

Публикуя эту статью, Гляциологическая ассоциация поздравляет Юлию Заикú с избранием на пост Президента APЕCS – Ассоциации молодых полярных исследователей, международной и междисциплинарной организации для студентов, аспирантов, молодых учёных и всех тех, кому интересны полярные районы. Эта организация включает в себя около 2800 членов из 76 стран мира и создаёт основу для профессионального развития и роста молодых исследователей. Юлия Заика родилась в Арктике, на северо-западе России, поэтому вся её жизнь связана с полярными районами. В 2006 г. она закончила Петрозаводский государственный университет и получила специальность эколога и переводчика.

УДК 551.578.467

Многолетняя динамика нивальных процессов в Хибинах

© 2012 г. Ю.В. Заика¹, М.А. Викулина¹, П.А. Черноус²

¹Хибинская учебно-научная база географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова;

²Центр лавинной безопасности ОАО «Апатит», Кировск

khibiny_msu@mail.ru

Статья принята к печати 9 марта 2011 г.

Лавинная активность, нивальные процессы, снежный покров, стратиграфия снежного покрова, типизация зим.
Avalanche activity, nival processes, snow cover, snow cover stratigraphy, winter types.

В конце XX в. в Хибинах отмечалось потепление, особенно заметное в зимний сезон. В настоящее время один из основных индикаторов климатических изменений – многолетняя динамика нивальных процессов не только в контрастных условиях высокогорья, но и в более умеренном по своим природным процессам лесном поясе. При сопоставлении данных горных метеостанций (1050 м) с данными стационарных наблюдений на Хибинской базе (320 м) установлена их аналогичная изменчивость, что позволяет полнее оценить происходящие изменения. Исследования показали стабильность характеристик снежного покрова на фоне изменяющихся температур зимнего периода и лавинной активности.

Полярные регионы всегда вызвали особый интерес у учёных, так как считается, что здесь последствия глобального потепления проявляются наиболее сильно [2, 3, 8, 9]. Именно поэтому изучение изменчивости климата по данным наблюдений за температурой воздуха и другими климатически зависимыми показателями относится к одной из приоритетных задач. Хибинский горный массив – уникальный по своей контрастности природный комплекс, который в полной мере отражает изменения климатических условий настоящего. Наряду с изучением динамики нивальных процессов в условиях высокогорья, не менее важен анализ многолетних рядов данных климатически зависимых показателей зимнего периода в лесном поясе. Данное исследование продолжает серию работ по климату и нивально-гляциальным процессам в Хибинах, которая проводилась большим коллективом специалистов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [3, 6, 8, 9].

Методы наблюдений и результаты

В качестве основных климатически зависимых показателей рассмотрены характеристики зимнего периода, среди которых температурные условия зим и их снежность, стратиграфия снежного покро-

ва, лавинная активность и ряд внутрисезонных характеристик. Сотрудники Хибинской учебно-научной базы географического факультета МГУ и Центра лавинной безопасности ОАО «Апатит» ведут постоянный мониторинг этих показателей.

На Хибинской станции наблюдения проводятся на стационарной площадке (абс. высота 320 м), расположенной в лесном поясе. Размер площадки – 30 × 50 м. Здесь находятся: 10 снегомерных реек для ежедневного наблюдения за приростом снежного покрова и его оседанием, осадкомер Третьякова, автоматическая метеостанция Aanderaa AWS 2700, площадка для шурфования снежного покрова. На станции наблюдения ведутся со времени её основания в 1948 г., а с 1984 г. – и на метеоплощадке у подножия г. Юкспор. За 25 последних лет накоплен значительный материал, который позволяет сделать некоторые выводы о происходящих изменениях. Для более полной характеристики зимнего периода выполнен сравнительный анализ данных с различных станций: Хибинской (320 м, данные за 1984–2008 гг.); Кировск (365 м, 1984–2005 гг.); Центральной (на вершине плато Ловчорр, 1050 м, 1984–2005 гг.).

При определении границ зимнего периода использовалось несколько подходов. Так, в снеговедении учитывают два основных фактора: переход

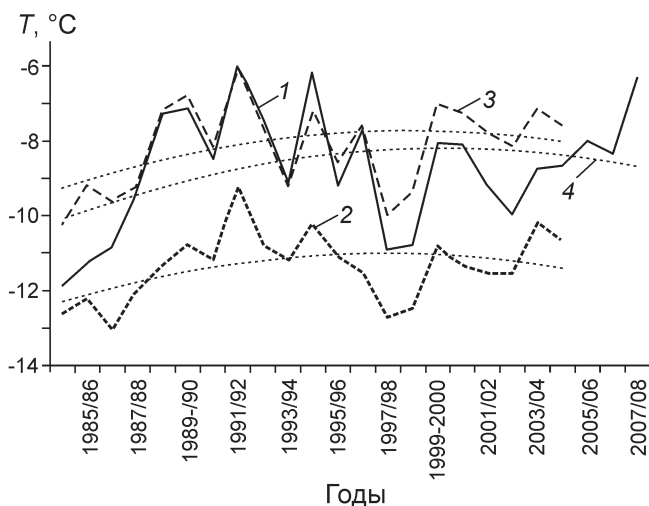


Рис. 1. Ход средней температуры зимнего периода в 1984–2008 гг. на станциях:

1 – Хибинская; 2 – Центральная; 3 – Кировск; 4 – полиномиальные тренды

Fig. 1. Variation of the mean winter temperature during 1984–2008 at stations:

1 – Khibiny; 2 – Centralnaya; 3 – Kirovsk; 4 – polynomial trends

температуры через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и наличие устойчивого снежного покрова [5]. В климатологии за зимние периоды принимаются месяцы, для которых характерны климатические признаки зимы в Северном полушарии с ноября по март включительно [10]. Анализ многолетних рядов наблюдений за температурой и становлением снежного покрова на Хибинской станции показал, что устойчивый снежный покров здесь образуется в конце октября – начале ноября, когда температура воздуха устойчиво переходит через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в апреле часто отмечаются оттепели (дни со среднесуточной температурой воздуха выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) и начинается процесс снеготаяния. Таким образом, за границы зимнего периода был принят период с ноября по март, когда климатическая зима неразрывно связана с существованием снежного покрова.

Температурные условия зимы. Изменчивость температурных условий зимнего периода оценивалась по величине квадрата коэффициента корреляции R^2 , которая показывает вклад линейного тренда в общую изменчивость температуры. Тенденция изменения температуры считалась статистически значимой, если её уровень достоверности был равен или превышал 95%. Сопоставлялись также полиномиальные тренды, которые позволяют установить синхронность изменений температуры воздуха. Анализировались и фактические среднемесячные значения температуры воздуха за зимний период. При сравнении данных по температуре воздуха зимнего периода на стационарной

площадке Хибинской станции с данными за тот же период времени на станциях Кировск и Центральная отмечена тенденция повышения средней температуры зимнего периода на $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Многолетний ход средней сезонной температуры воздуха на всех трёх станциях при сравнении полиномиальных трендов показывает их синхронное изменение (рис. 1).

Коэффициент корреляции между многолетними рядами данных для всех трёх станций высокий и составляет: Хибинская станция–Центральная – $0,84$; Центральная–Кировск – $0,87$; Кировск–Хибинская станция – $0,85$. Многолетний ход значений среднемесячной температуры воздуха в зимние периоды также указывает на их синхронность (рис. 2). Средняя многолетняя температура зимнего периода на стационарной площадке Хибинской станции на протяжении последних 25 лет изменчива, а линия тренда указывает на повышение температуры зимы в среднем на $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет (см. рис. 1). Средняя температура зимнего периода равна $-8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средняя сумма среднемесячных температур зимнего периода составляет $-51,72\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тёплая зима была в 1991/92 г., когда максимальная средняя температура воздуха была равна $-6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при сумме температур за этот период $-36,0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Самая холодная зима наблюдалась в 1984/85 г. Тогда минимальная средняя температура воздуха равнялась $-11,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при сумме температур $-59,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Минимальная сумма среднемесячных температур зимнего периода ($-67,56\text{ }^{\circ}\text{C}$) отмечалась в 1985/86 г. Многолетние значения среднемесячных температур зимнего периода свидетельствуют о естественной смене более холодных условий более тёплыми, но какой-либо чёткой закономерности не наблюдается. То же характерно и для двух других станций. На станции Кировск самая холод-

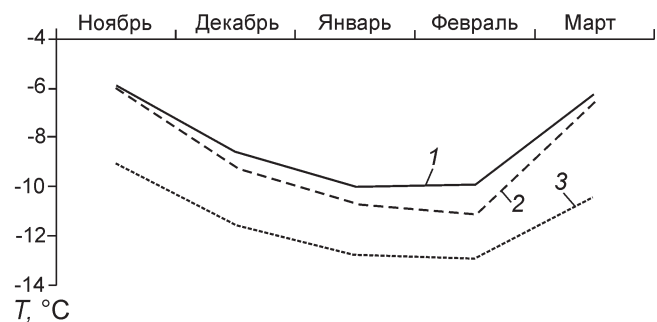


Рис. 2. Средний многолетний ход значений среднемесячной температуры воздуха зимнего периода на станциях:

1 – Кировск; 2 – Хибинская; 3 – Центральная

Fig. 2. Mean multiyear variation of monthly mean winter temperature at stations:

1 – Kirovsk; 2 – Khibiny; 3 – Centralnaya

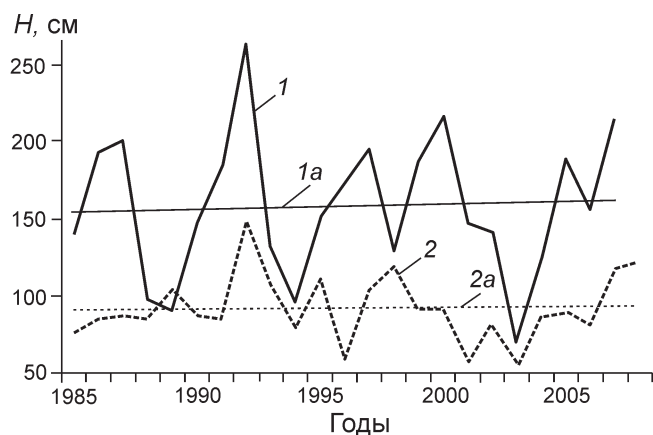


Рис. 3. Ход максимальной толщины снежного покрова в 1984–2008 гг. на станции Центральная (1) и Хибинская (2) и их линейные тренды (1а и 2а)

Fig. 3. Variation of maximum thickness of snow cover during 1984–2008 at Centralnaya station (1) and Khibiny station (2) and with linear trends (1a and 2a)

ная зима ($-10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдалась в 1984/85 г., а на станции Центральная – в 1986/87 г. ($-13,0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Самая тёплая зима на обеих станциях отмечалась в 1991/92 г., когда температуры воздуха составили соответственно $-6,0$ и $-9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Динамика характеристик снежного покрова.

Между данными по толщине снежного покрова на Хибинской станции и станции Центральная коэффициент корреляции довольно низок – 0,4. Это связано с расположением станций на разных абсолютных высотах и нахождением точек, где фиксируется формирование снежного покрова, в различных формах рельефа. Однако общий ход значений толщины снежного покрова в целом совпадает и при сравнении полиномиальных трендов указывает на их синхронность (рис. 3).

Линейный тренд толщины снежного покрова по обеим станциям показывает, что, несмотря на большие колебания значений в пределах рассматриваемого периода, каких-либо значимых изменений не происходит. Максимальная толщина снежного покрова наблюдалась на обеих станциях в 1991/92 г. и составляла для Хибинской станции 149 см, а для Центральной – 256 см. Минимальные значения толщины снежного покрова характерны для разных периодов: на Хибинской станции этот параметр был минимален в 1995/96 г. и составлял 48 см, а на станции Центральная – 70 см – был отмечен в 2002/03 г. Возможно, это связано с мете-левым переносом на плато Ловчорр, где находится станция Центральная. Зимой 2002/03 г. средняя скорость ветра здесь, максимальная за весь 25-летний период, составляла 7,9 м/с.

В последние 25 лет устойчивый снежный покров на территории Хибинской станции держится в среднем 185 дней (рис. 4). Максимальное значение продолжительности залегания устойчивого снежного покрова – 219 дней для зимы 2006/07 г., минимальное – 100 дней для зимы 1999/2000 г. Становление устойчивого снежного покрова происходит в октябре–ноябре (например, зимой 2002/03 г. – 4 октября, а зимой 2005/06 г. – 21 ноября). Даты схода снежного покрова в среднем приурочены к середине мая. Зимой 1991/92 г. снежный покров сошёл 14 апреля, причём для этой зимы отмечается максимальное снегонакопление за весь период исследований – 149 см, а зимой 2007/08 г. – только 27 мая. Декадные изменения толщины снежного покрова за 25 лет также не указывают на какие-либо изменения. Показатели за март, как наиболее снежный месяц в году, стабильны.

Выделение зим по снежности и температурным условиям. Многолетняя изменчивость снежного покрова и температуры воздуха определялась по методике А.Д. Олейникова [5], который уточнил и дополнил ранние разработки Н.Н. Галахова (1961 г.), касающиеся типизации зим по снежности и температурным условиям с учётом отклонения от среднеснежной толщины снежного покрова. Мало- и многоснежные – это зимы, когда средние декадные значения толщины снежного покрова больше чем на 25% отклоняются от средних многолетних значений в течение 2/3 зимы. Если отклонения не достигают $\pm 25\%$, то зима относится к среднеснежной; если отклонения от нормы меньше или больше $\pm 100\%$, то зимы считаются аномально малоснежными или аномально многоснежными соответственно. Аналогичный подход применён для оценки изменчивости температуры воздуха. В соответствии с отклонениям от нормы выделяют

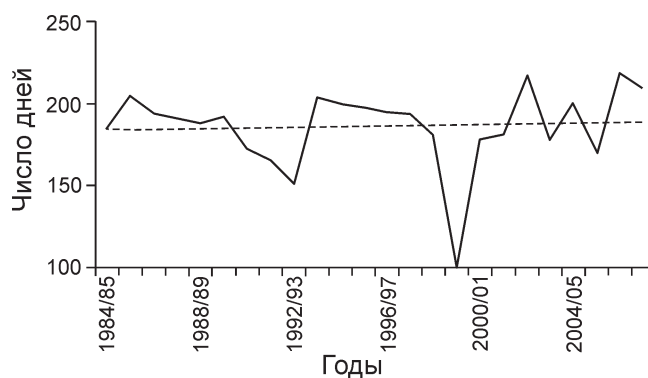


Рис. 4. Продолжительность залегания устойчивого снежного покрова (дни) на Хибинской станции в 1984–2008 гг. с трендом

Fig. 4. Duration of stable snow cover in days at Khibiny station during 1984–2008 with trend

следующие зимы: аномально холодные; аномально тёплые; умеренно холодные; умеренно тёплые; средние по температуре воздуха [4].

Типизация зим проводилась по данным, накопленным на стационарной площадке Хибинской станции в 1984–2008 гг. Коэффициент корреляции между характеристиками температуры и снежности составляет $r = 0,51$. Основная цель типизации заключалась в выделении зим, для которых отмечались отклонения по двум показателям – снежности и температурным условиям. Установлено, что на территории стационарной площадки Хибинской станции преобладают среднеснежные зимы – 52% общего числа зим (13 зим из 25); на мало- многоснежные зимы приходится соответственно 28 и 20% (табл. 1). Какой-либо закономерности в распределении характеристик зим по снежности не наблюдается. По температурным условиям для стационарной площадки характерны умеренные зимы – 70% общего числа зим за последние 25 лет (17 зим из 25); доля холодных и тёплых зим равна соответственно 17 и 13% (табл. 2). Какой-либо закономерности в чередовании тёплых и холодных зим также не наблюдается. При сопоставлении результатов типизации по снежности и температурным условиям установлено, что на территории стационарной метеоплощадки преобладают зимы с нормальными условиями снежности и температуры – 88% общего числа зим (21 из 25); холодные малоснежные зимы составляют 4% (зима 1984/85 г.), а тёплые многоснежные – 8% (зимы 1992/93 и 2007/08 гг.).

В целом условия снежности зим по измерениям на опытной площадке за последние 25 лет не изменились. Преобладают зимы средней снежности, умеренные по температуре; многоснежные тёплые и малоснежные холодные зимы наблюдаются редко. Полученные в этой работе результаты, при отсутствии аномальных значений типизации зим, не противоречат более ранним материалам [4, 6, 8, 9], где использованы данные высокогорных станций, значения по которым, как известно, более контрастны, чем по станциям, расположенным в лесном поясе.

Стратиграфия снежной толщи. Характерные особенности снегонакопления в Хибинах заключаются в некоторой монотонности стратиграфии снежной толщи, большей плотности снега и метелевом снегонакоплении. Снежная толща обычно представлена следующими типами снега: 1) мелкозернистый, залегающий тонкими уплотнёнными и мягкими слоями; 2) мелкозернистый снег метелевый уплотнённый с зёрнами до 0,3–0,5 мм; 3) плотный мелкозернистый снег (до 0,5–0,7 мм) однородной текстуры (плотная ветровая доска); 4) средне-

Таблица 1. Типизации зим по снежности (в скобках даны значения в процентах)

Тип зимы	Максимальная толщина снежного покрова, см	Число зим
Многоснежная	Более 105	5(20)
Среднеснежная	80–105	13(52)
Малоснежная	Менее 80	7(28)

Таблица 2. Типизации зим по температурным условиям (в скобках даны значения в процентах)

Тип зимы	Средняя температура воздуха, °С	Число зим
Тёплая	Ниже –7,4	3 (13)
Умеренная	От –7,4 до –10,2	17 (70)
Холодная	Выше –10,2	4 (17)

зернистый снег с зёрнами до 1–1,4 мм и с тонкими линзочками льда толщиной до 2 мм; 5) среднезернистый снег уплотнённой однородной текстуры; 6) глубинная изморозь с преобладанием кристаллов пирамидальной формы хорошей огранки размером до 2 мм. Средняя плотность снега равна 0,32 г/см³ [7]. За период исследования снежного покрова на стационарной площадке Хибинской станции стратиграфия снежной толщи не изменилась. Увеличилось лишь количество фирновых и ледяных корок, что может быть связано с ростом средней температуры зимнего периода. В целом всё также доминируют мелко- и среднезернистые слои с различными ледяными включениями, а снежная толща развивается по типу уплотнения.

При сопоставлении данных типизации зим по снежности и температурным условиям и наблюдений за стратиграфией снежного покрова чётких зависимостей от каких-либо показателей не выявлено. Так, в марте холодной малоснежной зимы 1984/85 г. средняя плотность снежного покрова составляла 0,32 г/см³, а при тёплых многоснежных зимах 1992/93 и 2007/08 гг. – 0,25 и 0,33 г/см³ соответственно. Вместе с тем прослеживается связь между образованием слоя глубинной изморози на стационарной площадке Хибинской станции с зимами, которые характеризуются минимальной суммой среднемесячных температур.

Лавинная активность. При сравнении данных по температуре зимнего периода и толщине снежного покрова на площадке Хибинской станции, а также с данными станций Центра лавинной безопасности выявлена их совместная вариативность при значениях коэффициента корреляции $r = 0,51$, что подтверждается и синхронной направленностью полиномиальных трендов этих данных.

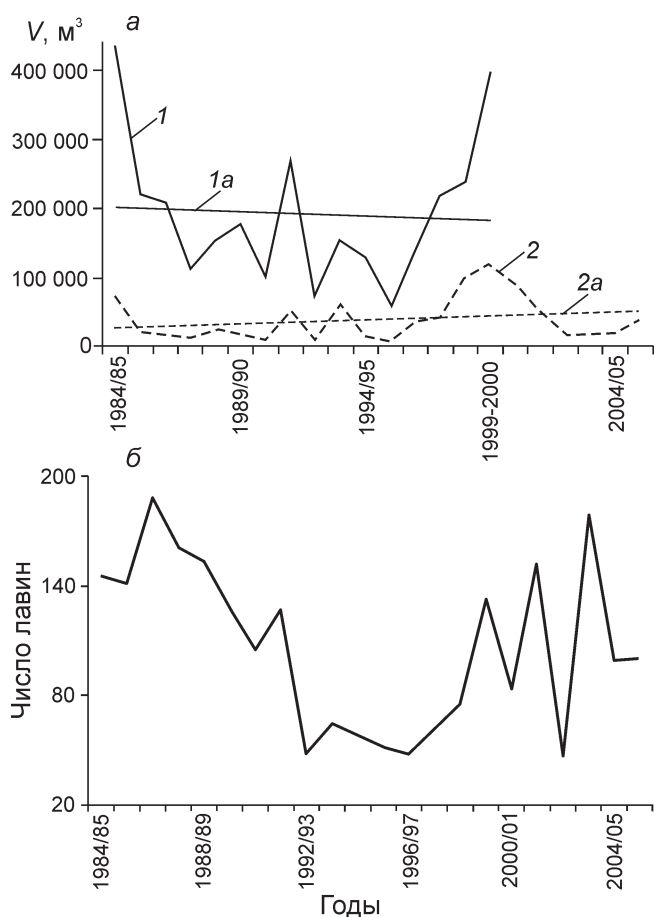


Рис. 5. Динамика суммарного объёма сошедших лавин (1) и максимальных объёмов лавин (2) в период 1984–2006 гг. с линией тренда (1а и 2а) (а) и числа лавин, сошедших за зимний период с 1984 г. (б) (данные Центра лавинной безопасности)

Fig. 5. Dynamics of cumulative volume of avalanches (1) and maximum volumes of avalanches (2) for the period 1984–2006 with trend (1a and 2a) (a) and number of avalanches during winter since 1984 (b) (on data of Center of Avalanche Safety)

Полученные результаты позволяют установить связь лавинной активности с характеристиками зимнего периода не только по данным станций, расположенных на вершинах плато, но и по материалам Хибинской станции. Анализировались данные по суммарному и максимальному объёму и количеству сошедших лавин за зимние периоды 1984–2006 гг. В результате интенсивного промышленного освоения естественный режим лавинообразования в этом районе существенно нарушен, поэтому мы учитывали и лавины антропогенного характера. Сход лавин в результате антропогенного воздействия свидетельствует о подготовленности снежной толщи к обрушению, т.е. в результате действия природных факторов были созданы определённые условия и возникновение лавин могло произойти самопроизвольно [9].

Таблица 3. Сопоставление результатов типизации зим по снежности с суммарными объёмами сошедших лавин

Тип зимы по снежности	Зимний период, годы	Максимальная толщина снежного покрова, см	Суммарный объём лавин, m^3
Малоснежные	1984/85	71	435 625
	1995/96	48	59 250
Многоснежные	1991/92	149	267 850
	1992/93	107	71 700

За зимний период на территории, примыкающей к Кировску (40 лавиносборов), в среднем сходит 83 лавины при максимальном их числе 230. Средний объём лавин в последние годы составлял около 2 тыс. m^3 [1]. С 1984 г. характер лавинной активности значительно изменился: на фоне снижения суммарных объёмов лавин увеличиваются их максимальные объёмы и уменьшается число сошедших лавин (рис. 5).

Анализ корреляционной связи между характеристиками зимнего периода и лавинной активностью ($r = -0,51$) показал, что при повышении средней температуры зимнего периода суммарный объём лавин снижается. Так, зимой 1984/85 г. при средней температуре зимнего периода $-11,9^\circ\text{C}$ суммарный объём сошедших лавин составил 435 625 m^3 , а зимой 1992/93 г. при средней температуре $-7,8^\circ\text{C}$ он был равен 71 700 m^3 . Однако сопоставление данных по объёму и количеству лавин с такими характеристиками зимнего периода, как максимальная толщина снежного покрова, число дней со снежным покровом и средняя скорость ветра, не позволило выявить каких-либо чётких закономерностей. Не установлено зависимости и между данными лавинной активности и типизацией зим по снежности на стационарной площадке Хибинской станции (табл. 3).

Заключение

Результаты анализа показали стабильность характеристик снежного покрова на фоне изменяющихся температурных условий зимнего периода и лавинной активности. Приведём динамику основных показателей за 1984–2008 гг. по данным Хибинской учебно-научной базы и Центра лавинной безопасности ОАО «Апатит»:

- температура зимнего периода: повышается в среднем на $0,06^\circ\text{C}/\text{год}$;
- характеристики снежного покрова: стабильны;
- максимальная толщина снега: 85–90 см;
- продолжительность залегания снега: 185 дней;
- средняя плотность снега: $0,32 \text{ г}/\text{см}^3$;
- стратиграфия: мелко- и среднезернистые слои;

типизация зим по снежности и температурным условиям: преобладают (88%) зимы с нормальными условиями снежности и температуры;
суммарный объём лавин: в среднем снижается на 1300 м³/год;
число лавин: незначительно уменьшается;
максимальный объём лавин: увеличивается в среднем на 1100 м³/год.

За последние 25 лет средняя температура зимы повысилась на 0,6 °С/10 лет. Продолжительность залегания снежного покрова, сроки становления устойчивого снежного покрова, средний прирост снежной толщи, значения максимального снегонакопления при вариациях год от года не имеют существенного тренда. При анализе стратиграфии снежной толщи также не обнаружено каких-либо изменений в параметрах метаморфизма.

Для территории Хибинской станции характерны в основном зимы средней снежности, умеренные по температуре. Многоснежные тёплые и мало-снежные холодные зимы отмечаются редко. Последние 25 лет число сошедших лавин в Хибинах уменьшилось при одновременном увеличении их максимальных объёмов на фоне снижения суммарных за зиму объёмов. Прослеживаются связь лавинной активности и средней температуры зимнего периода, а связь лавинной активности с показателями снежности отсутствует.

Литература

1. *Викулина М.А.* Оценка лавинной активности, опасности и риска (на примере Хибин) // Гляциология в начале XXI века: Материалы Междун. науч. конф. М.: Университетская книга, 2009. С. 77–83.
2. *Глазовская Т.Г.* Возможное изменение снежности и лавинной активности вследствие прогнозируемого глобального потепления // МГИ. 2000. Вып. 88. С. 70–73.
3. *Зюзин Ю.Л.* Суровый лик Хибин. Мурманск: Рекламная полиграфия, 2006. 235 с.
4. *Китаев Л.М., Володичева Н.А., Олейников А.Д.* Многолетняя динамика снежности на северо-западе Русской равнины // МГИ. 2007. Вып. 102. С. 65–72.
5. *Олейников А.Д.* Применение существующих методов типизации зим для целей лавиноведения на примере Западного Кавказа // МГИ. 1982. Вып. 45. С. 70–75.
6. *Сапунов В.Н., Селиверстов Ю.Г., Трошкина Е.С., Черноус П.А.* Температурный режим воздуха в зимние сезоны и его влияние на лавинную активность в Хибинах // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 4. С. 68–73.
7. *Трошкина Е.С.* Оценка структурно-стратиграфических особенностей снежного покрова горных районов Советского Союза для прогнозирования лавин // Склоновые процессы (лавины и сели). М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 18–33.
8. *Трошкина Е.С., Сапунов В.Н., Селиверстов Ю.Г., Черноус П.А.* Динамика снежного покрова в Хибинах (1936–2002 гг.) // МГИ. 2005. Вып. 99. С. 112–115.
9. *Трошкина Е.С., Селиверстов Ю.Г., Мокров Е.Г., Сапунов В.Н., Черноус П.А., Соловьев А.Ю.* Влияние изменения климатических условий на нивально-гляциальные процессы в Хибинах // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2009. Вып. 2. С. 26–32.
10. *Хромов С.П., Мамонтов Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.

Summary

Period of warming is registered at Khibiny Mountains in the end of XX century. Sensible rise in temperature occur in winter. The one of general indicators of present climate changes is multiyear dynamic of nival processes not only for contrast high-mountain conditions but also for more temperate green belt. Compatible variability of both data sets from high-mountain (1050 m) and green belt (320 m) stations allows to full appreciation of present changes. The results of data evaluation shows stability of snow cover characteristics against changing of winter temperature conditions and avalanche activity.