

Современные тенденции изменения снеголавинного режима Центрального Кавказа (на примере Приэльбрусья)

© 2019 г. А.Д. Олейников*, Н.А. Володичева

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*snowldozor@yandex.ru

Recent trends of snow avalanche regime in the Central Caucasus (Elbrus region as an example)

A.D. Oleinikov*, N.A. Volodicheva

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*snowldozor@yandex.ru

Received September 18, 2018 / Revised February 9, 2019 / Accepted March 22, 2019

Keywords: *avalanche danger, avalanche regime, catastrophic avalanches, Central Caucasus, climate change, snowiness of winters.*

Summary

The climate change during cold seasons of 1995–2017 in the Central Caucasus is estimated, and its influence on the avalanche regime is shown. Data on the avalanche releases in the Central Caucasus for the period 1968–2017 together with observations of high-altitude meteorological stations were used for the analysis. The paper presents estimates of snowiness of the winters and their frequency of occurrence in the area under investigation. The winter snowiness was noted to decrease since the beginning of the 2000s. The last decade of the period was not snowy, especially its series of six winters having very small amounts of snow. It is shown that in the second half of the XX century the heaviest snowfalls took place mostly in Januaries, and they were followed by releases of avalanches with the volumes exceeding 1 million cubic metres. In the early 2000-ies, intensive January snowfalls were observed later, i.e. during the winter-spring period. In the warmer months March and April, the destructive potential of avalanches was noticeably smaller. In the present time, the warming and decrease of winter snowiness resulted in significant diminution of the avalanche hazard in the region. At the same time, on the background of general warming the certain increase in inter-seasonal variability of air temperature was noted. These changes may be compared to the warming of 1910–1945 when during its warmest phase the Europe suffered with one of the harshest winters in 1941/42. The swing of the «temperature pendulum» indicates that a harsh winter with heavy snowfalls and avalanches with catastrophic consequences may occur on the background of winters with mild and moderate avalanche danger. This is one of probable scenarios in the development of avalanche activity in the Greater Caucasus in the context of the current climate change.

Citation: Oleinikov A.D., Volodicheva N.A. Recent trends of snow avalanche regime in the Central Caucasus (Elbrus region as an example). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (2): 191–200. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-400>.

Поступила 18 сентября 2018 г. / После доработки 9 февраля 2019 г. / Принята к печати 22 марта 2019 г.

Ключевые слова: *изменение климата, катастрофические лавины, лавинная опасность, лавинный режим, снежность зим, Центральный Кавказ.*

На рубеже XX–XXI вв. (1995–2017 гг.) увеличились изменчивость и частота экстремальных явлений. Рассмотрены тенденции изменения снеголавинного режима в Приэльбрусье за последние десятилетия, показана их связь с изменениями климата.

Характеристика района исследований

Приэльбрусьем называют верховья долины р. Баксан на Центральном Кавказе. Сотрудники географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова ведут здесь с 1967 г. стационарные снеголавинные и гляциологические наблюдения. В 1957–1959 гг. на Эльбрусе проводили работы по программе Международного геофизического года. Собранный учёными МГУ обширный

фактический материал составил фундаментальную основу для последующих гляциологических исследований. Открытие Эльбрусской учебно-научной базы (УНБ) на Поляне Азау в 1969 г. способствовало продолжению снеголавинных исследований, начатых в 1957 г. под руководством Г.К. Тушинского. На протяжении почти 50 лет база служит местом проведения комплексных географических исследований и учебных практик студентов географического факультета университета.

За прошедший период в районе неоднократно случались зимы аномально высокой снежности, сопровождавшиеся лавинными катастрофами. Так, в декабре 1973 г. сошла одна из самых крупных лавин Приэльбрусья объёмом 1,2 млн м³ при толщине снега на линии отрыва 7,6 м [1]. В январе 1976 г. произошло обрушение «Иткольской» лавины, которая достигла автотрассы на дне долины и привела к гибели девяти человек. В рекордном по снежности 1986/87 г. на Кавказе и в Приэльбрусье толщина снежного покрова на дне долины достигала 3,5 м. Утром 9 января 1987 г. в ходе непрекращающегося снегопада на Чегетскую поляну обрушилась «Когутайская» лавина. При объёме 680 тыс. м³ она перекрыла обширную поляну площадью 20 тыс. м² и остановилась у восьмизэтажной гостиницы «Чегет» [2]. В настоящее время Чегетская поляна практически полностью застроена частными гостиницами, которые при очередном сходе лавины могут оказаться в зоне её разрушительного воздействия. В январе 1993 г. в верховьях Баксанской долины отмечен сход рекордного числа особо крупных лавин из свежеснежного покрова. Наибольший ущерб был нанесён лавинами левого, обычно малоснежного борта долины южной экспозиции. В результате разрушения высоковольтной линии электропередач район Приэльбрусья на протяжении семи дней оставался без электричества.

О понятии «снеголавиный режим»

Понятия «снеголавиный режим» или «лавиный режим», употребляемые часто как синонимы, носят в лавиноведении комплексный характер. В отечественной литературе это понятие было предложено В.Н. Аккуратовым [3], а впоследствии было развито в работах М.Ч. Залиханова [4] и Е.С. Трошкиной [5]. При составлении лавинных карт для Атласа снежно-ледовых ресурсов мира использован подход, разработанный сотрудниками географического факультета МГУ, который позволил дать характеристику лавинного режима малоизученных горных территорий [6]. Несмотря на востребованность термина в научных исследованиях, он не представлен в «Гляциологическом словаре» [7]. На наш взгляд, причины этого — смысловая трансформация термина при решении различных гляциологических

и инженерных задач, а также недостаток режимных наблюдений за лавинами во многих горных районах. Последнее обстоятельство ориентирует исследователей на поиск косвенных показателей снеголавиного режима в области корреляционных связей между ходом метеорологических элементов и обрушением лавин. На этапе становления термина вполне оправдана точка зрения, высказанная известным климатологом Г.В. Грузой: «...можно вводить новые определения. Необходимо только придерживаться их при описании результатов» [8, с. 53].

Исходя из имеющегося в распоряжении авторов материала многолетних наблюдений за лавинами, *под снеголавиным режимом мы понимаем характеристику текущего состояния условий снегонакопления и схода снежных лавин (генетические типы, повторяемость, размеры) и их изменение за определённый период времени.* Зимний сезон рассматривается в этом случае как первичная таксономическая единица при сравнительном анализе и выявлении изменений в снеголавином режиме.

Исходные данные

В основу работы положены материалы по регистрации и картографированию снежных лавин, полученные в ходе стационарных и маршрутных наблюдений в верховьях долины р. Баксан за 1967–2017 гг. Стационарные наблюдения вели на ключевом участке протяжённостью 4 км, где по обоим бортам долины выделено 32 лавинобора. Наибольшую угрозу представляет собой склон северной экспозиции хр. Чегет (абсолютная высота 3761 м; в статье везде приводится абсолютная высота), состоящий из серии деформированных ледниковых каров с обрывистыми скальными ригелями в средней части склона. В аномально снежные зимы соседние кары объединяются в единый очаг зарождения площадью до 130 га, формируя гигантскую снежную лавину объёмом свыше 1 млн м³. Разнообразие морфологических типов лавиноборов на ключевом участке делает его репрезентативным для высокогорной зоны Центрального Кавказа. Похожий рельеф отмечается на северном и южном макросклонах Главного хребта, который аналогично ведёт себя в условиях гидрометеорологических

аномалий. Маршрутные наблюдения по регистрации лавин в долине р. Баксан проводятся на участке Поляна Азау – город Тырныауз (протяжённость 50 км), когда процессом массового лавинообразования охвачена значительная часть территории речного бассейна.

Анализ факторов лавинообразования и климатических изменений в районе исследований выполнен по данным метеостанции Росгидромета (ГМС) Терскол (2141 м) и метеопоста (м/п) «Поляна Азау» (2326 м) Эльбрусской УНБ. Отметим, что ГМС Терскол в 1996 г. была перенесена в более холодное и затенённое место, что нарушило однородность ряда наблюдений. По этой причине климатический анализ по материалам ГМС Терскол выполнен с учётом норм, рассчитанных для двух периодов – до и после переноса станции в 1996 г.

Методика исследований

При регистрации лавин их размеры оценивались по четырёхбалльной шкале, используемой в практике отечественных и альпийских исследований. В её основу положена дальность выброса лавин:

«1» – небольшие лавины, которые останавливаются в лавиносборе или на склоне;

«2» – лавины средних размеров, останавливающиеся в пределах минеральных конусов выноса;

«3» – крупные лавины, перекрывающие минеральные конусы выноса;

«4» – особо крупные, часто катастрофические лавины, которые выходят за пределы минеральных конусов выноса.

В отдельные зимы при помощи фототеодолитного метода вели измерения объёмов лавин, площади зоны поражения, толщины снега на линии отрыва [1]. Генетические типы лавин выделены на основе учёта причин их обрушения: лавины из свежеснежного покрова; температурного сокращения; инсоляционные; адвекционные и весеннего снеготаяния [9]. В Приэльбрусье лавины температурного сокращения – крайне редкое явление, поэтому данный тип лавин мы не рассматриваем.

Для оценки климатических изменений использованы лавинно-индикационные показатели: снежность зим, месячный коэффициент аномалии осадков, сведения о температуре воздуха

(суточной, месячной, за холодный период). Под *снежностью* мы понимаем комплекс природных условий территории, определяющих залегание снежного покрова и изменение его толщины в зимний период. Снежность зим обычно выражают в абсолютных и относительных показателях, в соответствии с которыми выделяют мало-, средне- и многоснежные зимы, характеризующие фоновое распределение толщины снежного покрова на исследуемой территории. В настоящей работе деление зим по снежности оценивается по величине отклонения от многолетней нормы толщины снежного покрова за холодный период, измеряемой по стационарной снегомерной рейке на метеорологической площадке, которая расположена в центральной части Поляны Азау:

$$A = (h_i/h)100\%, \quad (1)$$

где A – аномалия снежности, %; h_i – средняя толщина снежного покрова конкретной зимы, рассчитанная по среднедекадным значениям, см; h – среднемноголетняя толщина снежного покрова за холодный период, см.

Зима считается малоснежной, если величина A составляет менее -30% , среднеснежной $-30\% \leq A < 30\%$, многоснежной $30\% \leq A < 60\%$, аномально снежной $A \geq 60\%$. Величина отклонения 30% близка к коэффициенту вариации для межгодовой изменчивости толщины снежного покрова, рассчитанной по большому числу ГМС. Предложенный подход согласуется с известной методикой Н.Н. Галахова для равнинных территорий [10], удобен для статистической обработки больших массивов данных и выявления экстремально снежных зим.

Другой лавинно-индикационный показатель – *месячный коэффициент аномалии осадков* K_m . В большинстве горных районов мира, в том числе и на Кавказе, наиболее опасны лавины из свежеснежного покрова, на долю которых приходится до 70% всех сходящих лавин [6]. Особо крупные лавины объёмом свыше $0,5$ млн m^3 в основном относятся к лавинам из свежеснежного покрова, которые возникают в результате продолжительных обильных снегопадов. Один из индикаторных показателей этого класса лавин – *суточные величины осадков* интенсивностью $20, 30, 40$ мм/сут и более. Статистическая оценка этого показателя требует обширной базы суточных данных. В работе использован относительный

показатель — месячный коэффициент аномалии осадков, который рассчитывается по доступным среднемесячным данным:

$$K_M = \sum x_i / \sum X_{\text{ср.хол.п.}} \quad (2)$$

где $\sum x_i$ — сумма осадков i -го месяца; $\sum X_{\text{ср.хол.п.}}$ — среднее многолетнее количество осадков холодного периода (согласно рекомендациям ВМО норма осадков рассчитывается за 30-летний период 1960–1990 гг.).

На примере Приэльбрусья установлено, что коэффициент, соответствующий двукратной месячной норме осадков $K_{\text{м.кр}}$, служит индикатором схода особо крупных лавин. Эта критическая величина осадков зависит от продолжительности холодного периода и рассчитывается по формуле

$$K_{\text{м.кр}} = 2 \sum X_{\text{ср.хол.п.}} / N, \quad (3)$$

где $K_{\text{м.кр}}$ — критический коэффициент аномалии осадков; N — число месяцев в холодном периоде.

Анализ 42 зимних месяцев в Приэльбрусье (Центральный Кавказ) и Архызе (Западный Кавказ) с аномально высокими осадками показал, что 75% их месячного количества выпадает в течение 4–5 дней в пределах единого синоптического периода или одного интенсивного снегопада. Из этого следует, что в месяц с критическим коэффициентом осадков наиболее вероятно наличие обильного снегопада с приростом более 1 м снега за 4–5 дней. Таким образом, физический смысл коэффициента состоит в том, что он характеризует не только распределение осадков по месяцам, но и внутри месяца, что наиболее интересно для лавиноведения. Расчёт показывает, что в Приэльбрусье при норме осадков 282 мм (за период 1962–1991 гг.) и продолжительности холодного периода, равной пяти месяцам (XI–III), $K_{\text{м.кр}} = 112$ мм. На Западном Кавказе на ГМС Клухорский перевал (2037 м) при норме 737 мм (1960–1990 гг.) и таком же пятимесячном холодном периоде $K_{\text{м.кр}} = 295$ мм. Отметим, что критический коэффициент характеризует осадки, близкие к пороговому значению при обрушении особо крупных лавин, поэтому в него может вноситься региональная эмпирическая поправка. Для оценки линейных трендов в изменении температуры воздуха использованы сведения о среднесуточной, среднемесячной и средней за холодный период температуре.

Результаты исследований

Как уже отмечалось, снежность — один из ключевых показателей, определяющих лавинный облик зим. В современных климатических условиях величина снежности в значительной мере зависит от соотношения тепла и влаги на протяжении холодного периода. Так, в Альпах в диапазоне высот 500–1000 м в виде снега выпадает от 5 до 25% осадков, а в диапазоне 2000–2500 м — от 60 до 77% [11]. На Кавказе из-за его более южного положения содержание твёрдых осадков на соответствующих высотах меньше по сравнению с Альпами. Наиболее яркий пример влияния температурного фактора на снежность — Красная Поляна, где, согласно данным одноименной ГМС (550 м), многоснежные зимы на дне долины формируются в диапазоне осадков холодного периода 358–1113 мм в зависимости от более высокой или низкой температуры холодного периода (XII–II).

Снежность обычно рассматривают в сочетании с другими факторами лавинообразования, поскольку сведений об одной снежности недостаточно для оценки лавинного потенциала зим. Это подтверждают результаты многолетних натурных наблюдений в Приэльбрусье. Согласно принятым критериям, в районе исследований за период 1962–2017 гг. отмечено четыре аномально снежных зимы ($A \geq 60\%$, рис. 1), но только две из них (1967/68 и 1986/87 гг.) сопровождались сходом разрушительных по размеру лавин. Для более точной диагностики лавинной опасности зим существует другой метод, основанный на соотношении температуры воздуха и осадков за холодный период [12]. Данный метод позволяет среди многоснежных зим устанавливать те сезоны, которые сопровождаются массовым сходом катастрофических лавин. Для района Приэльбрусья такие исследования выполнены авторами ранее [12]. На рис. 1 маркерами в виде стрелок отмечены годы схода катастрофических лавин (1967/68, 1975/76, 1986/87, 1992/93 гг.).

Как видно из приведённого перечня, к уже выделенным сезонам аномально высокой снежности можно добавить 1975/76 и 1992/93 гг., которые не имели аномально высокого снегонакопления, но отличались низкими температурами воздуха на протяжении большей части зимы. Такие зимы обычно относят к категории суро-

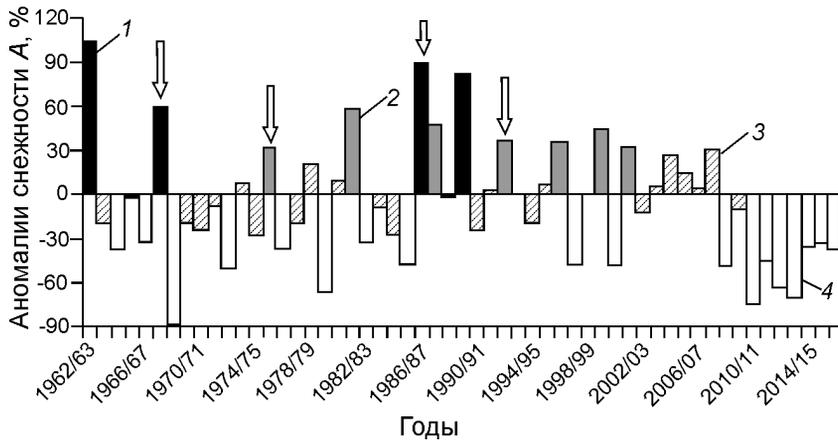


Рис. 1. Аномалии снежности зим (A , %) на ГМС Терскол (2141 м) за период 1962–2017 гг.:

1 – аномально снежные; 2 – много-снежные; 3 – среднеснежные; 4 – мало-снежные; см. текст

Fig. 1. Anomalies of winters' snowiness (A , %) at Terskol meteorological station (2141 m) for the period 1962–2017:

1 – abnormally snowy; 2 – heavy snowy; 3 – medium snowy; 4 – low snowy; see text

вых. Они сопровождаются интенсивными мете- лями и холодными снегопадами, которые спо- собствуют формированию неустойчивых масс снега на горных склонах и, как следствие, обру- шению особо крупных пылевых лавин. Именно такие лавины сходили в 1975/76 и 1992/93 гг.

В Приэльбрусье повторяемость зим разной снежности имеет следующее распределение: аномально снежные 7%; многоснежные 13%; сред- неснежные 45%; малоснежные 35% (см. рис. 1) В многолетнем осреднении каждая пятая зима относится к группе многоснежных (при объеди- нении первых двух групп). Повторяемость мно- госнежных и аномально снежных зим по деся- тилетиям выглядит следующим образом (число зим): 1960-е годы – 2; 1970-е – 1; 1980-е – 4; 1990-е – 3; 2000-е – 2; 2010-е – 0. Обращает на себя внимание серия из шести малоснежных зим в последнем десятилетии. Такой длитель- ной отрицательной аномалии в снежности зим не отмечалось за весь период метеонаблюдений. В последние годы в результате ослабления меж- широтного градиента температуры воздуха на Кавказе участились случаи блокирующих ситуа- ций в циркуляции атмосферы. Они сопровожда- ются формированием продолжительной и одно- типной по режиму погоды. Так, зимой 2016/17 г. на протяжении трёх месяцев – с середины дека- бря до середины марта – стояла ясная антици- клональная погода с кратковременным выпадением незначительных осадков. В целом с начала 1990-х годов в исследуемом районе Централь- ного Кавказа наметилась явная тенденция к умень- шению снежности зим. Об этом свидетельствуют как интегральный показатель средnezимней тол- щины снежного покрова, так и отсутствие по-

ложительных флуктуаций в снегонакоплении, когда за последние 25 лет не было отмечено ни одной аномально снежной зимы.

В отличие от интегрального показателя снежности, отражающего межсезонные изме- нения лавинного режима, другой показатель – коэффициент аномалии осадков – характеризу- ет изменения на уровне месяцев. К достоинству коэффициента относится наглядность в отобра- жении экстремальных осадков. По результатам стационарных наблюдений в Приэльбрусье во второй половине XX в. аномальные осадки, со- ответствующие $K_{м.кр}$, чаще всего наблюдались в январе и в 80% случаев приводили к сходу ката- строфических лавин. Именно январь как самый холодный месяц представляет собой наиболь- шую потенциальную угрозу при обрушении особо крупных лавин, которая обусловлена зна- чительными приростами свежевыпавшего снега в очагах зарождения лавин (4 м и более) и обра- зованием на склонах особого типа снега в виде «снежных досок».

В середине 1990-х годов режим выпадения осадков изменился и обильные январские снего- пады стали редким явлением. По данным ГМС Терскол (2141 м), повторяемость таких снего- падов в январе 1955–1992 гг. составляла 15%, а в последующий период 1993–2016 гг. – 4%. На Западном Кавказе по данным ГМС Клухорский перевал (2037 м) за те же периоды она составля- ет 11% и 0% соответственно (рис. 2). Таким об- разом, январь, «лишившись» обильных снегопа- дов в последние два десятилетия, перестал быть самым грозным лавинным месяцем.

Второй период, в котором произошли изме- нения в режиме выпадения осадков, – март. На

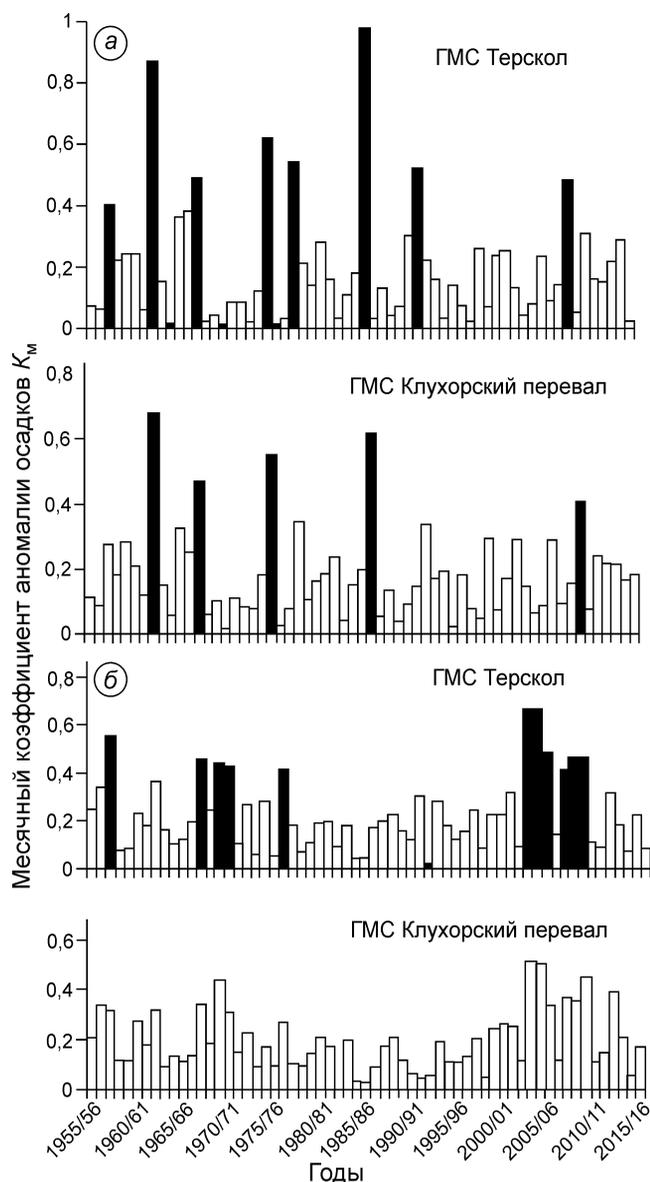


Рис. 2. Повторяемость месячного коэффициента аномалии осадков K_M на Центральном Кавказе (ГМС Терскол) и Западном Кавказе (ГМС Клухорский перевал) в 1955–2017 гг.:

a – январь; *б* – март (чёрным цветом выделены критические значения K_M более 0,4)

Fig. 2. Recurrence of monthly coefficient of precipitation anomaly K_M in the Central Caucasus (Terskol meteorological station) and the Western Caucasus (Klukhorsk Pass meteorological station) from 1955–2017:

a – January; *b* – March (highlighted critical values K_M more than 0.4)

горнолыжных курортах Кавказа в 1980–90-е годы март всегда считался «бархатным сезоном» с обилием солнечных дней и умеренными непродолжительными снегопадами, которые обеспечива-

ли комфортное горнолыжное катание по мягким заснеженным склонам. В 2000-е годы мартовская погода претерпела существенные изменения. На протяжении целого ряда зим в марте всё чаще стали отмечаться интенсивные снегопады и метели. Если, за 20-летний период (1980–2000) в марте в Приэльбрусье ни разу не было отмечено интенсивных снегопадов с приростом снега более 1 м, то в последнее десятилетие наблюдается явный всплеск аномальных осадков (см. рис. 2). На Западном Кавказе ситуация выглядит ещё более контрастной: на ГМС Клухорский перевал за 50-летний период наблюдений в марте был отмечен лишь один случай с критическим коэффициентом аномалий осадков (1969/70 г.), а за последние годы таких случаев было три – 2003/04, 2004/05, 2009/10 гг. (см. рис. 2). Анализ изменчивости лавинно-индикационных показателей на примере месячного коэффициента аномалии осадков указывает на заметную трансформацию климатических характеристик на рубеже XX–XXI в., которые относятся к важным показателям в режиме лавинообразования.

Следующий фактор, повлиявший на изменение лавинного режима, – температура воздуха. Температурный фон зимы во многом определяет интенсивность процессов перекристаллизации снега и общее направление в развитии снежной толщи – по типу разрыхления или уплотнения. В высокогорной зоне Центрального Кавказа в тёплые зимы преобладающее развитие в снежной толще получают процессы уплотнения, которые ведут к стабилизации снега на склоне и общему ослаблению лавинной активности. В холодные зимы, напротив, доминируют процессы разрыхления, которые усиливают структурно-стратиграфические неоднородности снежной толщи, способствуют образованию лавиноподобных слоёв из слабосвязного снега, что в итоге снижает устойчивость снежной массы на склоне.

Наиболее заметные изменения в зимней температуре воздуха приходятся на 2009/10–2016/17 гг. В короткий отрезок времени отмечены новые климатические экстремумы: тёплый в 2009/10 г. ($-3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) и холодный в 2011/12 г. ($-7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). В Приэльбрусье амплитуда межсезонных колебаний температуры воздуха увеличилась на 20% по сравнению с предшествующим периодом наблюдений (1970–2010 гг.). В результате адвекции тёплых воздушных масс в середи-

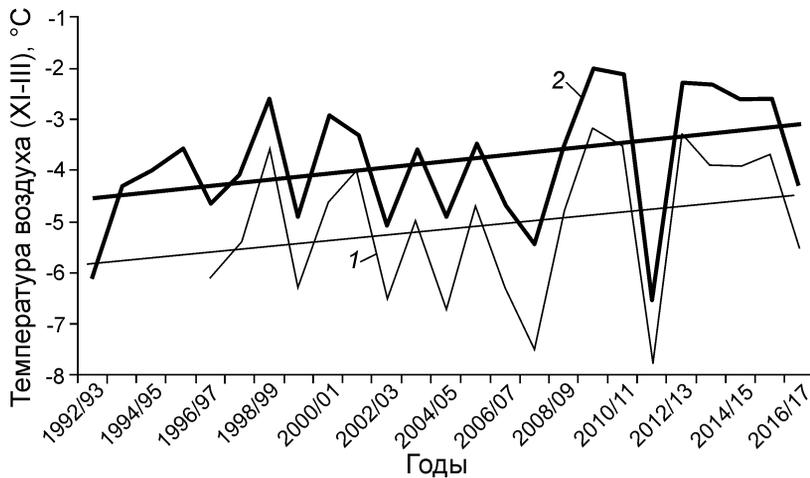


Рис. 3. Изменения температуры воздуха и линейные тренды за холодный период (ноябрь–март) по данным ГМС Терскол (1) и м/п «Поляна Азау» (2) за 1993–2017 гг.

Fig. 3. Linear trend of air temperature change during the cold period (XI–III) at Terskol meteorological station (1) and «Azau meteorological post» (2) 1993–2017

не зимы стали наблюдаться глубокие оттепели продолжительностью в несколько дней. По данным наблюдений на Эльбрусской УНБ в декабре–январе отмечены случаи выпадения жидких ливневых осадков до высоты 3000 м.

Особенность температурного режима последнего десятилетия – продолжительная серия аномально тёплых зим – 2009/10, 2010/11, 2012/13, 2013/14, 2014/15 гг., для которых температурная норма была превышена на величину среднего квадратического отклонения ($\sigma = 1,1$ °C), рассчитанного за период 1962–1991 гг. (рис. 3). Вызывает интерес вклад различных месяцев холодного периода в происходящие изменения. Как показал анализ, эти изменения за 1996–2016 гг. носят разнонаправленный характер (рис. 4). В декабре отмечена тенденция к снижению температуры воздуха, тогда как в январе, феврале и марте, напротив, наблюдается её повышение. На м/п «Поляна Азау», расположенном на более освещённом солнцем участке по сравнению с ГМС Терскол, отмеченные закономерности выражены ещё ярче.

При характеристике лавинного режима района исследований основное внимание уделялось статистике схода крупных и катастрофических лавин (градации размеров «3» и «4»), с которыми связаны главные проблемы при освоении горных территорий. В ходе стационарных снеголавинных наблюдений во второй половине XX в. все случаи обрушения особо крупных лавин в верховьях Баксанской долины были связаны именно с обильными снегопадами [13]. Тенденция к уменьшению числа крупных лавин наиболее отчётливо проявилась в последнем десяти-

летии (рис. 5). Если в 2000–2010 гг. на участке детальных наблюдений среднее число сошедших за зиму лавин составляло 12, то после 2010 г. эта цифра уменьшилась в 3 раза – до четырёх лавин. В 2015/16 г. со склонов Чегетского массива не сошла ни одна крупная лавина – единственный случай за всё время наблюдений с 1968 г.

С 1981 г. в Приэльбрусье Северо-Кавказская служба по активным воздействиям стала проводить обстрел склонов для предупредительного спуска снежных лавин. Эти мероприятия уменьшили опасность обрушения лавин неконтролируемых размеров, но не исключили их полностью. Так, в декабре 2001 г., спустя несколько дней после обстрела склонов северного массива горы Чегет, из ледниковых каров № 9 и 10 (по кадастру МГУ) сошла лавина объёмом 700 тыс. м³ [14], которая разрушила несколько пролётов высоковольтной линии электропередач, уничтожила 9 га взрослого хвойного леса и привела к длительной остановке работы горнолыжного комплекса на склонах Эльбруса.

Фактор активных воздействий безусловно отражается на естественной статистике схода особо крупных лавин, но не вносит принципиальных изменений в оценку тенденций лавинообразования. Согласно принятому в работе определению снеголавинного режима, эта оценка даётся по результатам анализа двух массивов информации – непосредственных данных о сходе лавин и сопутствующих им снежно-метеорологических условий. В экстремальной ситуации обстрел склонов в горной долине снижает степень лавинной угрозы, но не может повлиять на развитие атмосферных процессов, формиру-

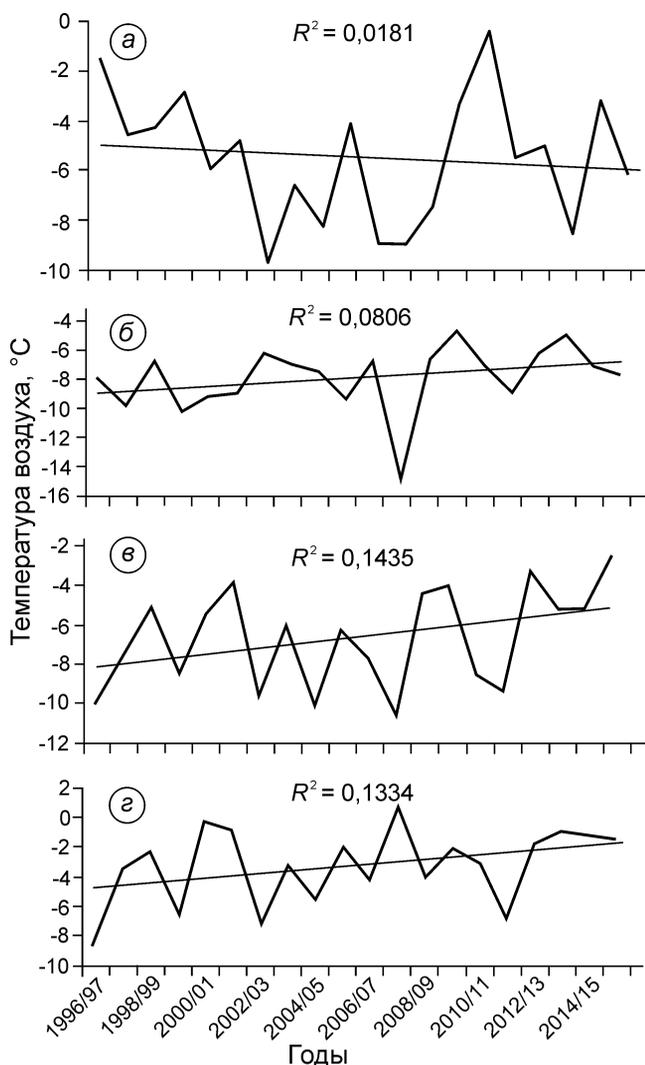


Рис. 4. Линейные тренды изменения температуры воздуха за отдельные месяцы на ГМС Терскол за 1996–2016 гг.:

а – декабрь; *б* – январь; *в* – февраль; *г* – март

Fig. 4. Linear trend of air temperature change at Terskol meteorological station for 1996–2016:

a – December; *б* – January; *в* – February; *г* – March

ющих гидрометеорологическую аномалию в обширном горном регионе. Именно поэтому при оценке тенденций в изменении лавинного режима особое место отводится анализу лавинно-индикационных показателей, имеющих тесную связь со сходом лавин.

Типичная картина лавинообразования в последние зимы – пик лавинной активности, приходящийся на конец зимнего сезона. В общем балансе лавин разных генетических типов по-прежнему сохраняется доминирование лавин из свежеснежавшего снега, но при этом наметилась тенденция увеличения числа лавин, связанных с воздействием теплового фактора – адвекционных и весеннего снеготаяния. Этот тип лавин имеет меньшую дальность выброса и зону поражения по сравнению с лавинами из свежеснежавшего снега. Однако, выходя за пределы минеральных конусов выноса, они также представляют собой значительную угрозу для жизни людей и инженерных сооружений.

Заключение

Результаты выполненных исследований показывают заметные изменения в режиме лавинообразования на Центральном Кавказе, что обусловлено быстрыми темпами преобразования климата на рубеже XX–XXI вв. Эти изменения проявились в уменьшении снежности зим, изменении режима выпадения интенсивных осадков, росте повторяемости аномально тёплых зим, увеличении внутри- и межсезонной изменчивости температуры воздуха. Так, уменьшение снежности зим привело к общему ослаблению лавинной опасности и сокращению числа особо круп-

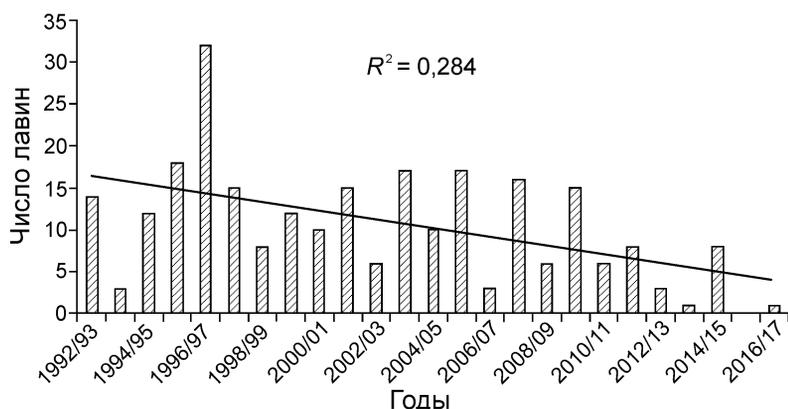


Рис. 5. Линейный тренд изменения суммарного числа лавин с индексом размера «3» и «4» в Приэльбрусье за 1992–2017 гг.

Fig. 5. The linear trend of the change in the total number of avalanches with an index of size «3» and «4» in the Elbrus region for 1992–2017

ных лавин, выходящих на днище горной долины. Этот класс лавин особо опасен для населённых пунктов и рекреационно-промышленной инфраструктуры горного района (линии электропередач, газопроводы, автотрассы, канатные дороги). За последние 20 лет в бассейне р. Баксан не было ни одного случая массового обрушения особо крупных лавин, которые бы охватывали оба борта долины. Наиболее типичная картина лавинообразования в современный период — нарастание активности небольших по размеру лавин к концу сезона. Снижение уровня лавинной опасности в 2000-е годы сопровождалось массовой застройкой района Приэльбрусья объектами рекреационного назначения, часть из которых была размещена на лавиноопасных участках и в будущем может быть подвергнута разрушению.

Ещё один фактор, сыгравший важную роль в сокращении числа особо крупных лавин, — изменение режима в выпадении интенсивных осадков. Во второй половине XX в. затяжные обильные снегопады чаще всего приходились на самый холодный месяц зимы — январь. Однако на рубеже XX—XXI вв. произошло смещение интенсивных январских осадков. Если в холодных условиях января такие снегопады сопровождались сходом гигантских лавин из сухого снега, которые характеризуются наибольшей разрушительной силой и дальностью выброса, то в более тёплых условиях марта и апреля их разрушительный потенциал существенно снизился. Лавины марта, состоящие из более плотного и вязкого снега, и лавины апреля из влажного и мокрого снега, имея меньшую скорость и дальность выброса, имеют меньший поражающий эффект. Таким образом, январь, с которым в XX в. были

связаны самые крупные лавинные катастрофы, в первые два десятилетия XXI в. перешёл в разряд относительно спокойного лавинного месяца.

Происходящие в настоящее время изменения температуры воздуха оказывают более сложное влияние на общий процесс лавинообразования. Так, потепление, сопровождающееся ростом повторяемости аномально тёплых зим в сочетании с уменьшением их снежности, ведёт к сокращению числа крупных лавин и ослаблению лавинной опасности. Нарастание внутрисезонной изменчивости температуры воздуха привело к появлению глубоких оттепелей в середине зимы с выпадением жидких осадков, вплоть до ливневых. В результате в высокогорной зоне Центрального Кавказа в этот период стали сходить адвекционные лавины из влажного снега, чего ранее не наблюдалось. Одновременно на фоне потепления наблюдается нарастание межсезонной изменчивости температуры воздуха. Происходящие изменения можно сравнить с потеплением в 1910—1945 гг., когда в его самую тёплую фазу была отмечена одна из самых суровых зим в Европе — 1941/42 г. На современном этапе, который сопровождается высокой изменчивостью климата с возвратами зимних холодов, возможно появление суровой и снежной зимы с катастрофическими лавинными последствиями. Это — один из вероятных сценариев в развитии лавинной деятельности на Большом Кавказе на фоне происходящих изменений климата.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 16-05-00525.

Acknowledgments. This work was supported by RFBR project № 16-05-00525.

Литература

1. Золотарев Е.А. Изучение снега и лавин в Приэльбрусье фотограмметрическим методом // Лавины Приэльбрусья. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 47–62.
2. Володичева Н.А., Золотарев Е.А., Ефремов И.Ю., Миронова Е.М., Олейников А.Д. Применение численного моделирования для описания движения снежных лавин // МГИ. 1990. Вып. 69. С. 19–23.
3. Аккуратов В.Н. Понятие о лавинном режиме // Всес. совещание по изучению

References

1. Zolotarev E.A. Studies of snow and snow avalanches in the Elbrus region by photogrammetry. *Laviny Prielbrusia*. Snow avalanches in the Elbrus region. Moscow: Moscow State University, 1980: 47–62. [In Russian].
2. Volodicheva N.A., Zolotarev E.A., Efremov I.U., Mironova E.M., Oleynikov A.D. The application of numerical simulation for the description of snow avalanches motion. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1990, 69: 19–23. [In Russian].
3. Akkuratov V.N. The snow avalanche regime. *Vsesoyuznoe soveshchanie po izucheniyu protsessov formirovaniya i skhoda lavin: Tezisy*

- процессов формирования и схода лавин: Тез. докл. Ташкент, 1963. С. 2.
4. *Залиханов М.Ч.* Снежно-лавиный режим и перспективы освоения гор Большого Кавказа. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1981. 376 с.
 5. *Трошкина Е.С.* Лавинный режим горных территорий СССР // Итоги науки и техники. Сер. Гляциология. 1992. Т. 11. 185 с.
 6. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира: Т. 2. Кн. 1 / Ред. В.М. Котляков. М.: изд. Российской академии наук, 1997. 263 с.
 7. Гляциологический словарь / Ред. В.М. Котляков. Л., Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
 8. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 50–66.
 9. *Аккуратов В.Н.* Генетическая классификация лавин // Тр. Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции: Т. 1: Нальчик, 1959. С. 215–233.
 10. *Галахов Н.Н.* Выделение типов зим по высоте и динамике снежного покрова на большей части территории СССР // Роль снежного покрова в природных процессах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 11–26.
 11. *Котляков В.М.* Снежный покров Земли и ледники. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 479 с.
 12. *Олейников А.Д.* Снежные лавины на Большом Кавказе в условиях общего потепления климата // МГИ. 2002. Вып. 93. С. 67–72.
 13. *Урумбаев Н.А.* Лавинный режим Приэльбрусья // Тр. ВГИ. Физика снега и снежные лавины. Вып. 46. М.: Гидрометеиздат, 1980. С. 13–20.
 14. *Олейников А.Д., Володичева Н.А.* Об увеличении лавинных катастроф в районах деградации горного оледенения // МГИ. 2005. Вып. 99. С. 89–93.
 - dokladov.* The All-Union Conf. on study of the processes of formation and occurrence of snow avalanches. Theses of reports. Tashkent, 1963: 2. [In Russian].
 4. *Zalixanov M.Ch. Snezhno-lavinniye rezhim i perspektivy osvoyoeniya gor Bolshogo Kavkaza.* The snow-avalanche regime and prospects for the development of the Greater Caucasus Mountains. Rostov-on-Don: Rostov State University, 1981: 376 p. [In Russian].
 5. *Troshkina E.S.* The snow avalanche regime of the mountain regions of the USSR. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Glyatsiologiya.* The Outcomes of Science and Technology. Glaciology series. 1992, 11: 185 p. [In Russian].
 6. *Atlas snezhno-ledovykh resursov mira: T. 2. Kn. 1.* World Atlas of Snow and Ice Resources. V. 2. Is. 1. Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 263 p. [In Russian].
 7. *Glyatsiologicheskii slovar'.* Glaciological Glossary. Ed. V.M. Kotlyakov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 528 p. [In Russian].
 8. *Gruza G.V., Ranykova E.Ya.* Detection of climate change: the state, variability and extremes of the climate. *Meteorologiya i gidrologiya.* Meteorology and Hydrology. 2004, 4: 50–66. [In Russian].
 9. *Akkuratov V.N. Geneticheskaya klassifikatsiya lavin.* Genetic classification of avalanches. *Trudy Elbrusskoy vysokogornoy kompleksnoy ekspeditsii: V. 1.* The Works of the High Altitude Multipurpose Elbrus Expedition. V. 1. Nalchik, 1959: 215–233. [In Russian].
 10. *Galakhov N.N. Vydelenie tipov zim po vysote i dinamike snezhnogo pokrova na bolshey chasti territorii SSSR.* Detection of winter types by depth and dynamics of snow cover across the majority of USSR territory. *Rol' snezhnogo pokrova v prirodnykh protsessakh.* The role of snow cover in natural processes. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1961: 11–26. [In Russian].
 11. *Kotlyakov V.M. Sneghnyi pokrov Zemli i ledniki.* Snow cover of the Earth and glaciers. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968: 479 p. [In Russian].
 12. *Oleynikov A.D.* Snow avalanches in the Bolshoy Caucasus in the conditions of general climate warming. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 2002, 93: 67–72. [In Russian].
 13. *Urumbaev N.A.* The snow avalanche regime in the Elbrus Region. *Trudy VGI. Proc. of the High mountain Geophysical Institute.* Physics of snow and snow avalanches. Moscow: Gidrometeoizdat, 1980, 46: 13–20. [In Russian].
 14. *Oleynikov A.D., Volodicheva N.A.* On the increase of snow avalanche catastrophes in the areas of degradation of the mountain glaciation. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 2005, 99: 89–93. [In Russian].