внимание то, что на один лавинный очаг в Хибинах приходится обычно лишь несколько снегомерных реек, можно сделать вывод, что ошибка будет очень высокой.

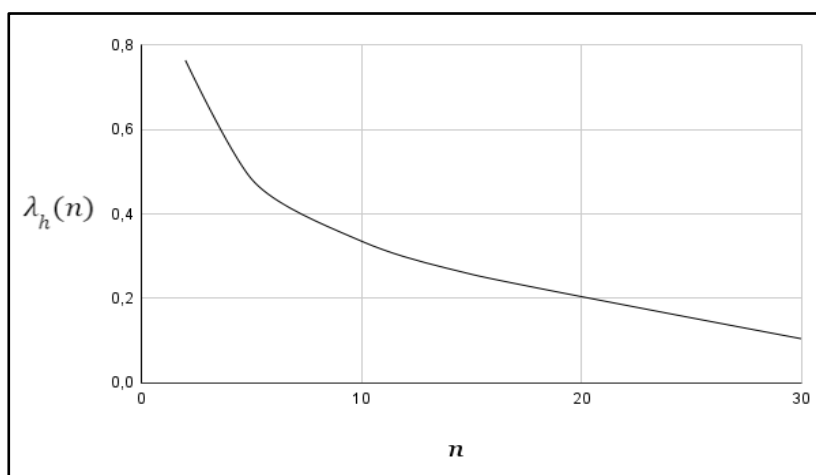


Рисунок 13. - Зависимость ошибки замены математического ожидания средним арифметическим от количества точечных измерений.

Подводя итоги анализа, можно сказать, что изменчивость высоты снежного покрова в Хибинах очень велика, и не позволяет объективно судить о снегонакоплении. Лавинные сети в лавинных формировались стихийно, и их размещение не имеет по собой рациональной основы (Черноус, 2019). Какие - либо оценки снегонакопления в этих сетях могут проводится либо в вероятностной форме, либо субъективно. Некоторые результаты также представлены в приложениях, в частности, в Приложении 1 - коэффициенты автокорреляции и их стандартные ошибки каждого из исследованных профилей, в приложении 2 - основные параметры описательной статистики для каждого из исследованных профилей.

Заключение

Полученные значения осредненных по участкам пространственных автокорреляционных функций, которые характеризуют связность поля высоты снежного покрова, достаточно близки к аналогичным немногочисленным ранее полученным в Хибинах и горах Шпицбергена оценкам. Все осредненные корреляционные функции хорошо описываются экспоненциальными зависимостями с различными радиусами корреляции.

Наименьшую связность имеют поля высоты снега на участках с наибольшей неоднородностью микрорельефа подстилающей поверхности, а также расположенные в местах с интенсивным метелевым перераспределением снега. Имеющихся данных пока недостаточно для создания универсальной классификации параметров пространственной статистической структуры, охватывающей все типы микрорельефа подстилающей поверхности и метеорологических условий формирования снежного покрова. Полученные результаты будут способствовать созданию такой классификации. Оценки параметров пространственной статистической структуры уже сейчас могут использоваться в вероятностных методиках определения механической устойчивости снежного покрова на склоне с использованием статистического моделирования (Chernous, Fedorenko, 1997; Божинский, Черноус, 2005), а также для рационального размещения снегомерных сетей в лавинных очагах, предназначенных для оценки лавинной опасности. Такие сети повсеместно формировались субъективно и каких-либо нормативных документов, учитывающих пространственную изменчивость высоты снежного покрова в лавинных очагах, не существует.

В работе представлены различные критерии точности характеристик высоты снежного покрова, получаемых на основании точечных измерений в лавинных очагах, и позволяющие размещать снегомерные сети на рациональной основе. Приведенные расчеты показывают очень низкую информативность существующих снегомерных сетей в Хибинских лавинных очагах и необходимость их замены на более эффективные.

Было проведено сравнение параметров связности полей высоты и толщины снежного покрова. Поскольку ранее выполненные исследования касались как высоты, так и толщины снежного покрова, это сравнение было необходимо для оценки возможности их совместного использования. Эмпирические автокорреляционные функции показали большое сходство.

Благодарности

Автор выражает крайнюю благодарность работникам муниципальной лавинной службы города Кировск А.В. Волкову и М.А. Рябчикову за представленные данные измерений высоты и толщины снежного покрова.

Приложение №1. - Список использованной литературы

1. Божинский, Александр Николаевич. Основы лавиноведения / А. Н. Божинский, К. С. Лосев. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. - 279, с. 22.
2. Боброва Д. А., Казакова Е. Н., Казаков Н. А. Опасные" нелавинноопасные" склоны //Природа. – 2019. – №. 8. – С. 44-53.
3. Практическое пособие по прогнозированию лавинной опасности - Л.: Гидрометеиздат, 1979, 200 с.
4. Руководство по снеголавинным работам (временное) – Л.: Гидрометеиздат, 1965, 398 с.
5. Chernous P.A., Fedorenko Yu.V. 1997. The stochastic model of snow cover stability on mountain slopes. Proceedings of the International Snow Science Workshop, 6-10 October 1996, Banff, Alberta. Revelstoke, B.C., Canadian Avalanche Association, 104-106.
6. Божинский А.Н., Черноус П.А. 2005. Статистическое моделирование напряженного состояния снежного покрова на склонах гор. МГИ, вып. 99, 13-17
7. П. А. Черноус О рационализации измерений характеристик снега для оценки его устойчивости на склоне // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. №1.
8. Черноус П.А., Осокин Н.И., Чернов Р.А. Пространственная изменчивость толщины снежного покрова на горном склоне (архипелаг Шпицберген). Лёд и Снег. 2018;58(3):353-358. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-353-358>
9. Боруцкий Б. Е. Современные представления о природе и геологической истории формирования пород Хибинского щелочного массива (Критическое сопоставление предлагавшихся гипотез и комментарии к ним) // Ред. Ю.Л. Войтеховский Уникальные геологические объекты Кольского полуострова: Хибинь. — Апатиты: К & М, 2010. — С. 7—30.
10. Зюзин Ю. Л. Суровый лик Хибин //Мурманск: Рекламная полиграфия. – 2006.
11. Аккуратов В.Н. Метеорологические условия образования лавин в Хибинах. – Материалы гляциологических исследований, 1966, №12, с. 132 - 138.

12. Рябцева, К.М. Хибины / К. М. Рябцева. – Москва: Знание, 1975. – 64 с.
13. Мягков С.М. Аккумулятивные лавинные формы рельефа в Хибинах и пути использования их характеристик для определения границ лавиноопасных зон. - В кн.: Снег и лавины Хибин. - М.: Изд-во МГУ, 1967, с. 15 - 96.
14. Черноус П.А., Селиверстов Ю.Г., Сучков В.Е. 2015. Влияние характеристик снега на лавинообразование. Лед и снег, том 55, № 2, с. 53-59.
15. Аккуратов В.Н. Снежные лавины в Хибинах: Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. - М.: Изд-во МГУ, 1973. 26 с.
16. Интернет - источник: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/>
17. Казакевич Д.И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 320 с.
18. Жуковский Е.Б., Киселева Е.Л., Мандельштам С.М. Статистический анализ случайных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 408 с
19. Черноус П.А., Христов Ю.В. Оценка точности данных о толщине снега в лавиносборах // Материалы гляциологических исследований. 1986. Вып. 55. С. 201–206.
20. Дроздов О.А., Шепелевский А.А. Теория интерполяции в стохастическом поле метеорологических элементов и ее применение к вопросам метеорологических карт и рационализации сети // Труды НИУГУГМС. 1946. Вып. 13. Серия 1. С. 65-115.

Приложение №2. – Коэффициенты автокорреляции и стандартное отклонение

Таблица 8. - Коэф автокорреляции и станд. ошибка для профилей №1 - №6

Профиль №1			Профиль №2			Профиль №3		
Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош
1	0,386354	0,142857	1	0,759422	0,128037	1	0,610198	0,118678
2	0,132319	0,162791	2	0,669122	0,187889	2	0,231824	0,156758
3	0,138728	0,164971	3	0,621628	0,223566	3	0,0158547	0,161514
4	0,205483	0,167335	4	0,574999	0,250303	4	-0,0606349	0,161536
5	0,286053	0,172407	5	0,460044	0,271093	5	-0,122389	0,161856
6	0,130508	0,181836	6	0,319713	0,283603	6	-0,193787	0,163155
7	0,188141	0,183737	7	0,310816	0,289451	7	-0,223375	0,166365
8	0,0679848	0,187628	8	0,239921	0,294872	8	-0,26123	0,170537
9	0,0292846	0,18813	9	0,142054	0,298055	9	-0,30148	0,176083
10	0,0150889	0,188223	10	0,107613	0,299162	10	-0,183822	0,183209
11	0,0541396	0,188247	11	0,0558771	0,299796	11	0,0286615	0,185788
12	-0,0955386	0,188565	12	-0,00854401	0,299967	12	0,184808	0,18585
13	-0,126216	0,18955	13	-0,0753632	0,299971	13	0,267344	0,188421
14	-0,0178356	0,191258	14	-0,0394276	0,300281	14	0,171415	0,19369
15	-0,0139676	0,191292	15	-0,0492042	0,300366	15	0,0627685	0,195815
Профиль №4			Профиль №5			Профиль №6		
Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош
1	0,422984	0,131306	1	0,520435	0,124035	1	0,784087	0,130189
2	0,132067	0,153006	2	0,368886	0,154008	2	0,568526	0,194395
3	-0,121711	0,154959	3	0,246041	0,167049	3	0,439866	0,220785
4	-0,332004	0,156599	4	0,0516948	0,172535	4	0,2881	0,23517
5	-0,438415	0,168297	5	0,0232418	0,172773	5	0,0860951	0,241078
6	-0,280545	0,186954	6	0,12058	0,172821	6	-0,0748583	0,241598
7	-0,104671	0,194077	7	0,00147863	0,17411	7	-0,119343	0,241991
8	0,14495	0,195048	8	0,0578759	0,17411	8	-0,153584	0,242987
9	0,210301	0,196896	9	-0,0629626	0,174406	9	-0,20413	0,244627
10	0,313096	0,200732	10	-0,107652	0,174756	10	-0,222461	0,247497
11	0,233518	0,208982	11	-0,0399497	0,175773	11	-0,19923	0,250863
12	0,026617	0,213434	12	-0,0255233	0,175912	12	-0,165023	0,253531
13	-0,0898484	0,213491	13	0,0578657	0,175969	13	-0,137904	0,255345
14	-0,194719	0,214142	14	0,11545	0,176262	14	-0,130439	0,256604
15	-0,217156	0,217173	15	0,0992531	0,177421	15	-0,0897291	0,257725

Таблица 9. - Коэф автокорреляции и станд. ошибка для профилей №7 - №12

Профиль №7			Профиль №8			Профиль №9		
Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош
1	0,920936	0,130189	1	0,944878	0,131306	1	0,897549	0,124035
2	0,853104	0,213773	2	0,905885	0,219151	2	0,810379	0,20043
3	0,792183	0,265273	3	0,859709	0,27627	3	0,715867	0,245721
4	0,725439	0,302726	4	0,814123	0,319079	4	0,616388	0,275947
5	0,658405	0,330881	5	0,769438	0,353081	5	0,540591	0,296373
6	0,585229	0,352388	6	0,705678	0,380895	6	0,484032	0,311174
7	0,53195	0,368493	7	0,629003	0,402806	7	0,400791	0,322549
8	0,492473	0,381286	8	0,557833	0,419399	8	0,342276	0,330122
9	0,454869	0,391919	9	0,493057	0,432002	9	0,275346	0,335537
10	0,415282	0,400767	10	0,417705	0,441598	10	0,229608	0,338996
11	0,379085	0,407996	11	0,354698	0,448359	11	0,172356	0,34138
12	0,348987	0,413922	12	0,299501	0,453171	12	0,12676	0,342716
13	0,312136	0,41888	13	0,249013	0,456571	13	0,0954499	0,343437
14	0,281827	0,422804	14	0,195065	0,458906	14	0,0632064	0,343844
15	0,233538	0,425976	15	0,142671	0,460334	15	0,0506641	0,344023
Профиль №10			Профиль №11			Профиль №12		
Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош
1	0,899032	0,124035	1	0,569936	0,124035	1	0,731631	0,127
2	0,857713	0,200634	2	0,362389	0,159309	2	0,682294	0,182746
3	0,787259	0,250779	3	0,407391	0,171523	3	0,633018	0,22003
4	0,726429	0,286287	4	0,34996	0,185814	4	0,500861	0,247668
5	0,669849	0,313364	5	0,109243	0,195691	5	0,533187	0,263499
6	0,600567	0,334669	6	0,153716	0,196627	6	0,453727	0,280361
7	0,531221	0,350858	7	0,187497	0,198468	7	0,379619	0,291964
8	0,465838	0,363021	8	0,0880807	0,201174	8	0,368402	0,29982
9	0,402439	0,372104	9	0,0674632	0,201767	9	0,293632	0,307034
10	0,352788	0,378741	10	0,0890067	0,202113	10	0,249566	0,311531
11	0,318708	0,383763	11	0,0810015	0,202716	11	0,220155	0,314739
12	0,275019	0,387813	12	0,0408932	0,203213	12	0,136852	0,317213
13	0,235665	0,390802	13	0,0531722	0,203339	13	0,076055	0,318164
14	0,19998	0,392983	14	-0,0445226	0,203553	14	0,0916459	0,318457
15	0,157998	0,394545	15	-0,0797513	0,203703	15	0,0278551	0,318882

Таблица 10. - Коэф автокорреляции и станд. ошибка для профилей №13 - №18

Профиль №13			Профиль №14			Профиль №15		
Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош
1	0,759422	0,128037	1	0,613068	0,121268	1	0,763251	0,13484
2	0,669122	0,187889	2	0,528236	0,1605	2	0,639771	0,198408
3	0,621628	0,223566	3	0,525828	0,184302	3	0,453746	0,232915
4	0,574999	0,250303	4	0,469591	0,205181	4	0,36825	0,248468
5	0,460044	0,271093	5	0,448877	0,22042	5	0,291597	0,2582
6	0,319713	0,283603	6	0,310864	0,233477	6	0,168545	0,26412
7	0,310816	0,289451	7	0,302055	0,239486	7	0,070083	0,266068
8	0,239921	0,294872	8	0,228639	0,245025	8	-0,00603986	0,266404
9	0,142054	0,298055	9	0,222332	0,248142	9	-0,0570964	0,266406
10	0,107613	0,299162	10	0,102524	0,251055	10	-0,0877867	0,266629
11	0,0558771	0,299796	11	0,0911633	0,25167	11	-0,126046	0,267154
12	-0,00854401	0,299967	12	-0,00415761	0,252155	12	-0,131593	0,268233
13	-0,0753632	0,299971	13	0,0136443	0,252156	13	-0,176431	0,269404
14	-0,0394276	0,300281	14	0,0860037	0,252167	14	-0,209227	0,271497
15	-0,0492042	0,300366	15	-0,0303645	0,252598	15	-0,190135	0,274413
Профиль №16			Профиль №17			Профиль №18		
Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош
1	0,613315	0,13484	1	0,776828	0,13484	1	0,437868	0,13484
2	0,359179	0,178494	2	0,577602	0,200314	2	0,289578	0,158599
3	0,341402	0,191184	3	0,382758	0,228599	3	0,4864	0,167938
4	0,371646	0,201965	4	0,23781	0,239969	4	0,259691	0,191849
5	0,304679	0,214038	5	0,0239236	0,244216	5	0,116663	0,198138
6	0,262354	0,221784	6	-0,155089	0,244259	6	0,12081	0,199383
7	0,201952	0,227356	7	-0,22931	0,246043	7	0,0206888	0,200709
8	0,231524	0,230595	8	-0,285506	0,249898	8	-0,0658325	0,200748
9	0,217652	0,234783	9	-0,330637	0,25576	9	-0,115433	0,20114
10	0,0375786	0,238424	10	-0,32991	0,263417	10	-0,177377	0,202341
11	-0,0326744	0,238531	11	-0,284367	0,270825	11	-0,0555247	0,205149
12	0,0475736	0,238613	12	-0,235771	0,276201	12	-0,0739376	0,205422
13	0,040794	0,238785	13	-0,232183	0,279836	13	-0,0334384	0,205905
14	-0,0575874	0,238912	14	-0,145973	0,283317	14	0,00843192	0,206004
15	-0,101982	0,239164	15	-0,0752276	0,284681	15	0,0150972	0,20601

Таблица 11. - Коэф автокорреляции и станд. ошибка для профилей №19 - №21

Профиль №19			Профиль №20		
Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош
1	0,767225	0,13484	1	0,545815	0,13484
2	0,654312	0,198964	2	0,289578	0,170338
3	0,60613	0,234851	3	0,221397	0,179065
4	0,531044	0,261753	4	0,366096	0,183975
5	0,479296	0,280659	5	0,376068	0,196775
6	0,453314	0,295166	6	0,187083	0,209436
7	0,400547	0,307564	7	0,130825	0,212452
8	0,351609	0,316906	8	0,108302	0,213912
9	0,28427	0,323922	9	0,123356	0,214907
10	0,282081	0,328426	10	0,0469547	0,21619
11	0,276464	0,332802	11	-0,0224492	0,216376
12	0,190015	0,336952	12	-0,0807692	0,216418
13	0,0836635	0,338894	13	-0,0275473	0,216965
14	0,0614136	0,33927	14	0,0240731	0,217029
15	0,0148823	0,339472	15	-0,074325	0,217077
Профиль №21			Профиль №22		
Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош	Лаг	Коэф.Автокор	Станд.ош
1	0,768767	0,149071	1	0,762891	0,149071
2	0,550939	0,220202	2	0,543296	0,219292
3	0,392312	0,248957	3	0,36618	0,247402
4	0,259269	0,262335	4	0,219199	0,259166
5	0,183082	0,267969	5	0,149254	0,263254
6	0,105088	0,270734	6	0,0720396	0,265128
7	0,0991927	0,271639	7	0,0772306	0,265562
8	0,194924	0,272443	8	0,175217	0,266061
9	0,217488	0,275525	9	0,208395	0,268613
10	0,247154	0,279314	10	0,238688	0,272182
11	0,297357	0,284132	11	0,296351	0,276794
12	0,299102	0,290965	12	0,298308	0,283758
13	0,188015	0,29772	13	0,179741	0,290643
14	0,0145011	0,300347	14	-0,00084948	0,293103
15	-0,132379	0,300362	15	-0,142367	0,293103

Приложение №3. – Описательная статистика

Таблица 12. - Характеристики описательной статистики для профилей №1 - №6

Профиль №1		Профиль №2		Профиль №3	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Кол-во знач.	49	Кол-во знач.	49	Кол-во знач.	71
Среднее знач.	128,959	Среднее знач.	115,122	Среднее знач.	114,803
Медиана	129	Медиана	117	Медиана	113
Мода	110	Мода	105	Мода	120
Дисперсия	454,623	Дисперсия	724,943	Дисперсия	372,646
Станд.отклонение	21,3219	Станд.отклонение	26,9248	Станд.отклонение	19,304
Коэф. вариации	16,53%	Коэф. вариации	23,39%	Коэф. вариации	16,82%
Станд.ошибка	3,04599	Станд.ошибка	3,8464	Станд.ошибка	2,29097
Мин.знач.	83	Мин.знач.	56	Мин.знач.	66
Макс.знач	175	Макс.знач	169	Макс.знач	180
Диапазон	92	Диапазон	113	Диапазон	114
Профиль №4		Профиль №5		Профиль №6	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Кол-во знач.	58	Кол-во знач.	65	Кол-во знач.	59
Среднее знач.	148,224	Среднее знач.	137,077	Среднее знач.	126,102
Медиана	150	Медиана	136	Медиана	121
Мода		Мода		Мода	120
Дисперсия	609,405	Дисперсия	513,291	Дисперсия	324,645
Станд.отклонение	24,6861	Станд.отклонение	22,6559	Станд.отклонение	18,0179
Коэф. вариации	16,65%	Коэф. вариации	16,53%	Коэф. вариации	14,29%
Станд.ошибка	3,24145	Станд.ошибка	2,81012	Станд.ошибка	2,34573
Мин.знач.	100	Мин.знач.	67	Мин.знач.	88
Макс.знач	210	Макс.знач	200	Макс.знач	181
Диапазон	110	Диапазон	133	Диапазон	93

Таблица 13. - Характеристики описательной статистики для профилей №7 - №12

Профиль №7		Профиль №8		Профиль №9	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Кол-во знач.	59	Кол-во знач.	58	Кол-во знач.	65
Среднее знач.	99,8475	Среднее знач.	115,483	Среднее знач.	80,7538
Медиана	110	Медиана	128,5	Медиана	83
Мода		Мода	151	Мода	61
Дисперсия	1546,96	Дисперсия	1535,66	Дисперсия	723,282
Станд.отклонение	39,3314	Станд.отклонение	39,1875	Станд.отклонение	26,8939
Коэф. вариации	39,39%	Коэф. вариации	33,93%	Коэф. вариации	33,30%
Станд.ошибка	5,12051	Станд.ошибка	5,14557	Станд.ошибка	3,33578
Мин.знач.	24	Мин.знач.	37	Мин.знач.	36
Макс.знач	155	Макс.знач	178	Макс.знач	133
Диапазон	131	Диапазон	141	Диапазон	97
Профиль №10		Профиль №11		Профиль №12	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Кол-во знач.	65	Кол-во знач.	65	Кол-во знач.	62
Среднее знач.	152,323	Среднее знач.	180,815	Среднее знач.	177,452
Медиана	167	Медиана	182	Медиана	189
Мода		Мода		Мода	
Дисперсия	1162,75	Дисперсия	3049,65	Дисперсия	3667,69
Станд.отклонение	34,0992	Станд.отклонение	55,2237	Станд.отклонение	60,5615
Коэф. вариации	22,39%	Коэф. вариации	30,54%	Коэф. вариации	34,13%
Станд.ошибка	4,22948	Станд.ошибка	6,84965	Станд.ошибка	7,69132
Мин.знач.	87	Мин.знач.	60	Мин.знач.	70
Макс.знач	219	Макс.знач	301	Макс.знач	322
Диапазон	132	Диапазон	241	Диапазон	252

Таблица 14. - Характеристики описательной статистики для профилей №13 - №18

Профиль №13		Профиль №14		Профиль №15	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Кол-во знач.	59	Кол-во знач.	68	Кол-во знач.	55
Среднее знач.	99,8475	Среднее знач.	161,5	Среднее знач.	120,309
Медиана	110	Медиана	160	Медиана	110
Мода		Мода	167	Мода	92
Дисперсия	1546,96	Дисперсия	748,493	Дисперсия	2362,37
Станд.отклонение	39,3314	Станд.отклонение	27,3586	Станд.отклонение	48,6042
Коэф. вариации	39,39%	Коэф. вариации	16,94%	Коэф. вариации	40,40%
Станд.ошибка	5,12051	Станд.ошибка	3,31772	Станд.ошибка	6,55379
Мин.знач.	24	Мин.знач.	95	Мин.знач.	40
Макс.знач	155	Макс.знач	225	Макс.знач	278
Диапазон	131	Диапазон	130	Диапазон	238
Профиль №16		Профиль №17		Профиль №18	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Кол-во знач.	55	Кол-во знач.	55	Кол-во знач.	55
Среднее знач.	138,491	Среднее знач.	117,855	Среднее знач.	158,018
Медиана	147	Медиана	113	Медиана	157
Мода	162	Мода		Мода	139
Дисперсия	1080,55	Дисперсия	2150,61	Дисперсия	725,907
Станд.отклонение	32,8717	Станд.отклонение	46,3746	Станд.отклонение	26,9427
Коэф. вариации	23,74%	Коэф. вариации	39,35%	Коэф. вариации	17,05%
Станд.ошибка	4,43242	Станд.ошибка	6,25316	Станд.ошибка	3,63295
Мин.знач.	29	Мин.знач.	20	Мин.знач.	62
Макс.знач	190	Макс.знач	192	Макс.знач	218
Диапазон	161	Диапазон	172	Диапазон	156

Таблица 15. - Характеристики описательной статистики для профилей №19 - №22

Профиль №19		Профиль №20	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Кол-во знач.	55	Кол-во знач.	55
Среднее знач.	110,273	Среднее знач.	135,327
Медиана	110	Медиана	132
Мода	125	Мода	120
Дисперсия	532,202	Дисперсия	704,484
Станд.отклонение	23,0695	Станд.отклонение	26,5421
Коэф. вариации	20,92%	Коэф. вариации	19,61%
Станд.ошибка	3,11069	Станд.ошибка	3,57894
Мин.знач.	63	Мин.знач.	71
Макс.знач	151	Макс.знач	179
Диапазон	88	Диапазон	108
Профиль №21		Профиль №22	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Кол-во знач.	45	Кол-во знач.	45
Среднее знач.	13,8556	Среднее знач.	12,2444
Медиана	15	Медиана	13
Мода	13	Мода	
Дисперсия	27,6662	Дисперсия	22,5298
Станд.отклонение	5,25986	Станд.отклонение	4,74656
Коэф. вариации	37,96%	Коэф. вариации	38,77%
Станд.ошибка	0,784094	Станд.ошибка	0,707575
Мин.знач.	1	Мин.знач.	1
Макс.знач	23	Макс.знач	20
Диапазон	22	Диапазон	19

Приложение №4. – Морфологическая и генетическая классификация лавин

Таблица 16. - Международная морфологическая классификация лавин

Зона	Критерий	Альтернативная характеристика и название лавины	
Зарождения	А. Тип начала движения	A1 - Двинулась из точки (лавина из рыхлого снега)	A2 - Двинулась с линии
	В. Положение поверхности скольжения	B1 - Внутри снежного покрова (лавина поверх. слоя). B2 - Отрыв в новом снежном покрове. B3 - Отрыв в старом снежном покрове	B4 - По грунту (лавина полной глубины)
	С. Жидкая вода в снегу	C1 - Отсутствует (лавина из сухого снега)	C2 - Имеется (мокрая лавина)
Транзита	D. Форма пути	D1 - Движение на ровном склоне (Неканализованная лавина)	D2 - Движение в лотке (канализованная лавина)
	Е. Тип движения	E1 - Облако снежной пыли (пылевая лавина)	E2 - Течение вдоль поверхности грунта (текучая лавина)
Отложения	F. Поверхностная шерховатость отложений	F1 - Крупнокомковатые. F2 - Угловатые блоки. F3 - Окатанные комья	F4 - Мелкокомковатые
	G. Жидкая вода в снежных отложениях	G1 - Отсутствуют (Сухие отложения)	G2 - Имеются (Мокрые лавинные отложения)
	H. Загрязнение отложений	H1 - Нет ясного загрязнения	H2 - Имеется загрязнение. H3 - Скальные обломки, остатки почвы. H4 - Ветки, деревья

Таблица 17. - Генетическая классификация лавин по Аккуратову

Классификация	Описание
Лавины из сухого свежевывавшего снега	Во время снегопада формируются слои из свежевывавшего сухого снега, состоящего из снежных кристаллов, образованных в атмосфере, плотностью 50 - 200 кг/м ³ . По мере увеличения слоя снега растет тангенциальная составляющая силы веса снега, что в последствии может привести к сходу лавины;
Лавины метелевого снега	Образуются путем перераспределения снежного покрова в результате метелевого переноса снега. Переносимый ветром снег отлагается в отрицательных формах рельефа, на подветренных склонах;
Лавины сублимационного диафтореза	Образуются в результате перекристаллизации снега, определяющей возникновение прослоек и разрыхленных слоев в снежной толще
Лавины температурного сокращения	Вызываются напряжениями, возникающими в результате изменения линейных размеров снежного поля под воздействием температуры
Лавины из свежевывавшего мокрого снега	Образуются в результате аккумуляции снежного покрова за счет выпадения снежных осадков при положительных температурах воздуха
Инсоляционные лавины	Образуются в связи с поглощением солнечной энергии снежным покровом. Солнечная радиация, проникающая в снежный покров с глубиной, резко уменьшается, и на глубине 30 см обладает лишь 3% от величины на поверхности снежного покрова, в связи с чем трансформация солнечной радиации в тепловую энергию происходит лишь в верхнем слое контактных зон слоев снега
Адвекционные лавины	Обычно образуются весной в результате адвекции теплых и влажных воздушных масс, приносимыми на Кольский полуостров атлантическими циклонами. Таяние происходит за счет выпадения жидких осадков, и положительных температур воздуха
Адвекционно - инсоляционные лавины	Возникают в мае вследствие антициклональной погоды, когда таяние снежного покрова объясняется повышением температуры воздуха за счёт фёна из свободной атмосферы в сочетании с проникновением солнечной радиации в снежный покров.
Гидронапорные лавины	Сходят в результате давления подснежных потоков воды. Талая и дождевая вода просачивается в снежный покров, фильтруется на участке сужения, вызывая гидродинамическое давление, достаточное для разрушения снежного покрова в русле потока.