

## Метеорологические условия экстремального лавинообразования в горах Кавказа по данным наблюдений и реанализов

© 2021 г. Н.Е. Куксова<sup>1\*</sup>, П.А. Торопов<sup>1,2</sup>, А.Д. Олейников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*kuksova\_97@mail.ru

## Meteorological conditions of extreme avalanche formation in the Caucasus Mountains (according to observations and reanalysis)

N.E. Kuksova<sup>1\*</sup>, P.A. Toropov<sup>1,2</sup>, A.D. Oleinikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; <sup>2</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*kuksova\_97@mail.ru

Received May 17, 2021 / Revised June 15, 2021 / Accepted June 25, 2021

**Keywords:** *snow avalanches, avalanche danger, reanalysis data, station data, synoptic conditions of extreme avalanche origin.*

### Summary

The possibility of using the data of modern ERA-Interim, CFSR and NCEP-NCAR re-analyses to assess an avalanche danger in the mountains of the North Caucasus is considered. Previously, the mean seasonal values of the surface air temperature and seasonal precipitation amounts obtained from the reanalysis archives were compared with the data of meteorological stations. The mean temperature of the cold period (November–March) was best reproduced by the ERA-Interim reanalysis: the correlation coefficients amounted to 0.8–0.9, and the average deviation from the station data  $\pm 1.7$  °C. The accuracy of measurements of precipitation is lower, but the magnitude of the errors does not exceed the limits of inter-seasonal variability. To estimate the avalanche hazard, a correlation matrix was used based on the relationship of the avalanche hazard indicator with the standard deviations of seasonal values of temperature and precipitation. The ERA-Interim reanalysis reproduces the avalanche danger in the North Caucasus most adequately (71% of coincidences with the actually observed events). Synoptic processes which may promote formation of catastrophic avalanches in the North Caucasus were also determined. The most typical situation is the position of a high-level cyclone over the Eastern Europe, accompanied by the invasion of cold air masses from Scandinavia that activates cyclogenesis in the Mediterranean. It was found that the extreme avalanche hazards occurred at negative anomalies of mean seasonal air temperature near the ground and in the middle troposphere (about 1.5–2 °C) when the integral water content of the atmosphere was close to the norm.

**Citation:** Kuksova N.E., Toropov P.A., Oleinikov A.D. Meteorological conditions of extreme avalanche formation in the Caucasus Mountains (according to observations and reanalysis). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (3): 377–390. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421030095.

Поступила 17 мая 2021 г. / После доработки 15 июня 2021 г. / Принята к печати 25 июня 2021 г.

**Ключевые слова:** *снежные лавины, лавинная опасность, данные реанализов, синоптические условия экстремального лавинообразования.*

Рассмотрена возможность использования данных современных реанализов ERA-Interim, CFSR и NCEP-NCAR для оценки лавинной опасности в горах Северного Кавказа, которые предварительно сравнивали с материалами метеорологических станций (средние сезонные значения приземной температуры и осадков). Для расчёта лавинной опасности использовалась корреляционная матрица, основанная на связи показателя лавинной опасности со стандартными отклонениями сезонных значений температуры и осадков. Установлены синоптические процессы, способствующие формированию катастрофических лавин. Показано, что аномально высокая лавинная опасность возникает при отрицательной аномалии температуры воздуха у земли и на высотах при близком к норме интегральном влагосодержании атмосферы.

### Введение

В связи с изменениями климата в настоящее время особое внимание уделяется прогнозу крупных и долгоживущих аномалий метеорологического режима, провоцирующих спектр опас-

ных природных процессов, нередко проявляющихся в горных районах [1]. Среди них особое место занимает массовый сход крупных снежных лавин, который в отдельные годы может приобретать характер стихийного бедствия и длительное время блокировать крупные райо-

ны. Интерес вызывает не только анализ реализовавшихся событий, но и прогноз повторяемости гидрометеорологических условий, способствующих их возникновению в условиях меняющегося климата. Первый этап реализации такой задачи – оценка качества численного моделирования метеорологических условий уже случившихся опасных природных явлений на основе сравнения с данными наблюдений.

Несмотря на очевидность связи между метеорологическим режимом и лавинной опасностью, её оценка и тем более прогноз сталкиваются со значительными трудностями. Именно поэтому оперативный прогноз схода лавин [2], а также анализ уже прошедших лавинных событий сводятся либо к модельным расчётам на конкретном лавиносборе [3], либо к обобщённым оценкам метеорологических условий повышенной лавинной опасности в соответствующем горном регионе [4], основанным на простых регрессионных связях с количеством осадков. Глобальные численные модели атмосферы активно совершенствуются, однако пока они не могут воспроизвести основные гидрометеорологические величины в конкретном месте в условиях сложного рельефа с точностью, необходимой для использования полных лавинных моделей типа RAMMS [5].

Поэтому более перспективный вариант – попытка использования такого лавиноиндикационного показателя, который даст фоновую и вместе с тем физически обоснованную информацию о лавинной опасности, обобщённую по всему горному региону. В качестве такого показателя предлагается использовать *характеристику типа зим по температуре воздуха и осадкам за холодный период*. Соотношение этих двух метеорологических элементов определяет ведущий фактор лавинообразования – *снежность зим*, который содержит косвенную информацию о физических процессах развития снежной толщи (по типу разрыхления или уплотнения). Основание для реализации такого подхода – тесная связь между определёнными типами зим и экстремальными лавинными ситуациями, которая установлена по данным 41 метеорологической станции (ГМС) Большого Кавказа и материалам натуральных наблюдений за сходом снежных лавин [6].

В настоящей работе выполнена оценка воспроизводимости экстремальных лавинных зим на Кавказе с 1968 г. до настоящего времени на

основе результатов численного моделирования атмосферы (реанализов). Прежде всего речь идёт о воспроизведении моделями сезонных значений температуры воздуха и осадков, определяющих степень лавинной опасности зим. Полученные модельные данные сравниваются с расчётами, выполненными на основе данных ГМС. Результаты сравнения позволяют определить применимость модельных данных для оценки лавинной опасности. Выполнен также анализ циркуляционных механизмов, способствующих формированию крупных и катастрофических лавин.

### Данные и методы

**Основные методы оценки лавинной опасности по крупному горному региону.** Обобщённые лавинные характеристики по отдельно взятому горному региону использовались во многих отечественных исследованиях. Такой подход, в частности, применён в работе [7], где была сделана попытка оценить лавинную опасность к середине XXI в. для горных территорий Евразии. Прогностическими данными служили результаты расчётов глобальной климатической модели GFDL Model, которые выполняли в рамках протокола IPCC [8]. На примере многоснежного района Камчатки показано уменьшение лавинной активности, в то время как для малоснежных горных территорий (на примере Тянь-Шаня) прогнозируется её увеличение. В работе [9] такие же тенденции для много- и малоснежных горных систем установлены для всех основных горных районов земного шара. Так, на Кавказе прогнозируется уменьшение толщины снежного покрова, продолжительности лавиноопасного периода и повторяемости лавиноопасных ситуаций [10].

Значительный вклад в разработку лавиноиндикационных показателей был сделан при создании карт для Атласа снежно-ледовых ресурсов мира (АСЛРМ) [11]. Ряд этих показателей использовался для оценки долгосрочного прогноза лавинной опасности горных территорий Евразии [9]. В качестве прогнозируемых оценивались такие параметры, как число лавиноопасных ситуаций за сезон, число ситуаций со сходом особо крупных лавин, продолжительность

лавинноопасного периода и тенденции в изменении лавинной активности. В методическом томе АСЛРМ рассмотрена применимость составленных лавинных карт, в частности, подчёркивается, что они отражают фоновую лавинную опасность и не могут применяться к отдельно взятым лавиносорам [11]. В настоящей работе используется лавиноиндикационный показатель, который предназначен для характеристики фоновой лавинной опасности крупного горного региона именно в отдельные зимние сезоны.

Важнейшее значение в лавинообразовании имеет фактор атмосферной циркуляции, определяющий температурно-влажностный режим горного региона, поэтому один из наиболее простых и давно используемых подходов – прямое сопоставление лавинных событий с типичными синоптическими процессами. В работе [12] с помощью типизации синоптических процессов, разработанной для Средней Азии [13], показано, что чаще всего сход снежных лавин на Западном Тянь-Шане сопровождается выходом южных циклонов и холодными вторжениями.

Широкое применение получило использование типизации Б.Л. Дзержевского, согласно которой всё многообразие синоптических процессов делится на элементарные циркуляционные механизмы (ЭЦМ) [14]. Всего насчитывается 19 таких механизмов, из них четыре ЭЦМ провоцируют обильные зимние осадки на Северном Кавказе: *13з*, *8зз*, *11а*, *12а*. Механизм *13з* характеризуется сибирским чрезвычайно крупным антициклоном, который занимает большую часть Евразии; циклоническая деятельность при этом активизируется над Арктикой и Средиземноморским регионом. При реализации ЭЦМ *8зз* сибирский антициклон не распространяет своё влияние на Западную Европу, которая находится в области пониженного давления. При ЭЦМ *11а* сибирский и азорский антициклоны выражены ярче обычного и занимают большую площадь по сравнению со средней многолетней, при этом Черноморско-Каспийский регион оказывается в перемячке низкого давления, которая соответствует активизации циклонической деятельности на полярном фронте над восточной частью Средиземного моря. ЭЦМ *12а* в общих чертах описывает выход средиземноморского циклона на Чёрное море и блокирование его антициклоном на юге Европейской террито-

рии России, что увеличивает продолжительность осадков над Кавказом [15].

Другой подход основан на анализе корреляционных связей лавинных событий с широко известными циркуляционными индексами – NAO, AMO и др. Например, в работе [16] с помощью корреляционного анализа проанализированы связи нескольких циркуляционных индексов с температурой и осадками в Северо-Кавказском регионе. Выявлены значимые положительные коэффициенты корреляции между показателями лавинной опасности и давлением в области арктического антициклона, причём в высокогорьях эта связь более значима, а в долинах – менее значима. К основным недостаткам перечисленных методов оценки фоновой лавинной опасности по крупному горному региону относятся их качественный характер и слабое обоснование физических механизмов полученных связей.

В настоящей работе используется методика, позволяющая на основе соотношения средней температуры воздуха и суммы осадков за холодный период диагностировать лавинную опасность [6] и выявлять суровые многоснежные зимы, которые сопровождаются массовым сходом катастрофических лавин. В основу типизации положен принцип корреляционной матрицы, в которой зимы разбиты на четыре группы:

1) *по температуре воздуха*: А – аномально тёплые (*t1*); Б – умеренно тёплые (*t2*); В – умеренно холодные (*t3*); Г – аномально холодные (*t4*);

2) *по осадкам*: 1 – аномально сухие (*x1*); 2 – с дефицитом осадков (*x2*); 3 – с осадками выше нормы (*x3*); 4 – аномально увлажнённые (*x4*).

Отклонения считаются относительно среднего сезонного значения температуры и сезонной суммы осадков; рассчитывается также среднеквадратическое отклонение этих значений. Лавинная опасность зим выражает определённую количественную характеристику схода лавин:

1) *слабая* – преобладают мелкие и средние по размеру лавины, которые останавливаются в верхней части лавиносоры или в пределах минерального конуса выноса и занимают часть его площади;

2) *средняя* – сохраняется ведущая роль небольших и средних по размеру лавин, однако появляются и качественно новые условия, приводящие к возникновению единичных крупных лавин (полностью перекрывают площадь минерального конуса выноса, но не выходят за его пределы);

Таблица 1. Типы зим по соотношению температуры воздуха и осадков за холодный период и характеристика их лавинной опасности\*

		А	Б	В	Г
		$t \geq \bar{t} + \delta$	$\bar{t} \leq t < \bar{t} + \delta$	$\bar{t} - \delta \leq t < \bar{t}$	$t < \bar{t} - \delta$
1	$x \leq \bar{x} - \delta$	Слабая		Слабая	
2	$\bar{x} - \delta < x \leq \bar{x}$			Средняя	
3	$\bar{x} < x \leq \bar{x} + \delta$	Средняя		Сильная	Аномально сильная
4	$x > \bar{x} + \delta$			Сильная	

\*Зимы: А – аномально тёплые; Б – умеренно тёплые; В – умеренно холодные; Г – аномально холодные; 1 – аномально сухие; 2 – с дефицитом осадков; 3 – с осадками выше нормы; 4 – аномально увлажнённые;  $x$  – сезонная сумма осадков;  $x^-$  – среднееголетняя сумма осадков;  $t$  – среднесезонная температура воздуха;  $\bar{t}$  – среднееголетняя температура воздуха за холодный период;  $\delta$  – среднеквадратическое отклонение величины; лавинная опасность зим: слабая – 1А, 1Б, 1В, 1Г, 2А, 2Б; средняя – 3А, 3Б, 2В, 2Г; сильная – 4А, 4Б, 3В; аномально сильная – 4В, 4Г, 3Г [6].

3) *сильная* – наблюдаются один и более периодов с массовым сходом крупных лавин и возникают условия для схода особо крупных лавин объёмом свыше 300 тыс. м<sup>3</sup> (могут выходить далеко за пределы минерального конуса выноса);

4) *аномально сильная* – фиксируется массовый сход особо крупных лавин.

Соотношение гидротермических условий в матрице определяет 16 возможных типов зим, которые отражают тенденцию нарастания лавинной опасности от слабой до аномально высокой (табл. 1). Настоящая матрица используется в работе для оценки лавинной опасности зим на северном макросклоне Кавказа по данным 17 ГМС, которая в дальнейшем сопоставляется с данными реанализов.

**Данные метеорологических наблюдений и реанализов.** В работе использованы данные действующих станций Росгидромета и ряда станций бывшего СССР на северном макросклоне Кавказа (табл. 2). Расчёт зимней температуры воздуха и осадков выполнен в границах климатического холодного периода (декабрь–март). *Реанализ* (ретроспективный анализ) – это результат усвоения глобальных метеорологических данных с помощью численной модели прогноза погоды с целью получения наиболее полной информации о состоянии атмосферы и деятельного слоя за достаточно длительный период (как правило, несколько десятилетий) [17]. Сама прогно-

Таблица 2. Сведения о ГМС Кавказского региона, данные которых использованы для характеристики типов зим и оценки лавинной опасности

Метеостанции	Широта/Долгота, градусы	Абсолютная высота, м	Период наблюдений, годы
Владикавказ	43,03/44,68	702	1966–2017
Зеленчукская	43,87/41,57	928	1966–2017
Кисловодск	43,9/42,72	943	1966–2017
Клухорский перевал	43,25/41,83	2037	1966–2015
Красная Поляна	43,68/40,2	564	1966–2017
Сочи	43,58/39,77	142	1966–2017
Сулак	42,37/46,25	2927	1966–2015
Шатжатмаз	43,73/42,67	2070	1966–2017
Терскол	43,25/42,51	2140	1966–2017
Гагрский хребет	43,21/40,17	1664	1966–1986
Гудаури	42,28/44,29	2194	1966–1975
Крестовый перевал	42,30/44,27	2395	1966–1986
Шови	42,42/43,41	1507	1966–1986
Архыз	43,60/41,30	1450	1966–1988
Теберда	43,50/41,70	1328	1966–1988
Алибек	42,24/43,56	1745	1966–1986
Гуниб	42,40/47,00	1551	1966–1986

стическая модель представляет собой сложную вычислительную технологию, основой которой служит система дифференциальных уравнений Навье–Стокса, описывающих законы сохранения энергии, массы и количества движения в воздухе. В качестве начальных и граничных условий выступают данные метеорологических наблюдений (наземные, аэрологические, спутниковые и т.д.). Реанализ содержит сотни трёхмерных полей гидрометеорологических величин с временным разрешением, как правило, не менее 6 часов, характеризующих всю толщу атмосферы, подстилающую поверхность и деятельный слой.

При решении задачи по воспроизведению зимнего климата Кавказского региона использованы реанализы разных поколений (табл. 3). Для рассматриваемого аспекта лавинообразования данные реанализов представляют собой обширный массив дополнительной информации об атмосферных процессах, которые наблюдались в прошлом и становились причиной масштабных лавинных катастроф. Итог модельных расчётов – сеточное поле, которое покрывает весь земной шар, в том числе горные районы, недостаточно обеспеченные метеорологическими наблюдениями.

Таблица 3. Сведения о массивах данных реанализов

Модели	Период с данными реанализа, годы	Шаг сетки, градусы	Разработчик модели
ERA-Interim	1979–2018	0,703 × 0,703	Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), Западная Европа
CFSR	1979–2018	0,5 × 0,5	Национальный центр экологического прогнозирования (NCEP), США
NCEP-NCAR	1948–2018	2,5 × 2,5	Национальный центр экологического прогнозирования (NCEP) и Национальный центр атмосферных исследований (NCAR), США

По результатам исследований в Альпах показано, что точность данных реанализов уменьшается от низко- к высокогорным районам [18], однако средняя ошибка не превышает 1 °С, и для большинства горных территорий реанализ служит единственным средством для климатических оценок [1, 19]. Вместе с тем в работе [20] показано, что данные реанализа о температуре, влажности и скорости ветра вполне корректно использовать именно для высокогорья, поскольку они отражают состояние средней тропосферы, которое воспроизводится современными моделями атмосферы достаточно хорошо. Авторы настоящей работы используют данные трёх реанализов: NCEP-NCAR [21], CFSR [22] и ERA-Interim [23] (см. табл. 3). Реанализ NCEP-NCAR выбран из-за наиболее длинного ряда из всех имеющихся реанализов, а CFSR и ERA-Interim относятся к одним из лучших реанализов. Для сравнения полученных результатов по различным моделям выбрано несколько реанализов. Сезонно-среднённые данные реанализов линейно интерполировали в точки ГМС и сравнивали с результатами наблюдений. Учитывали также разницу между высотой над уровнем моря узла модельной сетки и реальной ГМС: значение приводилось по градиенту стандартной атмосферы (–0,65 °С/100 м) на фактическую высоту ГМС, что допустимо в случае сезонных оценок [24]. Были рассчитаны средние ошибки сезонных значений и коэффициенты корреляции между температурой воздуха и суммой осадков за холодный период.

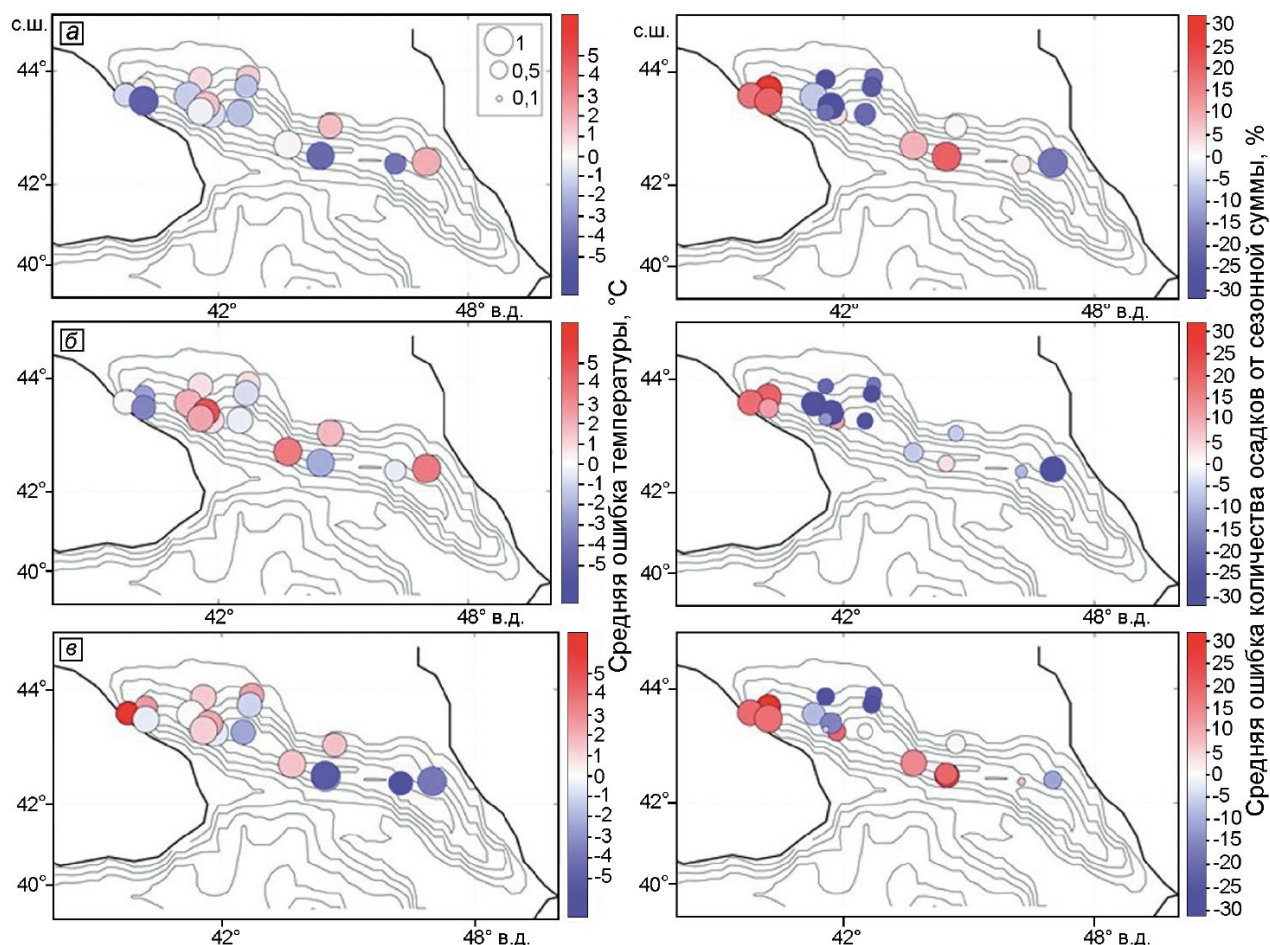
### Анализ результатов

**Оценка данных реанализов для холодного полугодия.** На рис. 1 представлены средние ошибки сезонных значений и коэффициенты корреляции между результатами фактических наблюдений о температуре воздуха и осадках за холодный пери-

од и данными реанализов. По температуре воздуха больше половины ГМС имеют статистически значимый коэффициент корреляции ( $r = 0,7 \div 0,9$ ), самые низкие значения наблюдаются на ГМС Сулак ( $r = \sim 0,7$ ). Наиболее удачно временную изменчивость сезонных значений температуры воспроизводит реанализ ERA-Interim – средняя ошибка составляет |1,7| °С. Наименьшая точность характерна для реанализа NCEP-NCAR – средняя ошибка |2,6| °С. Этот результат вполне ожидаем, так как реанализ NCEP-NCAR реализован с помощью менее совершенной модели NCEP по сравнению с моделью Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды и его пространственное разрешение существенно грубее.

Коэффициенты корреляции для осадков в целом значительно ниже, чем для температуры. Тем не менее, на большей части ГМС они статистически значимы, а в некоторых пунктах коэффициент корреляции даже больше 0,8. Ошибки регионально зависимы: на Западном Кавказе данные всех трёх реанализов хорошо согласуются с данными наблюдений (ГМС Красная Поляна и Шови). Рассчитана также ошибка суммы сезонных осадков от годовой суммы. Она варьирует от 0,5 до 40%, но на большинстве ГМС не превышает 30%, что приемлемо для горной территории. Хуже всего воспроизводятся суммы осадков на ГМС Теберда: большие ошибки зафиксированы во всех трёх реанализах. На ГМС, находящейся ближе к Черноморскому побережью, отмечается сильное завышение количества осадков для реанализов ERA-Interim и NCEP-NCAR. Аналогичная картина характерна и для ГМС Центрального Кавказа.

Для всех трёх реанализов отметим общую закономерность пространственного распределения ошибки: завышение осадков на Черноморском побережье и южном макросклоне Большого Кавказа и их занижение на северном макросклоне. Это связано с относительно грубым описа-



**Рис. 1.** Сравнение реанализов ERA-Interim (а), CFSR (б) и NCEP-NCAR (е) со станционными данными («станция минус реанализ») по температуре воздуха на 2-х м (левая колонка) и сумме осадков (правая колонка) за холодный период.

Размер кружка соответствует значению коэффициента корреляции между станционными данными и реанализом

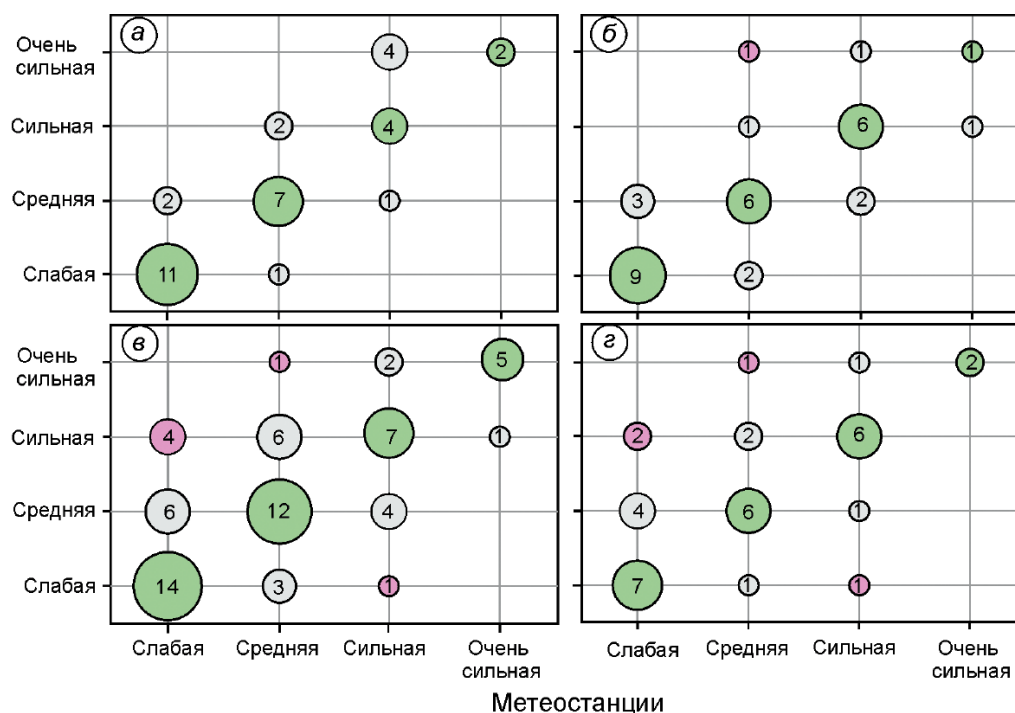
**Fig. 1.** Comparison of reanalyses ERA-Interim (a), CFSR (b) and NCEP-NCAR (e) with station data («station minus reanalysis») by air temperature at 2 meters (left column) and precipitation amount (right column) for cold period. The size of the circle corresponds to the value of the correlation coefficient between the station data and the reanalysis

нием рельефа в глобальных атмосферных моделях и сложностью приведения модельных осадков к высотам ГМС из-за отсутствия региональных плевиметрических градиентов на Кавказе. Плевиметрический градиент определяется сочетанием орографически вынужденного подъёма воздуха вдоль горного склона с уменьшением интегрального влагосодержания атмосферы по мере увеличения высоты над уровнем моря. В горных системах умеренных широт на высотах 3000–3500 м над ур. моря, как правило, отмечаются сезонные и годовые максимумы осадков [24]. Несмотря на эти общие закономерности, привести модельные суммы осадков к точке конкретной ГМС крайне трудно из-за отсутствия на-

дёжных и долгопериодных измерений плевиметрических градиентов на Кавказе.

**Лавинная опасность по данным реанализов.**

Согласно проведённым исследованиям по обобщению сведений о лавинах Большого Кавказа в XX в. и результатам реконструкции экстремальных условий лавинообразования на основе метода типизации холодных сезонов, зимы с лавинными катастрофами наблюдались в Кавказском регионе в 1953/54, 1955/56, 1967/68, 1975/76, 1986/87 гг. [25]. В 1990-е годы отмечены ещё две зимы с массовым сходом особо крупных лавин на территории Западного и Центрального Кавказа – 1992/93 и 1996/97 гг. [25]. Таким образом, для второй половины XX в. в Кавказском



**Рис. 2.** Характеристика лавинной опасности зим по соотношению температуры воздуха и осадков за холодный период по данным метеорологических станций (ось абсцисс) и реанализов (ось ординат):

*a* – ERA-Interim; *б* – CFSR; *в* – NCEP-NCAR (1948–2018 гг.); *г* – NCEP-NCAR (1980–2018 гг.). Зелёные кружки – полное соответствие между данными реанализа и наблюдений, серые – удовлетворительное, красные – неудовлетворительное

**Fig. 2.** Characteristics of the avalanche danger of winters by the ratio of air temperature and precipitation during the cold period according to the data of meteorological stations (abscissa) and reanalyses (ordinate):

*a* – ERA-Interim; *b* – CFSR; *v* – NCEP-NCAR (1948–2018); *z* – NCEP-NCAR (1980–2018). Green circles – full correspondence between reanalysis and observation data, gray – satisfactory, red – unsatisfactory

регионе мы получаем хронологический ряд лавинных катастроф, представленный семью зимами. Проанализируем степень лавинной опасности по данным реанализов. Отметим, что в XXI в. не было ни одной зимы с максимальной, 4-й степенью лавинной опасности как по метеоданным ГМС и непосредственным наблюдениям за лавинами в регионе, так и на основе данных реанализов. Оценка лавинной опасности выполнена по данным ГМС и реанализов ERA-Interim, CFSR и NCEP-NCAR.

Рассмотрим подробнее сопоставление показателя лавинной опасности по данным реанализов с данными ГМС (рис. 2). Для этого определим следующие критерии точности воспроизведения лавинной опасности зим на основе реанализов: «хорошо» – при совпадении степени лавинной опасности по данным ГМС и реанализа (при этом абсолютные ошибки температуры и осадков могут варьировать в пределах среднеквадратического отклонения, определяе-

мого в рамках методики [6]); «удовлетворительно» – при отклонении на одну градацию; «неудовлетворительно» – при отклонении на две-три градации. Установлено, что реанализ NCEP-NCAR в 58% случаев воспроизводит лавинную опасность на Центральном Кавказе на уровне «хорошо», в 33% – «удовлетворительно», в 9% случаев – «неудовлетворительно» (при выборке с 1948 по 2018 г.) Если же привести выборку NCEP-NCAR к тому же временному ряду, что у реанализов ERA-Interim и CFSR (1979–2018 гг.), то соотношение будет следующим: 62% – «хорошо», 26% – «удовлетворительно», 12% – «неудовлетворительно». Таким образом, кардинальной разницы по результатам сравнения за разные временные промежутки не наблюдается. Реанализ CFSR в 67% воспроизводит лавинную опасность на «хорошо», в 30% – на «удовлетворительно», в 3% – на «неудовлетворительно»; реанализ ERA-Interim в 71% – на «хорошо», в 29% – на «удовлетворительно». Реана-



лиз NCEP-NCAR оказался худшим источником модельных данных для обобщённых оценок лавинной опасности, причём наибольшие ошибки наблюдались в определении зим слабой лавинной опасности. Отметим, что решение проблемы с плювиометрическим градиентом, который был рассмотрен ранее, может заметно улучшить оценку показателей лавинной опасности по данным реанализов и климатических моделей вообще. Итак, из трёх используемых реанализов лучший – ERA-Interim, который в 71% случаев успешно воспроизводит лавинную опасность зимних сезонов и ошибка которого ни разу не выходила за пределы одной градации.

**Синоптические условия высокой и экстремальной лавинной опасности.** Рассмотрены основные характеристики атмосферной циркуляции над Европой и Средиземноморьем для сезонов, в течение которых наблюдалась сильная и аномально сильная лавинная опасность. Для периодов экстремального лавинообразования рассчитаны циркуляционные индексы, характеризующие взаимное расположение и интенсивность основных крупных центров действия атмосферы. Используются следующие индексы: Северо-Атлантического колебания (NAO); Восточная Атлантика/Западная Россия (EA/WR); Скандинавия (SCAND) [26]. Установлено, что лавинные события происходили как при отрицательных, так и при положительных величинах перечисленных индексов, т.е. какой-либо связи высокой и экстремальной лавинной опасности с макромасштабными колебаниями атмосферной циркуляции обнаружено не было. Для всех зимних сезонов с экстремальной лавинной опасностью средние значения температуры на уровнях 850, 700 и 500 гПа по данным реанализа NCEP-NCAR оказались ниже нормы. При этом интегральное влагосодержание столба атмосферы в большинстве случаев также оказалось ниже средних многолетних значений (рис. 3). Подчеркнём, что зимы с массовым сходом катастрофических лавин прежде всего были связаны с отрицательной аномалией температуры в средней тропосфере, а не с положительными аномалиями влагосодержания и обильными осадками.

Рассмотрим синоптические ситуации, которые спровоцировали сход крупных и катастрофических лавин в зимние сезоны 1968–2018 гг. По каждому эпизоду крупных лавинных событий

на основе данных реанализа NCEP-NCAR были построены и проанализированы карты давления на уровне моря, геопотенциала и аномалии геопотенциала на уровне 500 гПа, аномалии температуры на 850 гПа и влагосодержания в столбе воздуха. Установлено несколько циркуляционных механизмов, которые можно рассматривать в качестве региональной типизации «лавиноопасных» синоптических процессов (табл. 4).

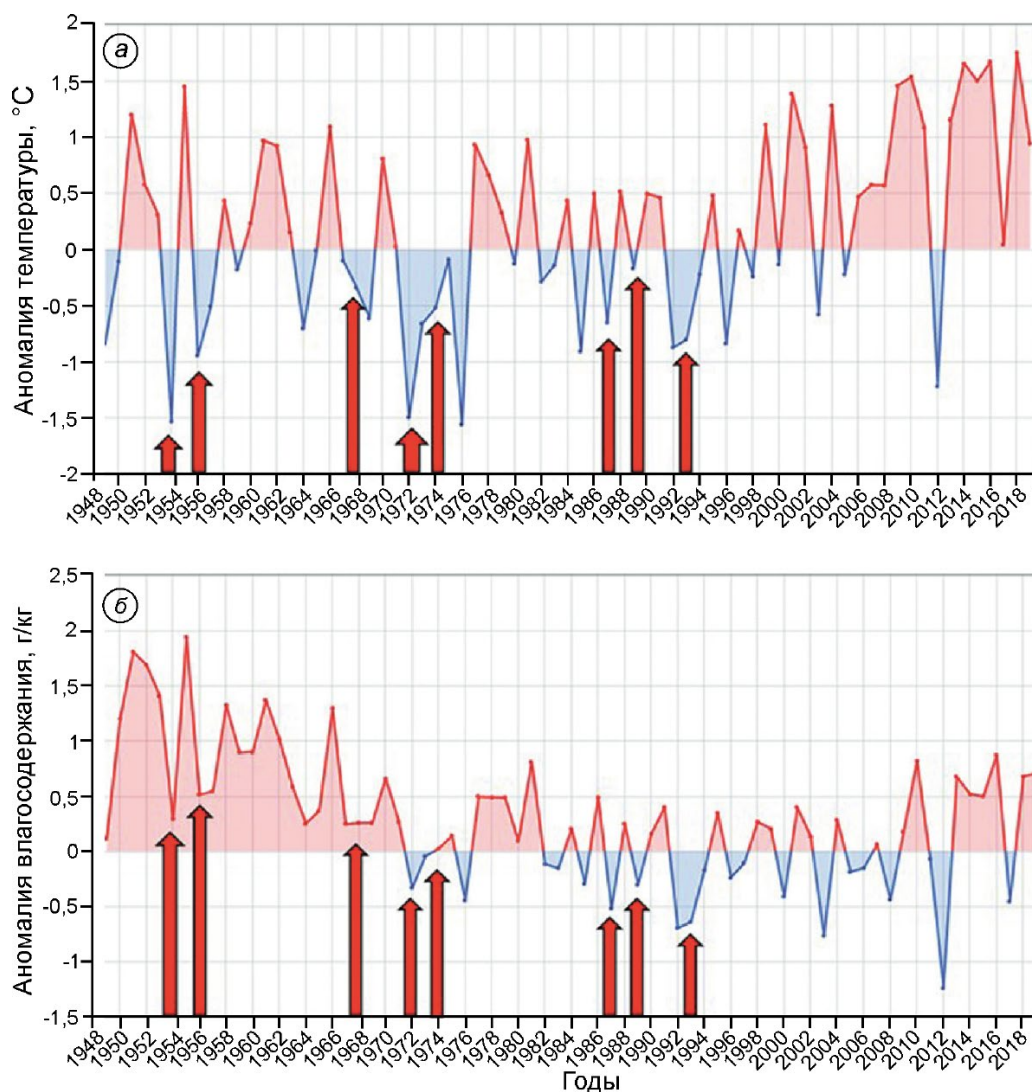
1. *Зональный циклонический южный ЗЦ(Ю)* – характеризуется более южным по сравнению со средним климатическим положением высотной планетарной фронтальной зоны и отрицательной аномалией геопотенциала над Восточной Европой. В такой ситуации над Средиземноморским регионом формируются области существенных температурных контрастов и активизируется циклогенез, причём средиземноморские циклоны перемещаются преимущественно в восточном направлении.

2. *Меридиональный циклонический южный МЦ(Ю)* – результат вторжения арктического воздуха со Скандинавии в Восточную Европу и на Балканы. В результате над Средиземноморьем резко активизируется циклоническая деятельность. Процесс характеризуется формированием высотного циклона над Восточной Европой и гребня над Каспием и южной половиной Урала, в результате траектории средиземноморских циклонов направлены в северо-восточном направлении.

3. *Зональный циклонический атлантический ЗЦ(А)* – характеризуется типичным перемещением атлантических циклонов с запада на восток, однако их траектории смещены примерно на 1000 км к югу (по сравнению со средними многолетними), в итоге атмосферные фронты существенно влияют на погоду Северного Кавказа. Иногда процесс сопровождается дополнительным выходом южного циклона, который, как правило, формируется на холодном фронте атлантического.

4. *Зонально-меридиональный циклонический атлантический* – в синоптической практике этот процесс называют «ныряющий циклон»; речь идёт о существенном отклонении траектории атлантического циклона на юго-восток (со Скандинавии в центр Европейской территории России и далее на Среднюю и Нижнюю Волгу). Северный Кавказ оказывается в зоне активных холодных фронтов и холодного вторжения в тылу циклона.





**Рис. 3.** Аномалия температуры относительно средней климатической (1981–2010 г.) на изобарической поверхности 850 гПа (а) и влагосодержания в столбе воздуха (б) для территории Северного Кавказа по данным реанализа NCEP-NCAR.

Стрелками показаны зимы с экстремальной лавинной опасностью

**Fig. 3.** Anomaly of temperature relative to the average climatic on the isobaric surface of 850 hPa (a) and of moisture content in the air column (б) for the territory of the North Caucasus according to the NCEP-NCAR reanalysis data.

The arrows indicate winters with extreme avalanche danger

Если оценивать особенности крупномасштабных полей атмосферной циркуляции, то для всех значимых лавиноопасных ситуаций характерны глубокие аномалии геопотенциала над Восточной Европой или над северной половиной Европейской территории России и соответствующие им отрицательные аномалии температуры на уровне 850 гПа, как правило, превышающие по модулю 5 °С (рис. 4). В итоге все многообразие синоптических процессов сводится к двум ситуациям: а) глубокие вторжения арктического холода со стороны

Скандинавского полуострова, которые провоцируют циклогенез над Средиземноморским регионом; б) господство арктической воздушной массы над северной половиной Европы в сочетании с положительной аномалией температуры над Средиземноморьем, в результате которого происходит активизация высотной планетарной фронтальной зоны и циклогенеза (как южного, так и атлантического). В обеих ситуациях Северный Кавказ оказывается в зоне действия активных атмосферных фронтов, поэтому аномально высокие значения

Таблица 4. Характеристика синоптических процессов, спровоцировавших высокую и экстремально высокую лавинную опасность в зимние сезоны 1968–2000 г.

Год и дата	Циркуляция в средней тропосфере (АТ500), температура и влагосодержание на уровне АТ850 и поле давления на уровне моря			Общая характеристика процесса
	АТ500	АТ850	уровень моря	
1968 05.01–15.01	Западный перенос с быстрыми волнами	Чередование тропического и умеренно-континентального воздуха; влагосодержание близко к норме	Серия южных циклонов	Зональный циклонический (средиземноморские циклоны) ЗЦ(Ю)
1973 01.12–07.12			Выход южного циклона; в конце периода южная периферия атлантического циклона	
1976 12.01–21.01	Глубокий циклон над Восточной Европой	Арктическое вторжение на ЕТР со Скандинавии; влагосодержание близко к норме	12–16 января – южная периферия атлантического циклона; 17–21 января – средиземноморский циклон	Меридиональный циклонический (средиземноморские циклоны) МЦ(Ю)
1979 01.01–04.01			Выход южного циклона с Балкан	
1986 20.01–31.01				
1987 01.01–10.01	Зональный процесс на севере ЕТР; глубокий высотный циклон	Чередование волн тропического тепла с вторжениями умеренно-континентального и арктического воздуха	Чередование атлантических и южных циклонов и их объединение	Зональный циклонический (атлантические и южные циклоны) ЗЦ(А)
1987 24.01–03.02	Быстрые пологие волны со Скандинавии	Чередование волн тепла с арктическими вторжениями в тылу циклонов; влагосодержание близко к норме	«Ныряющие» атлантические циклоны	Зонально-меридиональный циклонический («ныряющие» циклоны) ЗМЦ(А)
1993 22.01–29.01	Западный перенос с быстрыми волнами	Чередование тропического и умеренно-континентального воздуха; влагосодержание близко к норме	Серия атлантических циклонов	Зональный циклонический (атлантические циклоны) ЗЦ(А)
1996 22.12–30.12		Чередование тропического и умеренно-континентального воздуха; влагосодержание выше нормы	Серия южных циклонов	Зональный циклонический (южные циклоны) ЗЦ(Ю)

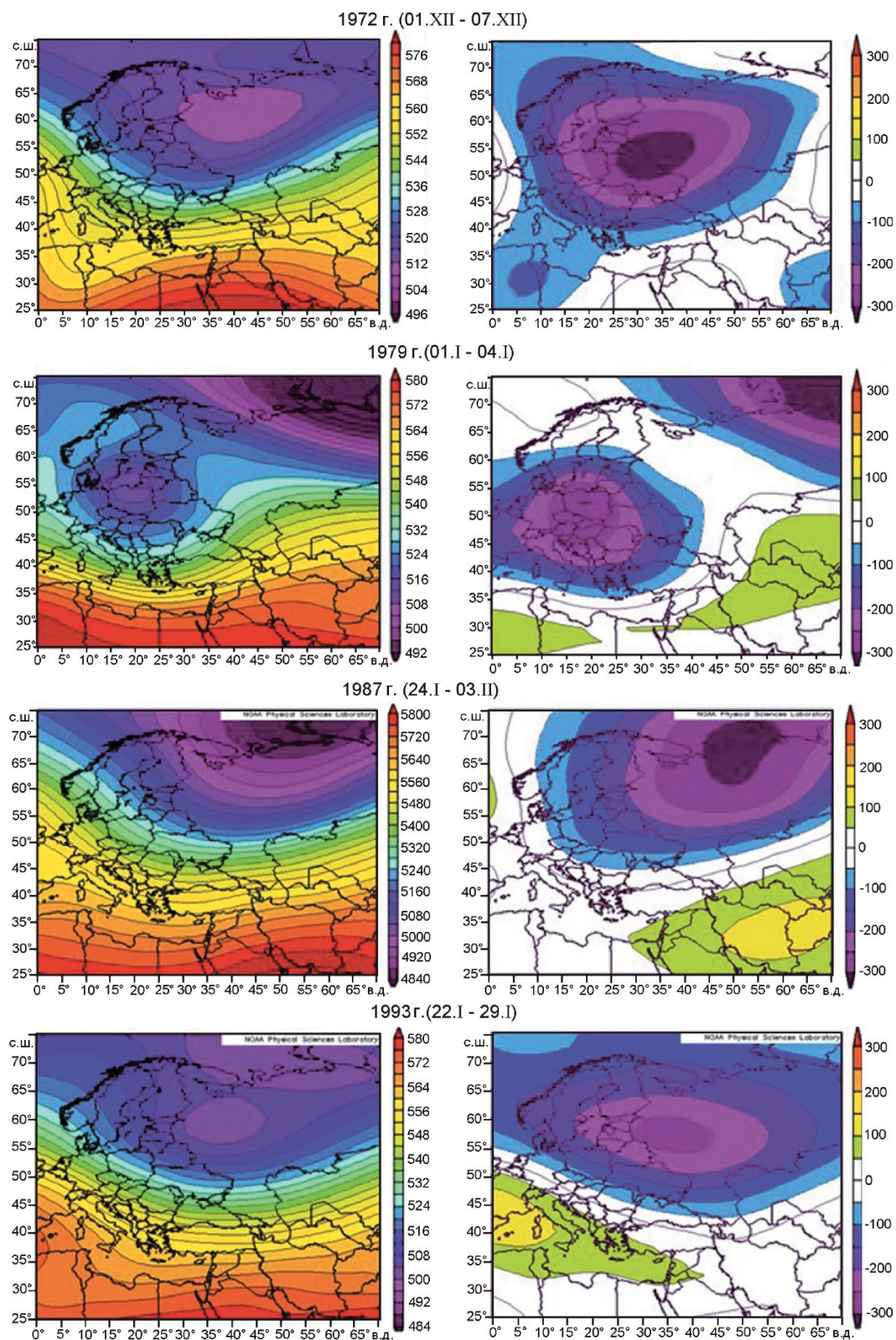
температуры сменяются экстремально низкими в сочетании с интенсивными (или продолжительными) снегопадами. Если температурный фон в течение длительного периода, предшествующего описываемым событиям, был ниже нормы, то формируются благоприятные условия для схода особо крупных снежных лавин.

Анализ синоптических процессов позволил выявить доминирующую роль полярно-фронтального циклогенеза в формировании особо опасных лавинных ситуаций. При этом атлантические циклоны тоже играют достаточно заметную роль (три случая из девяти). Лавинные катастрофы зимы 1986/87 г., подробно описанные в работе [26], вероятно, связаны с такой последовательностью синоптических процессов: а) выход средиземноморских циклонов сначала с юго-запада, а затем – с запада; б) «ныряющий» атлантический циклон, который, кроме заметных осадков, принёс резкое понижение температуры. Ситуация усугубилась тем, что зимний сезон

был несколько холоднее среднего многолетнего фона, что обусловило благоприятные условия для формирования неустойчивого снежного покрова со слоями разрыхления. Однако даже на временном масштабе, соответствующем синоптическим процессам (5–10 суток), влагосодержание атмосферы над Северным Кавказом в большинстве случаев было близким к норме и на фоне южных циклонов (за исключением 1996 г.).

### Обсуждение результатов и выводы

Детальный анализ метеорологических условий формирования сильной и аномально сильной степени лавинной опасности показал, что на масштабе синоптических процессов наиболее типичная ситуация – отрицательная аномалия геопотенциала в средней тропосфере с центром над зарубежными странами Восточной Европы, которой соответствует вторжение арктиче-



**Рис. 4.** Обобщённая характеристика циркуляции в средней тропосфере в зимы с экстремальным лавинообразованием: средняя высота изобарической поверхности 500 гПа в периоды наиболее интенсивных осадков (слева) и аномалии изобарической высоты в эти же периоды относительно климатических норм 1981–2010 гг. (справа)

**Fig. 4.** Generalized characteristics of circulation in the middle troposphere during the winter of extreme avalanche formation: the average height of the isobaric surface is 500 hPa during the periods of the most intense precipitation (left) and anomalies of the isobaric height in the same periods relative to the climatic norms of 1981–2010 (right)



ского воздуха со Скандинавии в южные районы, провоцирующее активизацию полярного фронта и циклогенез над Средиземноморьем. Более редкий, но тоже довольно типичный процесс — формирование высотного циклона над северной половиной Европы, которому соответствуют глубокие отрицательные аномалии температуры у поверхности земли. В этих условиях также происходит активизация высотной планетарной фронтальной зоны над южными районами Европы и циклогенез над Средиземным и Чёрным морями, но траектории южных циклонов в данном случае направлены с запада на восток. Этот тип крупномасштабной циркуляции включает в себя выход атлантических циклонов, траектории которых оказываются существенно южнее средних многолетних. Если сопоставлять полученные результаты с типизацией Дзердзеевского, то окажется, что большая часть лавиноопасных ситуаций соответствует типу *11a* (ярко выраженный азорский и сибирский антициклоны и активный циклогенез между ними над южной половиной Европы) [15]. Однако данная типизация не даёт полного представления об аномалиях основных метеорологических характеристик в средней тропосфере.

Большая часть зимних сезонов с высокой и экстремальной лавинной опасностью характеризуется отрицательной аномалией температуры воздуха. При этом влагосодержание столба атмосферы, осреднённое по сезону, оказывается ниже нормы, а для синоптических процессов, вызывающих лавиноопасные ситуации, близким к норме. Это означает, что в формировании экстремальных лавиноопасных ситуаций первостепенную роль играет стабильная отрицательная аномалия температуры воздуха на протяжении большей части зимнего сезона, которая вызывает аномально высокое снегонакопление даже при сезонных суммах осадков, близких к норме. Именно поэтому в XXI в. не было отмечено ни одной зимы, характеризующейся сильной или экстремальной лавинной опасностью. Сред-

няя сезонная температура зимних сезонов в последние 20 лет была или близка к средней многолетней, или существенно превышала её, в то время как режим увлажнения эпизодически превышал средний многолетний фон. Возможно, отрицательная аномалия температуры влияет на лавинную опасность прежде всего как показатель, определяющий стратиграфию снежного покрова и способствующий появлению ослабленных слоёв (слоёв разрыхления).

Доказано, что данные реанализов ERA-Interim и CFSR могут быть использованы в качестве инструмента качественной оценки лавинной опасности на сезонном масштабе по крупному горному региону. Так, по Северному Кавказу они показали вполне адекватную картину температурно-влажностного режима зимних сезонов: несмотря на значительные ошибки по отдельным ГМС, в целом по крупному горному региону данные моделирования можно признать удовлетворительными. Факт приемлемого воспроизведения реанализами метеорологического режима в высокогорных районах подтверждается в ряде работ по разным регионам земного шара: на Кавказе [20], в Андах [27], в Восточной Африке [19] и других регионах [28], что открывает перспективы для долгосрочного фонового прогноза лавинной опасности на основе модельных сценариев IPCC [29].

**Благодарности.** Апробация данных реанализов для воспроизведения степени лавинной опасности зим выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 20-05-00280 А); оценка синоптических условий, вызывающих экстремальные осадки и благоприятные условия лавинообразования в высокогорных районах Северного Кавказа — при поддержке РФФИ (проект № 20-05-00176).

**Acknowledgments.** The research was carried out with the financial support of the RFBR grants (projects № 20-05-00280 A and № 20-05-00176).

## Литература

1. Huss M., Bookhagen B., Huggel C., Jacobsen D., Bradley R.S., Clague J.J., Vuille M., Buytaert W., Cayan D.R., Greenwood G., Mark B.G., Milner A.M., Weingartner R., Winder M. Toward mountains without permanent snow and ice // *Earth's Future*. 2017. V. 5. № 5. P. 418–435.

## References

1. Huss M., Bookhagen B., Huggel C., Jacobsen D., Bradley R.S., Clague J.J., Vuille M., Buytaert W., Cayan D.R., Greenwood G., Mark B.G., Milner A.M., Weingartner R., Winder M. Toward mountains without permanent snow and ice: mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*. 2017, 5 (5): 418–435.

2. Электронный ресурс [https://www.slf.ch/schneeinfo/zusatzinfos/interpretationshilfe/index\\_EN](https://www.slf.ch/schneeinfo/zusatzinfos/interpretationshilfe/index_EN).
3. Турчанинова А.С., Селиверстов Ю.Г., Глазовская Т.Г. Моделирование снежных лавин в программе RAMMS в России // Геориск. 2015. № 4. С. 42–47.
4. Селиверстов Ю.Г., Глазовская Т.Г., Шнытарков А.Л. Сценарий изменения лавинной деятельности на Европейской части России в XXI веке // Сб. докладов III Междунар. конф. «Лавины и смежные вопросы». Кировск, Россия, 4–8 сентября, 2006. Кировск: ООО Апатит-Медиа Апатиты, 2007. С. 201–207.
5. Christen M., Kowalski J., Bartelt P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // Cold Regions Science and Technology. 2010. V. 63. № 1–2. P. 1–14.
6. Олейников А.Д., Володичева Н.А. Зимы лавинного максимума на Большом Кавказе за период инструментальных наблюдений (1968–2016 гг.) // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 4. С. 521–532. doi: 10.31857/52076673420040057.
7. Glazovskaya T.G., Seliverstov Y.G. Long-term forecasting of changes of snowiness and avalanche activity in the world due to the global warming // Publikasjon – Norges Geotekniske Institutt. 1998. № 203. P. 113–116.
8. Holloway J.L., Manabe S. Simulation of climate by a global general circulation model: I. Hydrologic Cycle and Heat Balance // Monthly Weather Review. 1971. V. 99. № 5. P. 335–370.
9. Glazovskaya T.G. Global distribution of snow avalanches and changing activity in the Northern Hemisphere due to climate change // Annals of Glaciology. 1998. V. 26. P. 337–342.
10. Глазовская Т.Г., Трошкина Е.С. Влияние глобального изменения климата на лавинный режим на территории бывшего Советского Союза // МГИ. 1998. № 84. С. 88–91.
11. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Ред. В.М. Котляков. М.: изд. Российской академии наук, 1997. 392 с.
12. Сезин В.М. Синоптические условия схода снежных лавин в горах западного Тянь-Шаня // МГИ. 1982. № 42. С. 94–100.
13. Бугаев В.А., Джорджио В.А., Козик Е.М., Петросянц М.А., Пшеничный А.Я., Романов Н.Н., Чернышева О.Н. Синоптические процессы Средней Азии. Ташкент: изд. АН УзССР, 1957. 447 с.
14. Дзердзеевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М. Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Тр. НИУ ГУГМС. М.: Гидрометиздат, 1946. 80 с.
15. Кононова Н.К. Циркуляция атмосферы как фактор стихийных бедствий на Северном Кавказе в XXI веке // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2012. Т. 8. № 1–2. С. 72–103.
16. Багрова Т.Н., Дроздов В.В. Влияние крупномасштабной атмосферной циркуляции на климатические параметры Западного Кавказа (Тебердинский биосферный заповедник) // Учен. зап. Российского гос. гидромет. ун-та. 2010. Вып. 13. С. 52–63.
17. Parker W.S. Reanalyses and Observations: What's the Difference? // Bulletin of the American Meteorological Society. 2016. Т. 97. № 9. P. 1565–1572.
2. [https://www.slf.ch/schneeinfo/zusatzinfos/interpretationshilfe/index\\_EN](https://www.slf.ch/schneeinfo/zusatzinfos/interpretationshilfe/index_EN).
3. Turchaninova A.S., Seliverstov Yu.G., Glazovskaya T.G. Simulation of snow avalanches in the RAMMS program in Russia. Georisk. Georisk. 2015, 4: 42–47. [In Russian].
4. Seliverstov Yu.G., Glazovskaya T.G., Shnytparkov A.L. A scenario of changes in avalanche activity in the European part of Russia in the XXI century. Sbornik dokladov III Mezhdunarodnoj konferencii «Laviny i smezhnyye voprosy». Collection of reports of the 3rd International Conference «Avalanches and related issues». Kirovsk, Russia, September 4–8, 2006. Kirovsk: Apatit–Media Apatity LLC, 2007: 201–207. [In Russian].
5. Christen M., Kowalski J., Bartelt P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology. 2010, 63 (1–2): 1–14.
6. Oleinikov A.D., Volodicheva N.A. Winters of the avalanche maximum in the Greater Caucasus for the period of instrumental observations (1968–2016). Led i Sneg. Ice and Snow. 2020, 60 (4): 521–532. doi: 10.31857/52076673420040057. [In Russian].
7. Glazovskaya T.G., Seliverstov Y.G. Long-term forecasting of changes of snowiness and avalanche activity in the world due to the global warming. Publikasjon – Norges Geotekniske Institutt. 1998, 203: 113–116.
8. Holloway J.L., Manabe S. Simulation of climate by a global general circulation model: I. Hydrologic Cycle and Heat Balance. Monthly Weather Review. 1971, 99 (5): 335–370.
9. Glazovskaya T.G. Global distribution of snow avalanches and changing activity in the Northern Hemisphere due to climate change. Annals of Glaciology. 1998, 26: 337–342.
10. Glazovskaya T.G., Troshkina E.S. The influence of global climate change on the avalanche regime in the territory of the former Soviet Union. Materialy glaciologicheskikh issledovanij. Data of Glaciological Research. 1998, 84: 88–91. [In Russian].
11. Atlas snezhno-ledovykh resursov mira. World Atlas of snow and ice resources. Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p. [In Russian].
12. Sezin V.M. Synoptic conditions for avalanches in the mountains of the western Tien Shan. Materialy glaciologicheskikh issledovanij. Data of Glaciological Research. 1982, 42: 94–100. [In Russian].
13. Bugaev V.A., Giorgio V.A., Kozik E.M., Petrosyants M.A., Pshenichny A.Ya., Romanov N.N., Chernysheva O.N. Sinopticheskie processy Srednej Azii. Synoptic processes in Central Asia. Tashkent: Academy of Sciences of the UzSSR, 1957: 447 p. [In Russian].
14. Dzerdzeevsky B.L., Kurgan V.M., Vitvitskaya Z.M. Typification of circulation mechanisms in the northern hemisphere and characteristics of synoptic seasons. Trudy NIU GUGMS. Proc. of the NRU GUGMS. Moscow: Gidrometizdat, 1946: 80 p. [In Russian].
15. Kononova N.K. Atmospheric circulation as a factor of natural disasters in the North Caucasus in the XXI century. Geopolitika i ekogeodinamika regionov. Geopolitics and ecogeodynamics of regions. 2012, 8 (1–2): 72–103. [In Russian].
16. Bagrova T.N., Drozdov V.V. The influence of large-scale atmospheric circulation on the climatic parameters of the Western Caucasus (Teberda Biosphere Reserve). Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. Scientific Notes of the

18. Scherrer S.C. Temperature monitoring in mountain regions using reanalyses: lessons from the Alps // Environmental Research Letters. 2020. V. 15. № 4. P. 044005.
19. Mölg T., Chiang John C.H., Gohm A., Cullen N.J. Temporal precipitation variability versus altitude on a tropical high mountain: Observations and mesoscale atmospheric modelling // Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society. 2009. V. 135. № 643. P. 1439–1455.
20. Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M. Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century // Intern. Journ. of Climatology. 2019. P. 4703–4720.
21. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. V. 77. № 3. P. 437–472.
22. Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Juang H.-M.H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Delst P.V., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., Dool H.V.D., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C.-Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 2010. V. 91. № 8. P. 1015–1058.
23. Berrisford P., Dee D., Poli P., Brugge R., Fielding K., Fuentes M., Kallberg P., Kobayashi S., Uppala S., Simmons A. The ERA-Interim archive, version 2.0: Report 1. ECMWF, 2011.
24. Barry R.G. Mountain Weather and Climate Third Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. P. 506.
25. Олейников А.Д. Снежные лавины на Большом Кавказе в условиях потепления климата // МГИ. 2002. № 93. С. 67–72.
26. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns // Monthly Weather Review. 1987. V. 115. № 6. P. 1083–1126.
27. Hardy D.R., Vuille M., Bradley R.S. Variability of snow accumulation and isotopic composition on Nevado Sajama, Bolivia // Journ. of Geophys. Research: Atmospheres. 2003. V. 108. № D22.
28. Pepin N., Diaz H.F., Baraer M., Caceres E.B., Forsythe N., Fowler H., Greenwood G., Hashmi M.Z., Liu X.D., Miller J.R., Ning L., Ohmura A., Palazzi E., Rangwala I., Schöner W., Severskiy I., Shahgedanova M., Wang M.B., Williamson S.N., Yang D.Q. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world // Nature Climate Change. 2015. V. 5. № 5. P. 424–430.
29. Электронный ресурс: <https://www.ipcc.ch/>.
30. Russian State Hydrometeorological University. 2010, 13: 52–63. [In Russian].
31. Parker W.S. Reanalyses and Observations: What's the Difference? Bulletin of the American Meteorological Society. 2016, 97 (9): 1565–1572.
32. Scherrer S.C. Temperature monitoring in mountain regions using reanalyses: lessons from the Alps. Environmental Research Letters. 2020, 15 (4): 044005.
33. Mölg T., Chiang John C.H., Gohm A., Cullen N.J. Temporal precipitation variability versus altitude on a tropical high mountain: Observations and mesoscale atmospheric modeling. Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society. 2009, 135 (643): 1439–1455.
34. Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M. Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century. Intern. Journ. of Climatology 2019: 4703–4720.
35. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP / NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological Society. 1996, 77 (3): 437–472.
36. Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Juang H.-M.H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Delst P.V., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., Dool H. V. D., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C.-Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bulletin of the American Meteorological Society. 2010, 91 (8): 1015–1058.
37. Berrisford P., Dee D., Poli P., Brugge R., Fielding K., Fuentes M., Kallberg P., Kobayashi S., Uppala S., Simmons A. The ERA-Interim archive, version 2.0: Report 1. ECMWF, 2011.
38. Barry R.G. Mountain Weather and Climate Third Edition. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 506 p.
39. Oleinikov A.D. Snow avalanches in the Greater Caucasus in conditions of climate warming. *Materialy glaciologicheskikh issledovanij*. Data of Glaciological Research. 2002, 93: 67–72. [In Russian].
40. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. Monthly Weather Review. 1987, 115 (6): 1083–1126.
41. Hardy D.R., Vuille M., Bradley R.S. Variability of snow accumulation and isotopic composition on Nevado Sajama, Bolivia. Journ. of Geophys. Research: Atmospheres. 2003, 108 (D22).
42. Pepin N., Diaz H.F., Baraer M., Caceres E.B., Forsythe N., Fowler H., Greenwood G., Hashmi M.Z., Liu X.D., Miller J.R., Ning L., Ohmura A., Palazzi E., Rangwala I., Schöner W., Severskiy I., Shahgedanova M., Wang M.B., Williamson S.N., Yang D.Q. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. Nature Climate Change. 2015, 5 (5): 424–430.
43. <https://www.ipcc.ch/>.