

УДК 551.5

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ЛАВИНООПАСНОСТЬ ЗИМ НА КАВКАЗЕ В КОНЦЕ XXI ВЕКА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛЕЙ СМIP6

© 2025 г. И. А. Корнева¹, А. Д. Олейников², П. А. Торопов^{1,2,*},
Н. Е. Варенцова², Н. В. Коваленко²

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: tormet@inbox.ru

Поступила 20.09.2024 г.

После доработки 18.12.2024 г.

Принята к печати 25.12.2024 г.

По прогностическим оценкам лучших для Кавказа моделей земной системы СМIP6 при существенном повышении средней зимней температуры на 4–6 °С (согласно сценарию SSP-5.8.5) частота возникновения экстремальной лавинной опасности практически не меняется (из-за увеличения зимних осадков на 25%). При этом максимум зимних осадков в конце XXI в. смещается на март. По расчётам модели SNOWPACK наиболее типичной ситуацией к концу XXI в. будет формирование однородной снежной толщи с низкой плотностью, либо обводнённого снежного покрова. Эти ситуации не являются лавиноопасными, поэтому в 2071–2100 гг. ожидается существенное снижение повторяемости разрушительных крупных лавин из сухого снега и тенденция к увеличению числа менее опасных лавин из рыхлого и мокрого снега.

Ключевые слова: модели СМIP6, климатический прогноз, лавинная опасность, метеорологические условия формирования лавин, модель Snowpack

DOI: 10.31857/S2076673425010082, EDN: GYSDBK

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных приложений результатов моделей земной системы (далее МЗС) являются оценки изменения повторяемости опасных природных явлений – в том числе гляциологических (лавин, ледниковых селей, водо-снежных потоков и др.). На первый взгляд эта задача нерешаема, поскольку пространственное разрешение современных МЗС в самом лучшем случае составляет 50 км. Это означает, что более или менее достоверные результаты численного моделирования климата можно получить при их осреднении по площади как минимум 500×500 км (Торопов, 2005; Taylor et al., 2012). При этом пространственный масштаб большинства опасных гляциологических явлений лежит в диапазоне «сотни метров – первые километры». Если добавить к этому высокую чувствительность этих явлений к микроклиматическим особенностям и индивидуальным характеристикам рельефа каждого лавиносбора, то станет очевидным, что прогнозировать отдельно взятое опасное гляциологическое явление с использованием данных

МЗС невозможно. Тем не менее оценки изменения повторяемости опасных явлений в горах на фоне меняющегося климата делаются достаточно активно. Ещё в конце XX в. были обобщены результаты расчётов показателей лавинной опасности, основанные на фоновых климатических прогнозах (Глазовская, Трошкина, 1998; Glazovskaya, 1998). При этом имелись в виду не конкретные события, а сопутствующий им метеорологический и климатический фон по всей территории соответствующего горного района.

Фоновый прогноз лавинной опасности можно реализовать двумя способами: статистическим и «регрессионным». Статистический метод основан на анализе функций распределения основных метеорологических параметров (осадков, высоты снежного покрова, температуры) и сводится к установлению статистически значимой зависимости объёма и дальности выброса лавин от соответствующих значений обеспеченности осадков и температуры (Благовещенский, 1991). Таким образом, можно оценивать лавинную опасность как

по всему горному району, так и в конкретной точке. В последние 5–10 лет в рамках этого подхода предпринимались даже попытки развития моделей потипу нейронных сетей (Жданов, 2016). Основная проблема такого подхода состоит в пространственных ограничениях моделей численного прогноза погоды и МЗС, а также существенной неопределённости результатов моделирования на масштабах отдельно взятой точки. «Регрессионный» подход основан на простых связях характеристик лавинной опасности со средними месячными или сезонными значениями температуры и осадков, которые в свою очередь зависят от режима атмосферной циркуляции (Glazovskaya, Seliverstov, 1998; Christen et al., 2010). К этому подходу можно отнести методику, разработанную на географическом факультете МГУ (Олейников и др., 2000), которая увязывает степень лавинной опасности с величиной аномалии температурно-влажностного режима исследуемого горного региона в холодный период года. В качестве предикторов лавинной опасности используются средние сезонные аномалии температуры и осадков, а также их среднеквадратические отклонения. Эта методика была неоднократно апробирована по кавказскому региону (Олейников, Володичева, 2012; Олейников, Володичева, 2020), в том числе на данных современных реанализов (Куксова и др., 2021).

В представленной работе этот подход применяется нетрадиционно — для прогноза климатически обусловленной лавинной опасности в конце XXI в. Используется прогностическая информация тех моделей СМIP6, которые лучше других воспроизвели средние зимние значения температуры и осадков на Кавказе в условиях современного климата. На примере экспериментов с моделью SNOWPACK с начальными данными из реанализа ERA5 демонстрируется, что использование результатов современных климатических моделей позволяет достаточно успешно воспроизводить ключевые особенности стратиграфии снежного покрова, играющие важную роль в возникновении лавинной опасности.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Общее описание методики исследования. Основной подхода, используемого в рамках данной работы, является простая статистическая схема, основанная на линейной связи фоновой лавинной опасности с температурно-влажностным режимом холодного сезона по крупному горному региону (Олейников и др., 2000; Олейников, Володичева, 2012). При этом исходной метеорологической информацией могут служить не только данные метеостанций, но и результаты численного моделирования атмосферы. Так, использование данных реанализа ERA5 дало адекватные результаты

воспроизведения степени лавинной опасности на Кавказе за современный климатический период 1980–2020 гг. (Куксова и др., 2021). Этот результат позволяет надеяться, что использование прогностических расчётов МЗС на последние десятилетия XXI века для оценок фоновой лавинной опасности крупного горного региона возможно.

В работе предпринимается попытка прогноза лавинной опасности на последние десятилетия XXI века на основе результатов моделей СМIP6. Для реализации этой задачи выполняется верификация климатических моделей СМIP6 по территории Северного Кавказа на основе сравнения с данными метеорологических наблюдений. По итогам этой верификации отбираются те модели, которые наилучшим образом воспроизводят температурно-влажностный режим Кавказа в условиях современного климата (1981–2010 гг.). На основе результатов расчётов этих моделей оценивается степень лавинной опасности, согласно подходу, описанному в работах (Олейников и др., 2000; Олейников, Володичева, 2012). Необходимо отметить, что критерии лавинной опасности находятся в прямой зависимости от текущих климатических условий и определяются количеством сходящих лавин, их размерами и генетическим типом. В будущем климате эти критерии могут отличаться от современных, поэтому основное внимание в работе посвящено оценке повторяемости лавинных экстремумов, несущих главную угрозу инфраструктуре горных районов. Общая же картина изменения лавинной опасности рассматривается на основании вклада лишь климатической составляющей в процессы лавинообразования.

Помимо метеорологического и геоморфологического факторов лавинообразования, важнейшую роль играет совокупность процессов, протекающих в снежной толще и определяющих её стратиграфию. Учёт этих процессов является отдельной сложной задачей. Тем не менее он необходим: при одинаковой сезонной сумме осадков и температуре стратиграфия снежного покрова двух отдельно взятых зимних сезонов может быть совершенно разной и зависит от повторяемости типов погоды конкретной зимы. Для того чтобы хотя бы качественно учесть этот фактор, были реализованы эксперименты с одной из передовых моделей снежного покрова Snowpack для контрастных случаев: холодной, многоснежной и экстремально лавиноопасной зимы 1986/87 г. и тёплой малоснежной зимы 2000/01 г. Таким образом, была выполнена оценка возможности использования результатов численного моделирования климата для диагноза и прогноза лавинной опасности на основе расчётов физико-механических характеристик снежной толщи и её стратиграфии. В перспективе можно выявить физически обоснованную связь метеорологического режима с условиями формирования

снежной толщи, которая позволит реализовывать климатические проекции фоновой лавинной опасности на последние десятилетия XXI века.

Метеорологические данные. Для верификации отобранных моделей CMIP6 использованы данные пяти основных действующих станций Росгидромета в горных районах Северного Кавказа за период 1983–2014 гг. (табл. 1). Расчёт средней зимней температуры воздуха и сумм осадков выполнен в традиционных границах климатического холодного периода (ноябрь–март). Также в работе использовались данные реанализа ERA5. Вопросы правомерности использования данных реанализа в горных районах посвящено множество работ. Например, по результатам исследований в Альпах было показано, что точность данных реанализов уменьшается от низкогорных к высокогорным районам (Scherrer, 2020), однако средняя ошибка не превышает 1 °С. Для большинства горных территорий реанализ служит единственным средством для климатических оценок (Mölg et al., 2009; Todorov et al., 2019). С другой стороны, в работах (Kalnay et al., 1996) 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. В работе используются данные реанализа ERA5, хорошо зарекомендовавшего себя в горных районах Кавказа (Todorov et al., 2019; Куксова и др., 2021). Использовались данные о средней сезонной температуре воздуха и суммах осадков с пространственным шагом на поверхности $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, за временной период с 1980 по 2020 г.

Данные моделей CMIP6 и оценка их качества. Шестая фаза международного проекта CMIP6, созданного рабочей группой Всемирной программы исследований климата (WGCM), содержит новые результаты базовых диагностических модельных

Таблица 1. Сведения о метеорологических станциях Кавказского региона, использованных для характеристики типов зим и оценки лавинной опасности

Название	Широта	Долгота	Абсолютная высота, м
Сулак, высокогорная	42.37	46.25	2927
Терскол	43.25	42.51	2150
Шаджатмаз	43.73	42.67	2056
Клухорский перевал	43.25	41.83	2037
Красная Поляна	43.68	40.2	564

экспериментов (DECK experiments) и исторического эксперимента CMIP-historical (1850–2014), а также 23-х экспериментов, посвящённых различным задачам (в том числе эксперимент по параллельному моделированию PMIP, моделированию ледниковых щитов ISMIP6 и др.). По сравнению с моделями предыдущей фазы проекта CMIP5 модели CMIP6 характеризуются более высоким пространственным разрешением и рядом усовершенствований в параметризациях подсеточных процессов (прежде всего, в блоках деятельного слоя суши и океана). Результаты расчётов климата с этими моделями использовались в Шестом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 2021). Для прогностических расчётов в XXI в. использована новая группа сценариев климатического и социально-экономического развития SSP (IPCC, 2021).

В данной работе выполнена оценка качества моделирования с помощью 22 МЗС CMIP6 (табл. 2) зимних температуры воздуха и сумм осадков в горных районах Северного Кавказа. Сезонно-осреднённые результаты расчётов этих моделей билинейно интерполировались в точки метеорологических станций и сравнивались с таким же образом осреднёнными данными наблюдений. Учитывалась также разница между абсолютной высотой над уровнем моря узла модельной сетки и реальной метеостанции: значение приводилось по градиенту стандартной атмосферы ($-0.65 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$) на фактическую высоту метеорологической станции, что вполне допустимо в случае средних сезонных оценок (Todorov et al., 2019). Для того чтобы выбрать лучшие модели, для каждой из пяти метеорологических станций были построены диаграммы Тейлора. Эта диаграмма представляет собой полярную систему координат, радиус-вектора которой соответствуют нормированному коэффициенту корреляции, окружности – среднеквадратической ошибке; также изображается стандартное отклонение. Таким образом предоставляется возможность сводить основные метрики погрешностей и ошибок воедино, что существенно упрощает анализ качества результатов моделирования (рис. 1). Также оценивался критерий качества Мерфи (Murphy, 1988).

Эксперименты с моделью Snowpack. В работе использована модель SNOWPACK с целью оценки возможности использования результатов климатического моделирования для воспроизведения обобщённой стратиграфии снежного покрова в годы с аномально высокой (1986/87 г.) и слабой (2000/01 г.) лавинной опасностью в районе Приэльбрусья (Центральный Кавказ). Успешность этих расчётов служит физическим обоснованием использования SNOWPACK для расчётов фоновых характеристик снежной толщи, в том числе и на основе прогностических результатов моделей CMIP6.

Таблица 2. Глобальные климатические модели эксперимента CMIP6, данные которых использованы в данной работе

№ п/п	Название модели	Организация, страна	Пространственное разрешение (долгота x широта)
1	ACCESS-ESM1-5	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science, Australia	1.875°×1.25°
2	ACCESS-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science, Australia	1.8° × 1.2°
3	AWI-CM-1-1-MR	Alfred Wegener Institute (AWI), Germany	0.9375° × ~0.9°
4	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center (BCC), China	1.125° × ~1.1°
5	CESM2	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	0.9° × 1.25°
6	CESM2-FV2	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	2.5° × ~1.9°
7	CMCC-CM2-HR4	Euro-Mediterranean Centre	0.9° × 1.25°
8	CMCC-ESM2	Euro-Mediterranean Centre	0.9° × 1.25°
9	CNRM-CM6-1-HR	Centre National de Recherches Meteorologiques, Centre Europeen de Recherche et de Formation Avancee en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS), France	0.5° × ~0.5°
10	EC-Earth3-AerChem	EC-Earth-Consortium, Europe	~0.7° × ~0.7°
11	FGOALS-f3-L	Chinese Academy of Sciences (CAS), China	1.25° × 1.0°
12	HadGEM3-GC31-LL	Met Office Hadley Centre (MOHC), UK	1.875° × 1.25°
13	IITM-ESM	Centre for Climate Change Research Indian Institute of Tropical Meteorology, Pune, India	~1.7° × ~1.7°
14	INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics (INM), Russia	2.0° × 1.5°
15	INM-CM5-0	Institute for Numerical Mathematics (INM), Russia	2.0° × 1.5°
16	IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), France	2.5° × ~1.3°
17	KIOST-ESM	The Korea Institute of Ocean Science & Technology, Republic of Korea	2.5° × ~2.0°
18	MIROC-ES2L	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and RIKEN Center for Computational Science (MIROC), Japan	2.8125° × ~2.8°
19	MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and RIKEN Center for Computational Science (MIROC), Japan	1.40625° × ~1.4°
20	MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany	0.9375° × ~0.9°
21	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (MRI), Japan	1.125° × ~1.1°
22	UKESM1-0-LL	Met Office Hadley Centre (MOHC), UK	1.875° × 1.25°

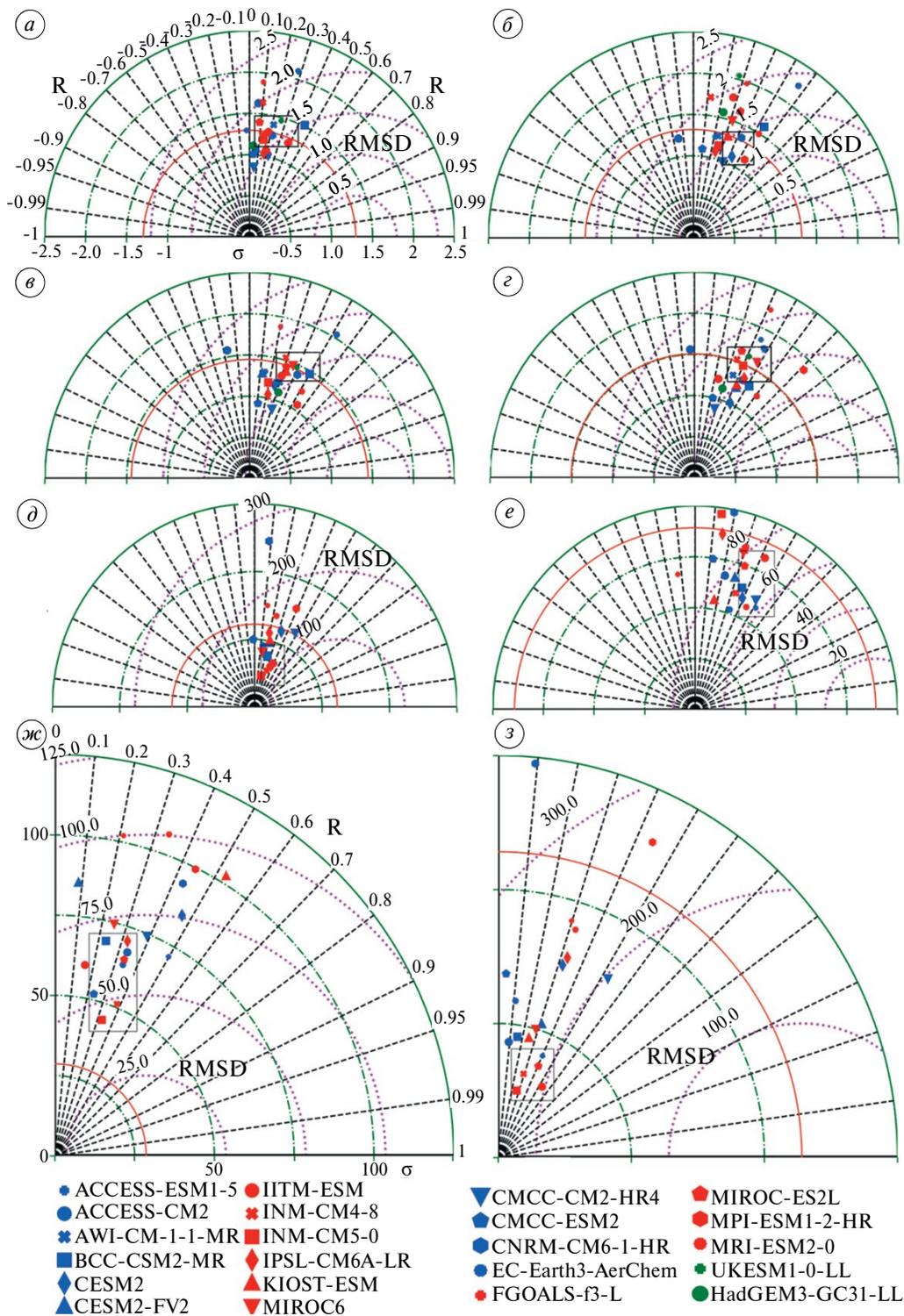


Рис. 1. Диаграммы Тейлора средней за холодное полугодие приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$, $a-g$) и сезонной суммы осадков (мм, $d-z$) по данным 22 моделей CMIP6 и четырёх метеостанций Кавказа: Терскол (a, d), Сулак ($б, e$), Шаджатмаз ($в, ж$), Клухорский перевал ($з, з$). Обозначения на диаграмме: R – коэффициент корреляции, $RMSD$ – среднеквадратическая ошибка, σ – стандартное отклонение. Чёрным прямоугольником выделены наилучшие модели

Fig. 1. Taylor diagrams for the average cold season air temperature ($^{\circ}\text{C}$, $a-g$) and cold season's precipitation sums (mm, $d-z$) by 22 CMIP6 model data and 4 weather stations in Caucasus: Terskol (a, d), Sulak ($б, e$), Shadghatmaz ($в, ж$), Kluhorskiy Pereval ($з, з$). The best CMIP6 models are marked by black rectangle

Модель SNOWPACK разработана в Швейцарском институте исследований снега и лавин (Lehning et al., 2001). Её физико-математической основой служат уравнения диффузии тепла и влаги в частных производных, а также закон сохранения массы. Уравнения решаются численно с использованием лагранжевого метода конечных элементов. Для определения степени уплотнения снег рассматривается как вязкоупругий материал, способный претерпевать большие нестационарные деформации. Модель может воспроизводить основные физические характеристики снежного покрова по вертикальным уровням в конкретной точке практически с любым временным шагом, интересующим потребителя, и на любом временном отрезке – от нескольких часов до нескольких лет (хотя главное назначение модели – оперативная оценка состояния снежного покрова с целью составления лавинного прогноза). Для задачи прогнозирования лавинной опасности важно знать положение слоёв разрыхления с пониженной плотностью, поэтому SNOWPACK определяет, как макроструктурные свойства снега (средние значения величин плотности, напряжения, температуры, водности), так и микроструктурные (размер и форму ледяных зёрен). Снег моделируется как трёхкомпонентный пористый материал (лёд, вода и водяной пар), фазовые переходы рассчитываются между твёрдой и жидкой фазами (поверхностное и подземное таяние, повторное замерзание талой воды) и между твёрдой и газообразной фазами (сублимация в решётке ледяных кристаллов). В работе в качестве начальных использовались данные о температуре воздуха, скорости и направлении ветра, относительной влажности воздуха на высоте 2 м, температуре поверхности, атмосферном давлении на уровне моря, радиационном балансе, сумме осадков, взятые из узла сетки реанализа ERA5 для двух контрастных зимних сезонов: 1986/87 и 2000/01 гг. Расчёт характеристик снежного покрова производился через каждые 60 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка качества воспроизведения современного климата Кавказа моделями СМIP6. На рис. 1 представлены диаграммы Тейлора для средней сезонной температуры воздуха и сезонной суммы осадков для четырёх выбранных горных метеостанций региона (см. табл. 1) и 22 моделей СМIP6 (см. табл. 2). Оценки по станции Красная Поляна не представлены и далее для выбора лучших моделей не используются, так как ошибки модельных данных по осадкам превышают здесь 100%. Возможно, это связано с недоучётом орографического эффекта, который вблизи Черноморского побережья играет особо значимую роль. Для описания таких процессов разрешение моделей СМIP6

слишком грубо (см. табл. 2). Заметим, что для температуры воздуха и осадков практически все модели демонстрируют положительные коэффициенты корреляции для каждой из четырёх станций (см. рис. 1), в среднем составляющие 0.2–0.3 и достигающие для некоторых моделей 0.5–0.6. Средние квадратические ошибки средней сезонной температуры воздуха в основном не превышают 2.0 °С, а среднеквадратическое отклонение – 1.5 °С. Лучшие из 22-х модели на рис. 1 околтурены прямоугольником.

Точнее всего температуру воздуха воспроизвели модели MPI-ESM1-2-HR, UKESM1-0-LL, HadGEM3-GC31-LL, INM-CM-5-0: средняя ошибка среднемесячных значений за холодный сезон для них не превышает 0.5 °С, критерий качества Мерфи максимален среди всех рассматриваемых моделей и составляет 0.7–0.8. Неплохо температуру воздуха воспроизвели модели CESM2 и CESM2-FV2, MRI-ESM2-0, FGOALS-f3-L, AWI-CM-1-1-MR (отклонения не превышают 1 °С). Коэффициенты корреляции между рядами модельной и измеренной средней сезонной температурой воздуха самые высокие для станции Клухорский Перевал (0.4–0.5), а самые низкие для станции Терскол (0.1–0.3) (см. рис. 1).

Зимние осадки в высокогорных районах Кавказа воспроизводятся плохо. Скорее всего это связано с неточным учётом высоты поверхности, что является следствием использования слишком грубых модельных сеток для расчёта осадков в горах. Средние ошибки моделирования (см. рис. 1, *д–з*) характеризуются значительным разбросом, особенно по станциям Терскол (см. рис. 1, *д*) и Клухорский перевал (см. рис. 1, *з*). Ошибки регионально зависимы. Так, большинство моделей занижают осадки на Западном Кавказе: на станции Клухорский перевал ошибки колеблются от –20 до –140%; и завышают на Центральном и Восточном Кавказе (на 25–70%). Лишь две модели очень хорошо воспроизводят среднюю сезонную сумму осадков, которая оказалась меньше межгодовой изменчивости, характеризуемой величиной стандартного отклонения (14%): это модель BCC-CSM2-MR (2%) и CESM2 (13%). Ещё пять моделей воспроизводят зимние осадки удовлетворительно: ACCESS-ESM1-5, IITM-ESM, MIROC-ES2L, INM-CM5-0, AWI-CM-1-1-MR (табл. 3). Лучше всего средние сезонные суммы осадков за холодный период воспроизводятся на станциях Сулак и Терскол: 11 и 9 моделей показали отклонение средней сезонной суммы от наблюдений менее чем на 50%. Хуже всего воспроизводятся осадки на станции Шаджатмаз: представленные в табл. 3 модели завышают их значения на 60–70% (то есть на 150–250 мм). При этом коэффициенты корреляции для каждой из станций не превышают 0.3.

Таблица 3. Простейшие статистические оценки отклонений температуры воздуха и осадков за холодный сезон по данным моделирования (Δ | отклонение от данных наблюдений, σ | стандартное отклонение по данным моделирования) в среднем по кавказскому региону по данным 7 лучших моделей CMIP6*

Модель**	Температура T, °C		Осадки, % от нормы	
	ΔT	сравнение с σ	ΔP	сравнение с σ
ACCESS-ESM1-5	-2.2	$1\sigma \leq \Delta T \leq 2\sigma$	-19	$ \Delta P \leq 1\sigma$
IPM-ESM	+5.1	$ \Delta T \geq 2\sigma$	26	$1\sigma \leq \Delta P < 2\sigma$
INM-CM5-0	-0.2	$ \Delta T < 1\sigma$	23	$1\sigma \leq \Delta P < 2\sigma$
MIROC-ES2L	+12.0	$ \Delta T > 2\sigma$	-14	$ \Delta P = 1\sigma$
AWI-CM-1-1-MR	-0.6	$ \Delta T < 1\sigma$	+22	$1\sigma \leq \Delta P < 2\sigma$
CESM2	+0.7	$ \Delta T < 1\sigma$	+13	$ \Delta P < 1\sigma$
BCC-CSM2-MR	+6.0	$ \Delta T > 2\sigma$	2	$ \Delta P < 1\sigma$
Ансамбль***	-0.6	$ \Delta T = 1\sigma$	10	$1\sigma \leq \Delta P < 2\sigma$

* Зелёный цвет означает хорошее совпадение результатов моделирования с данными наблюдений (ошибка меньше σ), жёлтый – удовлетворительное (ошибка больше или равна σ , но меньше 2σ), красный – неудовлетворительное (ошибка больше 2σ).

** Жирным шрифтом обозначены те модели, которые и температуру, и осадки воспроизвели хорошо, или хотя бы удовлетворительно.

*** Среднее по ансамблю рассчитывается по данным моделей, выделенных жирным шрифтом.

Для тех моделей, которые наиболее успешно воспроизвели осадки, также представлены оценки моделирования второго важнейшего параметра – температуры воздуха (см. табл. 3). Видно, что из данного списка лучшей оказалась модель CESM2: ошибки как средней зимней температуры, так и зимней суммы осадков меньше стандартного отклонения. Неплохо воспроизводят обе климатические характеристики региона модели ACCESS-ESM1-5, INM-CM5-0 и AWI-CM-1-1-MR. Модель BCC-CSM2-MR показала наилучший нормированный коэффициент корреляции по температуре ($R = 0.54$), однако средняя абсолютная ошибка температуры в среднем по Кавказу достигает 6 °C и превышает стандартное отклонение почти в 5 раз. Поэтому в дальнейшем для анализа будущих изменений температуры и осадков используются четыре модели из семи: CESM2, AWI-CM-1-1-MR, INM-CM5-0, ACCESS-ESM1-5 (см. табл. 3). При оценке лавинной опасности по территории Кавказа имеет смысл акцентировать внимание на результатах американской модели CESM2, которая успешно воспроизводит как температуру воздуха, так и сумму осадков за холодный период.

Климатические аномалии в конце XXI века по результатам моделей CMIP6. На рис. 2 показаны аномалии средней зимней температуры и суммы осадков за 2071–2100 гг. относительно современного климата (1981–2010 гг.). Аномалии получены по данным выбранных лучших четырёх моделей CMIP6 (см. табл. 3) и представляют собой

разность между средними многолетними значениями за последнее 30-летие по сценарию SSP-5.8.5 и за исторический период 1981–2010 гг. Аномалии температуры воздуха, осреднённые по холодному периоду (рис. 2, *слева*) оказываются существенно положительными для всего региона по данным всех выбранных моделей и существенно выходят за пределы современной межгодовой изменчивости. При этом межмодельный разброс значений по высокогорным районам Кавказа весьма велик (2–6.5 °C).

Самая точная модель CESM2 демонстрирует повышение зимней температуры на Северном Кавказе на 5.0–6.5 °C, по другим трём моделям рост температуры к концу века составит 3–4.5 °C по сравнению с периодом 1981–2010 гг. Это означает, что граница постоянного снежного покрова к концу XXI века поднимется примерно на 600–1000 м по сравнению с современным положением, и в январе–феврале будет проходить по изогипсам 1800–2200 м над ур. моря. Аномалии зимних осадков в конце XXI века по сравнению с современным климатом невелики (см. рис. 2, *справа*): лучшая модель CESM2 на большей части Северного Кавказа воспроизводит небольшой рост осадков (до 10% от современной нормы), в центральной части до 25%. Более интенсивный рост осадков до 50% показывают другие модели, причём по результатам модели INM-CM5-0 сумма зимних осадков увеличивается до 50% по всей территории Кавказа.

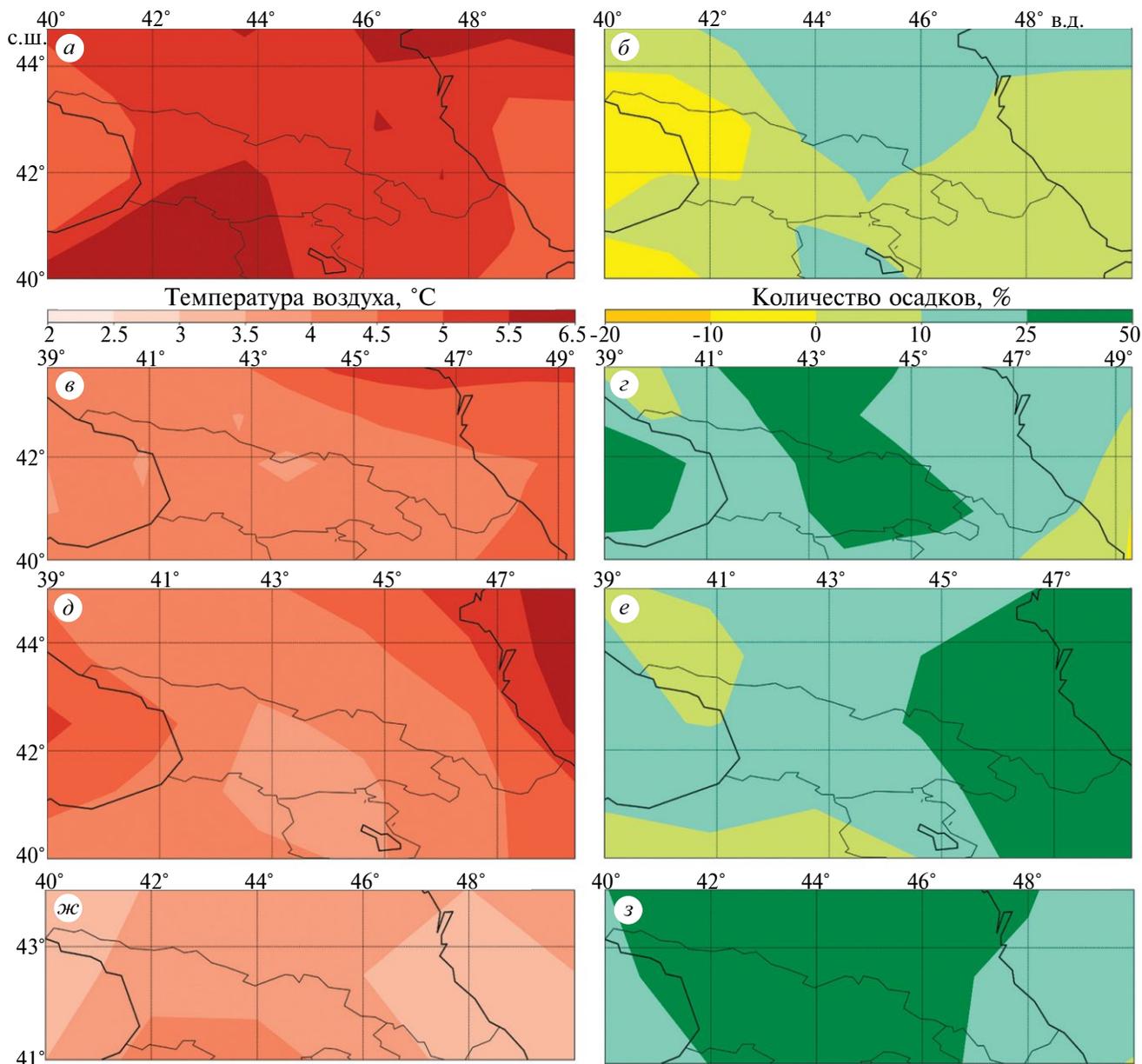


Рис. 2. Аномалии температуры воздуха (°C, *а, в, д, ж*) и осадков (% *б, з, е, з*) в конце XXI в. на Кавказе (разность между прогнозом на 2071–2100 гг. по сценарию RCP8.5 и историческими данными за 1981–2010 гг.) по данным лучших моделей CMIP6: CESM2 (*а, б*), AWI-CM-1-1-MR (*в, з*), ACCESS-ESM1-5 (*д, е*), INM-CM5-0 (*ж, з*)

Fig. 2. Anomalies of the air temperature (°C, *a, в, д, ж*) and precipitation (% *б, з, е, з*) at the end of the XXI century in the Caucasus (the difference between the model forecast for the years 2071–2100 and historical model data over the period 1981–2010) by the best CMIP6 model data: CESM2 (*a, б*), AWI-CM-1-1-MR (*в, з*), ACCESS-ESM1-5 (*д, е*), INM-CM5-0 (*ж, з*)

Таким образом, в среднем как по данным лучшей модели CESM2, так и по результатам ансамбля четырёх выбранных моделей на территории Кавказского региона прогнозируется небольшой рост зимних осадков: на 25% по сравнению с современной сезонной суммой. Судя по всему, можно ожидать небольшое увеличение зимних осадков, которое будет обеспечиваться отдельными

экстремальными снегопадами в отдельно взятые зимние сезоны. Идея увеличения экстремальных осадков на фоне малой изменчивости сезонных и средних многолетних сумм во многих регионах планеты обсуждается в ряде работ (Chernokulsky et al., 2019; Aleshina et al., 2021) и отчасти связана с сочетанием роста влагосодержания столба атмосферы в силу закона Клаузиуса–Клапейрона

с увеличением конвективной неустойчивости тропосферы (Lenderink, Van Meijgaard, 2008; Min et al., 2011). Эти эффекты, прежде всего, типичны для тёплого полугодия. Однако на юге умеренной зоны, тем более в условиях роста теплосодержания тропосферы, они могут проявиться и в зимние месяцы.

Статистические характеристики климатических аномалий в конце XXI века. Были выполнены также оценки функций распределения плотностей вероятности по рядам средней месячной температуры воздуха и месячных сумм осадков холодного периода (рис. 3) в среднем по территории Кавказа для современного климата (1981–2010 гг.

по данным реанализа ERA5) и климатического среза на конец XXI века (2071–2100 гг. по данным ансамбля четырёх лучших моделей CMIP6). Для средней суточной температуры холодного сезона отмечается закономерное и ярко выраженное смещение как средних, так и максимальных величин в сторону более высоких значений. Наиболее повторяемые величины среднемесячной температуры увеличатся на 5 °C и достигнут 7–8 °C. Важно отметить, что это осреднённая по всему Кавказу температура, соответствующая средней высоте над уровнем моря порядка 1200 м. Если предположить относительную неизменность среднего зимнего

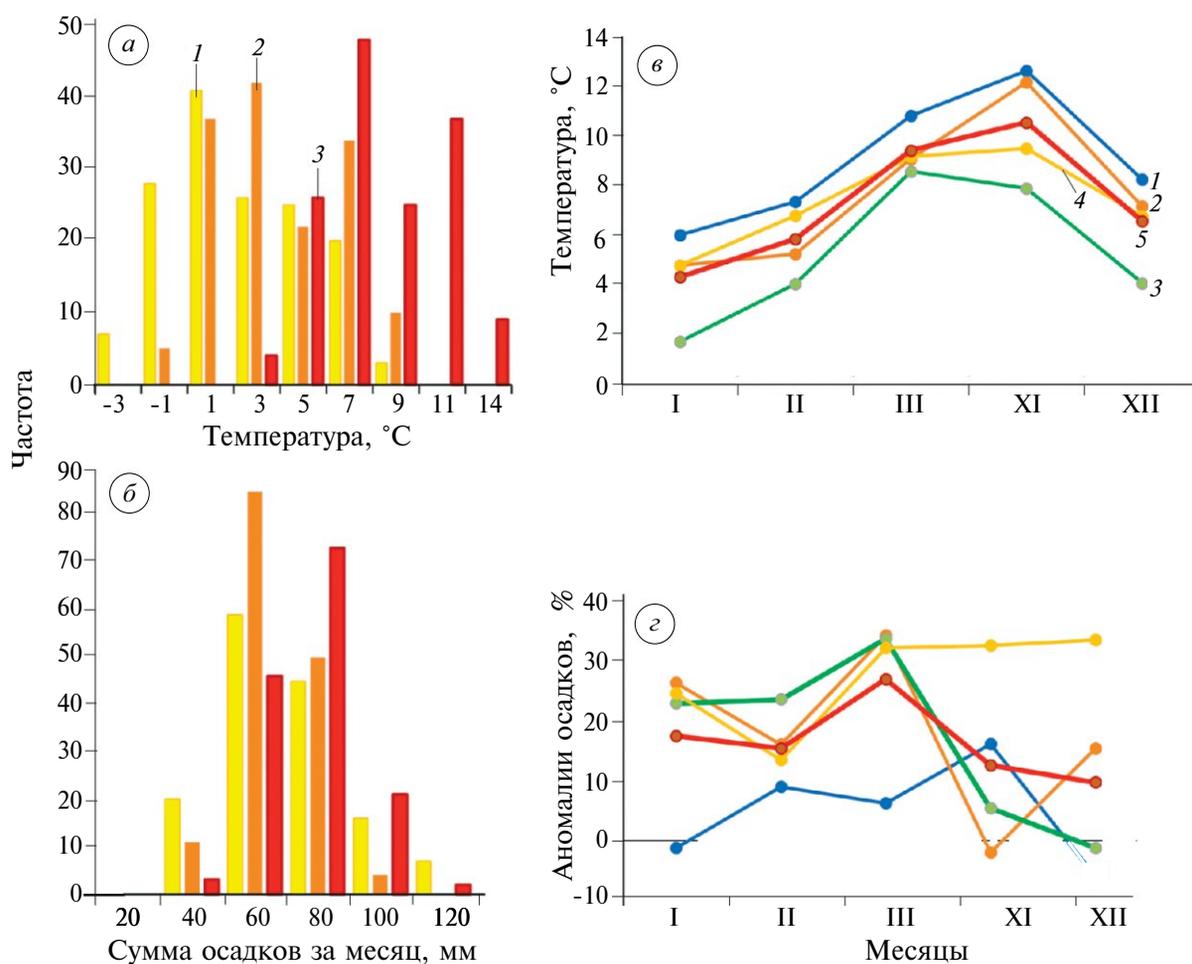


Рис. 3. Функции распределения плотностей вероятности аномалий приземной температуры воздуха холодного сезона в среднем по Кавказу (а) и аномалий сезонных сумм осадков (б) по данным климатических моделей CMIP6 для периода 2071–2100 гг. (3) по сравнению с современным климатом (реанализ ERA5 (1) и исторические данные моделей CMIP6 за период 1981–2010 гг. (2); сезонный ход аномалий температуры воздуха (в) и осадков (г) по данным выбранных моделей CMIP6 (1– CESM2, 2 – AWI-CM-1-1-MR, 3 – ACCESS-ESM1-5, 4 – INM-CM5-0) и их ансамбля (5)

Fig. 3. Probability density distribution functions of the anomalies of the surface air temperature of the cold season on average in Caucasus (a) and anomalies of seasonal precipitation amounts (b) according to CMIP6 climate models for the period 2071–2100 (3) compared with the modern climate (ERA5 reanalysis (1) and historical CMIP6 model data for the period 1981–2010 (2); seasonal course of the air temperature anomalies (в) and precipitation (г) according to the data of the selected CMIP6 models (1– CESM2, 2 – AWI-CM-1-1-MR, 3 – ACCESS-ESM1-5, 4 – INM-CM5-0) and their ensemble (5)

вертикального градиента температуры (примерно $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$), то можно предположить, что нулевая изотерма в холодный период будет проходить примерно по изогипсе 2000 м над ур. моря. В целом вид функции распределения близок к нормальному. Минимально возможные среднемесячные значения температуры по прогностическим данным увеличатся на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и перейдут из отрицательных значений ($-3\text{...}-1\text{ }^{\circ}\text{C}$) в положительные ($1\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$), а экстремально высокие достигнут $14\text{ }^{\circ}\text{C}$. В связи с этим важно отметить, что вероятность холодных зим или отдельных экстремально холодных зимних месяцев на Кавказе хоть и существенно снизится, но не будет нулевой (см. рис. 3). Фоновый климат горных районов Кавказа будет существенно теплее современного, однако отдельные короткие периоды экстремальных холодов в регионе, или даже единичные аномально холодные зимы всё равно будут наблюдаться.

Интересно меняется плотность распределения месячных сумм осадков в среднем по Кавказу. Повторяемость наиболее вероятных значений ($40\text{--}60\text{ мм}$) уменьшается на 40%. Наиболее вероятными к концу века станут значения суммы осадков $60\text{--}80\text{ мм}$, при этом в несколько раз вырастет повторяемость экстремальных месячных сумм (более 80 мм). Примерно в 4 раза сократится вероятность низких месячных сумм осадков (менее 40 мм). Получается, что наиболее повторяемые средние месячные суммы будут изменяться не так сильно, однако повторяемость экстремально влажных зимних месяцев в регионе существенно возрастёт. Эти эффекты обсуждаются в ряде работ (Алешина и др., 2018), и могут быть связаны с одной стороны с ростом температуры поверхности Чёрного моря (Meredith et al., 2015) (и, следовательно, с увеличением испарения с его поверхности), а также с интенсификацией зимнего полярно-фронтового циклогенеза над его акваторией. Данные о внутрисезонном распределении аномалий основных климатических величин (см. рис. 3, в–г) выглядят неоднозначно. По температуре все модели демонстрируют максимальное потепление в ноябре и минимальное в январе и феврале. То есть однозначно можно говорить о сохранении тенденции смещения даты установления постоянного снежного покрова на более поздние сроки и не таком явном

сокращении зимнего сезона со стороны весенних месяцев. В аномалиях осадков результаты моделирования схожи и демонстрируют увеличение месячных сумм в марте (на $10\text{--}35\%$ больше, чем в условиях современного климата), при этом в начале холодного периода (ноябрь) увеличение осадков на 20% показывает лишь модель CESM2. В середине холодного периода существенных изменений осадков не прогнозируется. Таким образом, важный результат моделирования заключается в сохранении современной тенденции увеличения зимней суммы осадков за счёт последнего месяца холодного периода (март).

Оценка лавинной опасности к концу XXI века. Для прогноза лавинной обстановки в районе Центрального Кавказа в конце XXI в. был рассчитан индекс лавинной опасности за период с 2071 по 2100 гг. В качестве входной информации использовались средние месячные данные о температуре и осадках четырёх лучших моделей CMIP6, речь о которых шла выше (см. табл. 3). Использовались результаты расчётов по наиболее жёсткому сценарию выбросов парниковых газов RCP8.5. Три модели из четырёх показывают небольшое снижение вероятности зим с экстремальной лавинной опасностью (на $3\text{--}4\%$), при этом модель CESM2 показывает её увеличение на 5% к концу XXI в. (табл. 4). Среднее по ансамблю из лучших моделей практически не отличается от современных условий.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Метеорологическая интерпретация результатов моделирования лавинной опасности в конце XXI века. Увеличение зимних осадков на Кавказе, прогнозируемое в конце XXI в., с одной стороны, может быть связано с общим увеличением влагосодержания столба атмосферы в силу роста его теплосодержания (Min et al., 2011), но в то же время определяется циркуляционными эффектами. Например, в ряде работ показано, что ослабление западного переноса ведёт к росту повторяемости блокирующих ситуаций в крупномасштабной динамике атмосферы, что приводит к увеличению роли меридиональных режимов циркуляции (Семенов, 2016). Это, в свою очередь, может приводить к росту повторяемости как сухих, так и экстремально

Таблица 4. Лавинная опасность зим в процентном соотношении для 1983–2014 (по данным наблюдений и моделей CMIP 6) и 2071–2100 гг. в среднем по Центральному Кавказу вне зависимости от высоты над уровнем моря

Аномально высокая лавинная опасность	Данные станций	CESM2	AWI-CM-1-1-MR	INM-CM5-0	ACCESS-ESM1-5	Ансамбль
1983–2014	14%	11%	15%	16%	16%	13%
2071–2100	–	16%	12%	12%	12%	14%

влажных зим. Об ослаблении зональной циркуляции в конце XXI в. косвенно свидетельствует отрицательная аномалия осадков на Западном Кавказе, воспроизводимая некоторыми моделями. Показанное уменьшение осадков, скорее всего, связано с ослаблением орографического эффекта, которое в свою очередь является следствием ослабления набегающего западного потока. Ещё одной причиной увеличения осадков в регионе может быть рост температуры поверхности Чёрного моря, который фиксируется с начала XXI в. по спутниковым данным. Роль этого эффекта на климатических масштабах рассмотрена в работе (Алешина и др., 2018), а на отдельном примере взрывного циклогенеза, приведшего к катастрофическому наводнению в Крымске в 2012 г. в работе (Meredith et al., 2015). В летнее время роль температуры поверхности Чёрного и Средиземного морей в формировании положительных аномалий осадков не так очевидна: над регионом господствует отрог азорского антициклона, и аномалия может проявляться в виде отдельных экстремальных событий на Черноморском побережье и Западном Кавказе. Зимой положительная аномалия температуры поверхности Чёрного и Средиземного морей, достигающая 3–4 °С на фоне роста повторяемости ситуаций с блокированием западного переноса, может приводить к интенсификации средиземноморской ветви полярного фронта и увеличению количества осадков на Кавказе.

Рост повторяемости меридиональных типов циркуляции, который наиболее ярко проявляется в учащении процессов блокирования как в летних, так и в зимних условиях, выражается не только в неравномерности увлажнения, но и в кардинальном изменении температурного режима. Следует отметить, что темпы потепления на Кавказе примерно в полтора раза выше среднего планетарного, однако почти вдвое уступают таковым в Арктике. Формируется оно в основном за счёт смещения высотной планетарной фронтальной зоны, разделяющей тропические и умеренные воздушные массы к северу. Фактически это означает, что большая часть Северного Кавказа в конце XXI в. окажется в поясе субтропического климата, поэтому климатические условия в диапазоне высот 500–3000 м в будут примерно соответствовать современным Пиренеям.

Интерпретация лавинной опасности с использованием модели Snowpack. Важным звеном интерпретации результатов моделирования лавинной опасности служат численные эксперименты с одной из ведущих моделей снежного покрова SNOWPACK. При одном и том же количестве выпадающего снега степень лавинной опасности может быть совершенно разной из-за значительных различий в стратиграфии снежной толщи, которые не учитываются в климатических лавинных индексах.

Были реализованы два численных эксперимента по воспроизведению основных физических характеристик снежной толщи для двух контрастных зимних сезонов: с аномально высокой степенью лавинной опасности в 1986/87 г. и слабой в 2000/01 г. В качестве начальной информации использовались данные об осадках, температуре, скорости ветра и радиационном балансе ERA5. На рис. 4 показаны модельные профили плотности снега в течение зимы 1986/87 г., которая характеризовалась низкой средней сезонной температурой, положительной аномалией осадков и экстремальной лавинной опасностью. Во время этой зимы наблюдались два эпизода сильных снегопадов на фоне аномально низкой температуры воздуха, что в итоге привело к формированию серии особо крупных лавин. На рис. 4 хорошо видны слои с низкой плотностью снега (порядка 150 кг/м³). Эти слабые слои формируются из-за перекристаллизации снега на фоне низкой температуры, в результате возникают круглые снежные зёрна (см. рис. 4). Чередование плотных и менее плотных слоёв возрастает при резких перепадах температуры воздуха. Выше модель воспроизвела ослабленные слои в сочетании с вышележащей 20–30-сантиметровой толщей снега, характеризующейся средней плотностью 300–350 кг/м³. Такие условия соответствуют чрезвычайно высокой лавинной опасности: по ослабленным слоям сходит большая часть крупных и катастрофических лавин. Количество ослабленных слоёв и их свойства определяют устойчивость снежного покрова. Зимой 1986/87 г. модель воспроизводит большое количество таких слоёв, что свидетельствует о высокой вероятности схода особо крупной снежной лавины.

На рис. 4 показан также индекс устойчивости снежных слоёв (hand hardness index). Физический смысл индекса – величина усилия (в ньютонах), которое нужно приложить для того, чтобы разрушить снежный слой. На графике видно, что значение индекса всюду ниже 500 Н, что указывает на наличие ослабленного прослоя снега. В модельном разрезе снежной толщи прослеживается четыре таких прослоя, выше которых залегают гораздо более плотный снег. Такой тип стратиграфического разреза свидетельствует о потенциальной неустойчивости снежной толщи и её высокой лавиноопасности.

Далее рассмотрим зиму 2000/01 г., которая характеризуется низкой лавинной опасностью. Из рис. 4, в видно, что высота снежного покрова в эту зиму была в 3.5 раза ниже по сравнению с 1986/87 г. Модель не воспроизвела ослабленных слоёв, поскольку весь снежный покров имеет низкую плотность и по своему типу характеризуется как свежеснежный снег. Высокая плотность в конце февраля – начале марта связана с весенним снеготаянием и обводнением снежной толщи. В таких условиях высока вероятность формирования значительно менее опасных мокрых лавин,

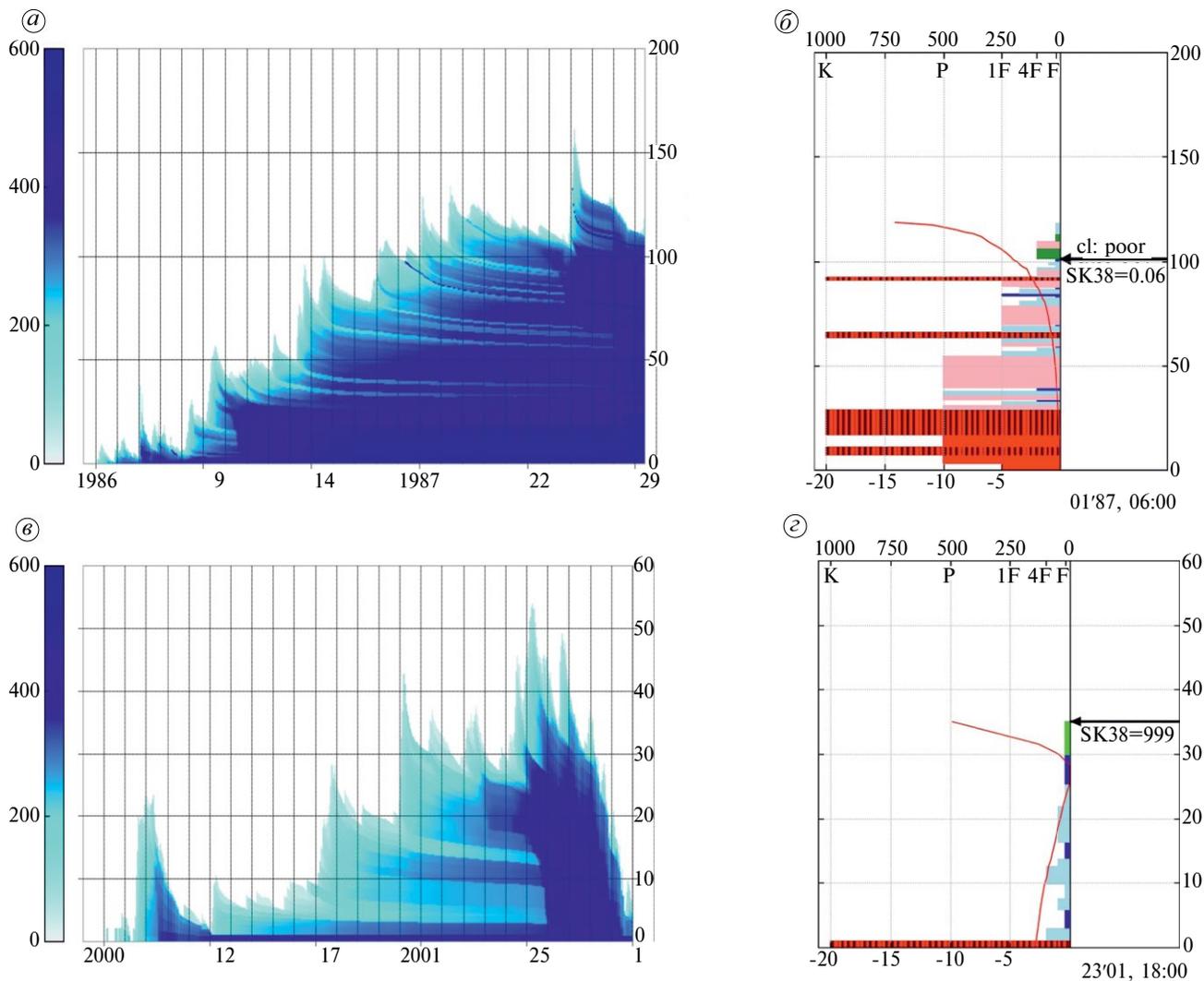


Рис. 4. Основные физические характеристики снежного покрова на типичной горизонтальной поверхности в Приэльбрусье по результатам расчёта модели SNOWPACK в течение холодного периода 1986/87 г., который характеризуется экстремальной лавинной опасностью, и холодного периода 2000/01 г., который характеризуется низкой лавинной опасностью: (а, в) плотность снежного покрова в течение холодного периода; стратиграфия снежного покрова 1.02.1987 (б) и 23.01.2001 (г). Тонкая красная линия показывает температуру в снежной толще, цвет прямоугольников показывает форму снежного зерна, а их длина описывает индекс твердости (устойчивости) снега

Fig. 4. The main physical characteristics of the snow cover on a typical horizontal surface in the Elbrus region based on the results of the SNOWPACK model during the cold period 1986/87, characterized by extreme avalanche danger, and the cold period 2000/01, characterized by low avalanche danger: (a, в) density of snow cover during the cold period; stratigraphy of the snow cover on February 1, 1987 (б) and on January 23, 2001 (г). A thin red line shows the temperature in the snow column, the color of the rectangles shows the shape of the snow grain, and their length describes the hardness index (stability) of the snow

которые более характерны для Западного Кавказа. На рис. 4, г показан пример стратиграфии снежного покрова для 23 января 2001 г. Хорошо видно, что прочный слой соответствует подошве снежного покрова. Остальная стратиграфия представлена слоями различной степени слабости, но в любом случае характеризуемыми плотностью, существенно ниже средней сезонной (в основном не более 200 кг/м³). Такая стратиграфия снежного покрова соответству-

ет крайне низкой лавинной опасности. Также важно отметить существенно более высокую температуру снежной толщи по сравнению с 1986/87 г.

Важным результатом этой части работы служит тот факт, что использование даже грубых данных реанализа позволяет достаточно точно и физически обоснованно воспроизводить стратиграфию снежного покрова с помощью SNOWPACK и давать оценку лавиноопасности снега на горном

склоне. Во-вторых, эти результаты можно качественно использовать в рамках прогностической оценки лавинной опасности в конце XXI в. Большие положительные аномалии осадков на фоне преобладания более высокой по сравнению с современной температуры воздуха означает, что на большей части Кавказа более вероятным сценарием будет формирование однородной снежной толщи, характеризующейся либо большими массами свежеснежавшего снега, либо значительной толщиной обводнённого снега. И в том, и в другом случае речь не идёт об экстремальной лавинной опасности. В работе (Ortner et al., 2025) для Швейцарских Альп были выполнены оценки снежной толщи по модели SNOWPACK по климатическим модельным данным для середины и конца XXI в. по сценарию RCP8.5. Показано, что результаты очень сильно зависят от конкретной климатической модели (при этом могут получаться разные тенденции температуры снежной толщи и снегонакопления), но в целом получено, что при тенденции к сильному потеплению и смещению границы снежного покрова вверх площадь лавиноопасной территории будет сокращаться.

Интерпретация результатов моделирования лавинной опасности с позиций классического лавиноведения. Результаты моделирования показывают, что к концу XXI в. повторяемость экстремальной лавинной опасности существенно не изменится по сравнению с современным уровнем. Однако детальный анализ климатического прогноза (в частности, внутрисезонное распределение осадков и температуры) в сочетании с примерами моделирования с помощью SNOWPACK показывают, что более реалистично выглядит иной сценарий. Зимние сезоны в конце текущего столетия в целом будут сопровождаться уменьшением лавинной опасности во всех высотных зонах Кавказа. Выполненные оценки показывают, что при потеплении на 4...6 °С нулевая изотерма января на Центральном Кавказе будет проходить на высотах 2000–2300 м, то есть почти у подножия Эльбруса. В этих условиях в низкогорной зоне будут преобладать зимы с выпадением жидких и смешанных осадков. Лавинная опасность здесь будет наблюдаться только в кратковременные периоды формирования снежного покрова на горных склонах, в основном в феврале, причём до уровня экстремально высокой она сможет доходить с исчезающе малой вероятностью. Среднегорная зона окажется в поясе неустойчиво снежных зим с высокой межгодовой и внутрисезонной изменчивостью толщины снежного покрова. Активизация схода лавин в этой зоне будет носить эпизодический характер и будет связана с резкими кратковременными похолоданиями, сопровождающимися интенсивными снегопадами. В высокогорье, несмотря на увеличение осадков и сохранение устойчивого отрицательного фона

зимней температуры, также будет наблюдаться некоторое снижение уровня лавинной опасности вследствие уменьшения количества крупных лавин из сухого снега, представляющих главную угрозу для дна горных долин. Иллюстрацией к данному выводу служит сопоставление современных условий лавинообразования на Западном и Центральном Кавказе. В условиях тёплых и снежных зим Западного Кавказа для формирования особо крупной лавины требуется втрое большее количество осадков (300–660 мм), чем на Центральном Кавказе (110–220 мм) (Олейников, 2024). Аналогичная ситуация получилась по прогностическим модельным оценкам на конец XXI в. и для Швейцарских Альп (Mayer et al., 2024): уменьшение вероятности возникновения крупных лавин из сухого снега и небольшое увеличение числа лавин из рыхлого и мокрого снега, в результате чего величина снижения лавинной активности составила от –10 до –60% в зависимости от высоты и выбранного сценария климатических изменений.

Актуален вопрос о повторяемости лавинных экстремумов. Как показал опыт инструментальных наблюдений за снежными лавинами в XX–XXI вв., массовые лавинные катастрофы на Кавказе формируются в условиях суровых и снежных зим. Согласно результатам моделирования, повторяемость этих событий существенно уменьшится (в 4–5 раз), но не исчезнет совсем. Фоновый климат горных районов Кавказа станет существенно теплее современного, однако в отдельные короткие периоды всё равно будут наблюдаться возвраты экстремальных холодов. В формировании лавинных катастроф важная роль принадлежит режиму выпадения осадков. По материалам наблюдений на Центральном Кавказе 80% случаев с массовыми лавинными катастрофами наблюдались в аномально холодные зимы с пиком осадков в середине сезона (январь) (Олейников, 2024). Выбранные модели CMIP6 по-разному воспроизводят режим современных осадков на Кавказе (см. табл. 3), однако общая тенденция, которую они показывают – максимальные значения положительной аномалии осадков по сравнению с современными условиями в марте (25–30%), то есть в конце холодного сезона. Такая ситуация наблюдается на Центральном Кавказе в последние 25 лет, когда сход особенно крупных лавин смещается на зимне-весенний период. Эти лавины состоят из влажного и мокрого снега, поэтому их разрушительное действие и опасность существенно уступает крупным лавинам из сухого снега. Вместе с тем модели демонстрируют некоторое увеличение осадков в январе (на 15–20%). Поэтому несмотря на общее явное снижение лавинной опасности по территории Кавказа исключать повторение событий по типу катастрофических зим 1975/76 и 1986/87 гг. в условиях последних десятилетий XXI века нельзя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена оценка результатов воспроизведения современного среднего многолетнего режима температуры и осадков в зимний сезон (с ноября по март включительно) моделями CMIP6 на примере Большого Кавказа на основе сравнения с данными горных метеостанций. Из 22 МЗС отобраны четыре лучшие: CESM2, AWI-CM-1-1-MR, INM-CM5-0, ACCESS-ESM1-5. Средняя ошибка температуры зимнего сезона по результатам этих моделей составляет -0.6 °С, осадков 10% от сезонной суммы. И то, и другое значение вписывается в значение межгодовой изменчивости, характеризующее стандартным отклонением. Поэтому прогностические значения аномалии температуры и осадков по результатам этих моделей, превышающие значения оцененных ошибок для современного климата, можно считать значимыми.

Результаты климатических проекций на последнее 30-летие XXI века, полученные по данным выбранных моделей, показывают, что средняя температура холодного периода в горных районах Кавказа окажется на $4...6$ °С выше современной, и по большей части региона перейдет в область положительных значений. Сезонная сумма осадков окажется выше современной, в среднем на 25%, при этом важно отметить значительный межмодельный разброс: от 10% по результатам наиболее точной модели CESM2 до 50% по результатам российской МЗС INM-CM5-0. Результаты моделирования показали, что несмотря на незначительное изменение средних сезонных сумм примерно в 2–3 раза возрастет повторяемость случаев с экстремальными месячными суммами осадков, превышающими 100 мм. Причём произойдет это в основном на Центральном и Восточном Кавказе: в западной части региона прогнозируется слабо выраженный отрицательный тренд зимней суммы осадков.

Результаты прогноза CMIP6 были использованы для оценки климатической составляющей лавинной опасности в 2070–2099 гг. Формально результаты моделирования показывают, что повторяемость зим с экстремальной лавинной опасностью изменится мало по сравнению с современной. Но более детальный анализ показывает, что экстремальная лавинная опасность будет снижаться. В высокогорье, несмотря на рост повторяемости аномальных осадков, будет наблюдаться уменьшение особо крупных лавин из сухого снега из-за более теплых условий, а также смещения сезонного максимума осадков на март. При этом сохранится вероятность возврата зимних холодов, что в сочетании с аномалиями месячных осадков приведёт к реализации единичных экстремальных лавинных зим.

Были также проведены косвенные оценки будущих изменений стратиграфии снежной толщи на основе экспериментов с моделью SNOWPACK.

Численное моделирование двух контрастных зимних сезонов (1986/87 г., характеризующийся экстремальной лавинной опасностью, и 2000/01 г., характеризующийся аномально низкой лавинной активностью) показало, что использование даже грубых данных реанализа ERA5 даёт физически обоснованный результат: формирование структурно-текстурных особенностей снежной толщи, характерных для зим с высокой лавинной опасностью (1986/87 г.) и последующим процессом уплотнения и обводнения снега в весенний период. С учётом прогнозируемых на конец XXI в. климатических аномалий, последний сценарий рассматривается как наиболее вероятный. В условиях тёплых зим, вне зависимости от количества выпадающего снега, будет преобладать тенденция развития снежного покрова по типу уплотнения, что препятствует лавинообразованию:

Подводя итоги исследования, отметим, что уменьшение лавинной опасности на Кавказе при потеплении климата в конце XXI в. будет проявляться в следующем: 1) уменьшении снежности зим; 2) ослаблении процессов метаморфизма, способствующих формированию микропрослоев разрыхления в снежной толще; 3) повышении порогового уровня количества осадков во время снегопадов, необходимого для обрушения крупных лавин; 4) сокращении числа лавин из сухого свежеснежного покрова, которые представляют главную угрозу для днища горных долин. Отмечено, что единичные аномально холодные и снежные зимы, характеризующиеся экстремальной лавинной опасностью, будут реалистичны и в будущем климате — особенно в высокогорных районах

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the Grant of the Russian Ministry of Education and Research (contract No. 075-15-2024-554 from 24.04.2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенский В.П.* Определение лавинных нагрузок. Алма-Ата: «Гылым», 1991. 116 с.
- Глазовская Т.Г., Трошкина Е.С.* Влияние глобального изменения климата на лавинный режим на территории бывшего Советского Союза // Материалы гляциологических исследований. 1998. № 84. С. 88–91.
- Жданов В.В.* Экспериментальный метод прогноза лавин на основе нейронных сетей // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 502–510.
- Куксова Н.Е., Торопов П.А., Олейников А.Д.* Метеорологические условия экстремального лавинообразования в горах Кавказа по данным наблюдений

- и реанализов // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 377–390.
- Олейников А.Д., Володичева Н.А., Бояршинов А.В. Снежность зим и лавинная деятельность на Большом Кавказе за период инструментальных наблюдений // Материалы гляциологических исследований. 2000. № 88. С. 74–83.
- Олейников А.Д., Володичева Н.А. Экстремальные зимы XX–XXI вв. как индикаторы снежности и лавинной опасности в условиях прошлого и прогнозируемого изменений климата // Лёд и Снег. 2012. № 3 (119). С. 52–57.
- 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.
- Олейников А.Д. Районы максимальной интенсивности лавинообразования на Большом Кавказе при крупных аномалиях температурно-влажностного режима // Лёд и Снег. 2024. Т. 64. № 2. С. 221–230.
- Семенов В.А. Связь аномально холодных зимних режимов на территории России с уменьшением площади морских льдов в Баренцевом море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 3. С. 257–266.
- Торопов П.А. Оценка качества воспроизведения моделями общей циркуляции атмосферы климата Восточно-Европейской равнины // Метеорология и гидрология. 2005. № 5. С. 5–21.
- Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. № 10. P. 105004.
- Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V. Observed changes in convective and stratiform precipitation in northern Eurasia over the last five decades // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14. P. 045001.
- Christen M., Kowalski J., Bartelt P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // Cold Regions Science and Technology. 2010. № 1–2 (63). P. 1–14.
- Flato G., Marotzke J., Abiodun B., Braconnot P., Chou S.C., Collins W., Cox P., Driouech F., Emori S., Eyring V., Forest C., Gleckler P., Guilyardi E., Jakob C., Kattsov V., Reason C., Rummukainen M. Evaluation of climate models. In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2013. P. 741–882. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.020>
- 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.
- 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.
- Jia K., Ruan Y., Yang Y., Zhang C. Assessing the Performance of CMIP5 Global Climate Models for Simulating Future Precipitation Change in the Tibetan Plateau // Water. 2019. № 9 (11). P. 1771.
- Lehning M., Fierz C., Lundy C. An objective snow profile comparison method and its application to SNOWPACK // Cold Regions Science and Technology. 2001. P. 253–261.
- Lenderink G., Van Meijgaard E. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes // Nature Geoscience. 2008. V. 1. No. 8. P. 511–514.
- Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., and Chernokulsky A.V. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // Nature Geoscience. 2015. Vol. 8. No. 8. P. 615–619.
- Min S.K., Zhang X., Zwiers F.W., Hegerl G.C. Human contribution to more intense precipitation extremes // Nature. 2011. V. 470. No. 7334. P. 378–381.
- Ortner G., Michel A., Spieler M.B.A., Christen M., Bühler Y., Bründl M., Bresch D.N. A novel approach for bridging the gap between climate change scenarios and avalanche hazard indication mapping // Cold Regions Science and Technology. 2025. V. 230. P. 104355.
- Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlax M.G. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature // Journal of Climate. 2007. V. 20. No. 22. P. 5473–5496.
- Su F., Duan X., Chen D., Xiao Z., Cuo L. Evaluation of the Global Climate Models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau // Journal of Climate. 2013. № 10 (26). P. 3187–3208.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design // Bulletin of the American Meteorological Society. 2012. № 4 (93). P. 485–498.
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M. Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century // Intern. Journal of Climatology. 2019. P. 4703–4720.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. In press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Citation: *Korneva I.A., Oleynikov A.D., Toropov P.A., Varentsova N.E., Kovalenko N.V. Meteorological conditions and avalanche danger of winters in the Caucasus at the end of the 21st century based on the results of CMIP6 models. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (1): 103–119. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010082*

Meteorological conditions and avalanche danger of winters in the Caucasus at the end of the 21st century based on the results of CMIP6 models

© 2025 I. A. Korneva^a, A. D. Oleynikov^b, P. A. Toropov^{a,b,#}, N. E. Varentsova^b, N. V. Kovalenko^b

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: tormet@inbox.ru*

Received September 20, 2024; revised December 18, 2024; accepted December 25, 2024

The paper considers a forecast of avalanche danger in the Caucasus at the end of the 21st century based on the climatic avalanche indicator criterion developed at Moscow State University, using the results of the CMIP6 Earth System Models (ESM). The quality of models' estimates of modern winter climate in the Caucasus has been evaluated. The best models were selected, for which the average temperature error is -0.6 °C, precipitation error is 10%. According to these models' data, by the end of the XXI century the average winter air temperature in the Caucasus will be 4–6 °C higher than the present one, and the precipitation sum will exceed the modern value by 25%. The frequency of seasons with extreme moisture will increase 2–3 times (monthly precipitation more than 100 mm). The seasonal maximum precipitation at the end of the 21st century will shift to March, while extremely dangerous avalanche winters are usually accompanied by a January maximum precipitation with a significant negative temperature anomaly. Experiments were also conducted with the numerical model SNOWPACK, which showed that despite the positive precipitation anomaly and the possible occurrence of cold winters, the most typical situation by the end of the 21st century will be the formation of a homogeneous snow column with low density, or heavily watered snow cover. Both situations are not avalanche-prone. Therefore, the background forecast of avalanche danger for the years 2071–2100 can be formulated as follows: a significant decrease in the frequency of the most destructive large avalanches from dry snow in high-mountain areas and their disappearance in mid-mountain areas, and a tendency to an increase in the number of less dangerous avalanches from loose and wet snow.

Keywords: avalanches, avalanche danger, CMIP6 models, SNOWPACK model, meteorological conditions of extreme avalanche formation

REFERENCES

- Blagoveshenskiy V.P. Opredelenie lavinnih nagruzok. Determination of avalanche loads. Alma-Ata: Gylym. 1991: 116 p. [In Russian].*
- Glazovskaya T.G., Troshkina E.S. The impact of global climate change on the avalanche regime in the former Soviet Union. *Materialy glyaciologicheskikh issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 1998, 84: 88–91 [In Russian].*
- Zhdanov V.V. An experimental method for predicting avalanches based on neural networks. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (4): 502–510 [In Russian].*
- Kuksova N.E., Toropov P.A., Oleynikov 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].*
- Oleynikov A.D., Volodicheva N.A., Boyarshinov A.V. Winter snowfall and avalanche activity in the Greater Caucasus during the period of instrumental observations. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 2000, 88: 74–83 [In Russian].*
- Oleynikov A.D., Volodicheva N.A. Extreme winters of the XX–XXI centuries. as indicators of snowfall and avalanche danger in the context of past and projected climate change. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2012, 3 (119): 52–57 [In Russian].*
- Oleynikov A.D., Volodicheva N.A. Avalanche maximum winters in the Greater Caucasus during the period of instrumental observations (1968–2016). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020, 60 (4): 521–532 [In Russian].*

- Oleynikov A.D.* Areas of maximum intensity of avalanche formation in the Greater Caucasus associated with large anomalies of temperature and humidity regime. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (2): 221–230 [In Russian].
- Semenov V.A.* The connection of abnormally cold winter regimes in Russia with a decrease in the area of sea ice in the Barents Sea. *Izvestiya Rossiyskoi Akademii Nauk. Fizika atmosfery i okeana. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016, 52 (3): 257–266 [In Russian].
- Toropov P.A.* Assessment of the quality of reproduction by models of the general atmospheric circulation of the climate of the East European Plain. *Meteorologia i Gidrologia. Russian Meteorology and Hydrology*. 2005, 5: 5–21 [In Russian].
- Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V.* A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data. *Environmental Research Letters*. 2021, 16 (10): 105004.
- Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V.* Observed changes in convective and stratiform precipitation in northern Eurasia over the last five decades. *Environmental Research Letters*. 2019, 14: 045001.
- Christen M., Kowalski J., Bartelt P.* RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*. 2010, 1–2 (63): C. 1–14.
- Flato G., Marotzke J., Abiodun B., Braconnot P., Chou S.C., Collins W., Cox P., Driouech F., Emori S., Eyring V., Forest C., Gleckler P., Guilyardi E., Jakob C., Kattsov V., Reason C., Rummukainen M.* Evaluation of climate models. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2013: 741–882. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.020>
- 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.
- 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.
- Jia K., Ruan Y., Yang Y., Zhang C.* Assessing the Performance of CMIP5 Global Climate Models for Simulating Future Precipitation Change in the Tibetan Plateau. *Water*. 2019, 9 (11): 1771.
- Lehning M., Fierz C., Lundy C.* An objective snow profile comparison method and its application to SNOWPACK. *Cold Regions Science and Technology*. 2001: 253–261.
- Lenderink G., Van Meijgaard E.* Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes // *Nature Geoscience*. 2008, 1 (8): 511–514.
- Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., and Chernokulsky A.V.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. *Nature Geoscience*. 2015, 8 (8): 615–619.
- Min S.K., Zhang X., Zwiers F.W., Hegerl G.C.* Human contribution to more intense precipitation extremes. *Nature*. 2011, 470 (7334): 378–381.
- Ortner G., Michel A., Spieler M.B.A., Christen M., Bühler Y., Bründl M., Bresch D.N.* A novel approach for bridging the gap between climate change scenarios and avalanche hazard indication mapping. *Cold Regions Science and Technology*. 2025, 230: 104355.
- Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlaw M.G.* Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*. 2007, 20 (22): 5473–5496.
- Su F., Duan X., Chen D., Xiao Z., Cuo L.* Evaluation of the Global Climate Models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*. 2013, 10 (26): 3187–3208.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.* An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012, 4 (93): 485–498.
- Toropov P.A., Aleshina M.A., and Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century. *Intern. Journ. of Climatology*. 2019, 4703–4720.
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (In press). <https://doi.org/10.1017/9781009157896>